

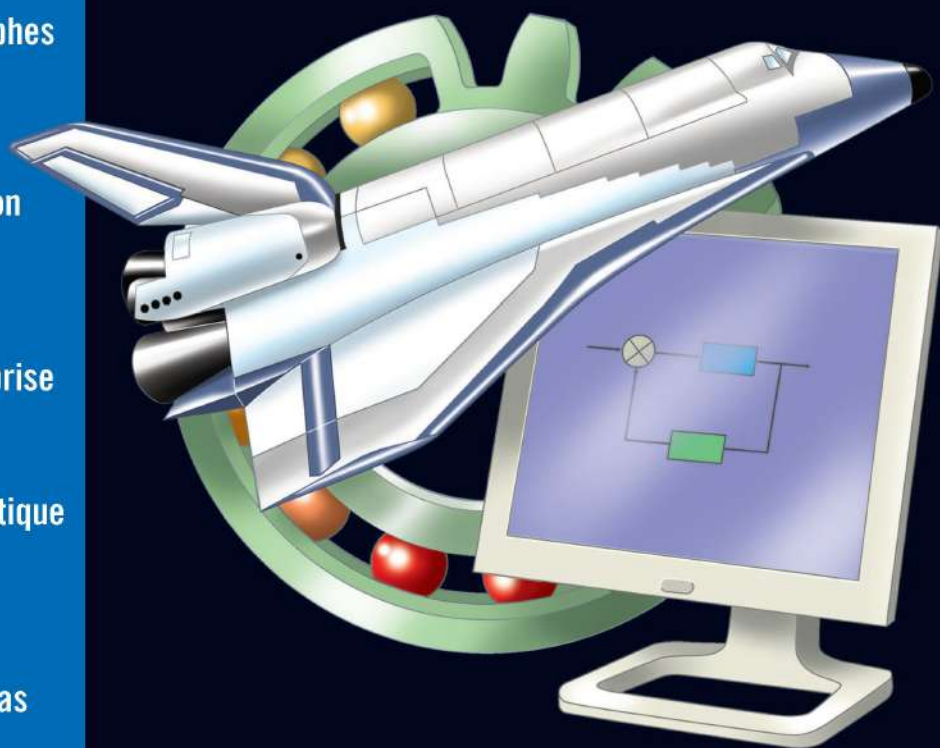
Jean-Louis FANCHON

Fomesoutra.com
ça soutra !

Guide des sciences et technologies industrielles

Édition 2016
conforme aux normes
en vigueur

- Dessin industriel et graphes
- Matériaux
- Éléments de construction
ou de machines
- Méthodes d'analyse
et organisation d'entreprise
- Systèmes automatisés,
automatisme et automatique
- Éco-conception
- Normalisation et schémas



afnor
ÉDITIONS

Nathan

Jean-Louis FANCHON

Guide des sciences et technologies industrielles

Édition 2016
conforme aux normes
en vigueur
à la date du 18 janvier 2016

- Dessin industriel et graphes
- Matériaux
- Éléments de construction ou de machines
- Méthodes d'analyse et organisation d'entreprise
- Systèmes automatisés, automatisme et automatique
- Éco-conception
- Normalisation et schémas

Sommaire

DESSIN INDUSTRIEL ET GRAPHES

| | |
|--|-----|
| 1. Dessins techniques : généralités | 5 |
| Type de dessins. Échelles. Formats. Éléments permanents. Cartouche. Nomenclature. Traits. Écriture. Dessin manuel : matériel et techniques de tracé. Formes usuelles. Représentation normalisée des filetages. | |
| 2. CAO/DAO - Logiciels 2D | 17 |
| Formats d'échange. Configurations des logiciels. Commandes usuelles : vue, calque, dessin, aides au tracé, modification, bloc, attribut. Dessins paramétrés. | |
| 3. Projections orthogonales - Normalisation | 33 |
| Principe. Disposition et correspondance des vues. Choix des vues. Vues partielles. Vues auxiliaires et interrompues. Positions particulières. Représentations des formes et des surfaces. Construction des vues. Intersections de cylindres. Exercices. | |
| 4. Coupes et sections | 45 |
| Coupes. Demi-coupe. Coupe partielle. Coupe brisée. Sections. Exercices. | |
| 5. Perspectives | 55 |
| Systèmes de projection. Perspectives axonométriques. Perspective et dessin isométriques. Perspectives dimétriques et trimétriques. Perspective cavalière. | |
| 6. Logiciels CAO/DAO-3D | 63 |
| Comparaison entre 2D et 3D. Commandes d'affichage. Création des objets 3D. Modeleurs, esquisse et arbre de création. Assemblages. Mise en plan. | |
| 7. Cotation : principes généraux (normes GPS) | 71 |
| Règles d'écriture. Cotation des angles, rayons, diamètres, chanfreins, trous et profils complexes. Règles et suggestions. Cas CAO/DAO. Dimensions nominales. Assemblages collés, clinchés... | |
| 8. Cotation tolérancée et ajustements (normes GPS) | 81 |
| Interchangeabilité. Cotation tolérancée. Ajustements normalisés ISO/AFNOR. Choix des ajustements. | |
| 9. Éléments de cotation fonctionnelle | 93 |
| Définitions. Représentation vectorielle. Détermination des chaînes de cotes. Exemples. Exercices. | |
| 10. Tolérances géométriques (normes GPS) | 101 |
| Inscriptions normalisées. Tolérances de forme, d'orientation, de positions et de battement. Cas des formes souples. Principe de l'enveloppe. Cas du maximum de matière. | |
| 11. États de surface (normes GPS) | 113 |
| Principaux défauts. Définitions. Paramètres et critères d'évaluation. Inscriptions normalisées. Critères de choix. | |
| 12. Graphiques et diagrammes usuels | 119 |
| Graphes à axe de coordonnées : différents cas, choix des échelles, suggestion de construction et principe de la linéarisation. Coordonnées polaires. Graphes triangulaires. Diagrammes à barres et camembert. Graphes à surfaces, histogrammes. Abaques. Organigrammes. Exercices. | |

MATÉRIAUX

| | |
|--|-----|
| 13. Matériaux : généralités | 135 |
| Métaux. Matières plastiques. Céramiques. Matériaux composites. | |
| 14. Essais des matériaux | 141 |
| Définitions. Traction. Résilience. Dureté. Fluage. Fatigue. Extensométrie. Photoélasticité. | |
| 15. Métaux ferreux : aspect métallurgique | 153 |
| Alliage et diagramme fer-carbone. Aciers au carbone. Traitements thermiques dans la masse. Influence des éléments d'addition. | |

| | |
|--|-----|
| 16. Aciers et fontes | 161 |
| Aciers d'usage général. Aciers spéciaux non alliés. Aciers faiblement alliés. Aciers fortement alliés. Fontes. | |
| 17. Métaux non ferreux | 169 |
| États métallurgiques. Aluminium, cuivre, magnésium, zinc, titane et leurs alliages. | |
| 18. Matières plastiques et élastomères | 177 |
| Propriétés générales. Thermoplastiques. Thermodurcissables. Élastomères. | |
| 19. Traitements de surface | 185 |
| Traitements thermiques de surface. Traitements électrolytiques. Métallisation. Dépôts divers. Peintures et vernis. | |
| ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION OU DE MACHINES | |
| 20. Éléments d'assemblage et de fixation | 193 |
| Filetages. Visserie, boulonnerie et écrous. Rondelles. Lamages et chambrages. Goupilles. Circlips. Rivetage. Supports élastiques. | |
| 21. Soudage | 223 |
| Généralités. Représentations normalisées des soudures. Conception des assemblages soudés. Matériaux soudables. Principaux procédés de soudage. Indications sur le calcul des soudures. Exercices. | |
| 22. Systèmes de liaison arbres/moyeux | 245 |
| Goupilles. Clavettes. Cannelures. Dentelures et axes dentelés. Éléments d'assemblage biconiques. Frettage. Cônes. | |
| 23. Paliers lisses, coussinets, rotules | 253 |
| Coussinets. Palier lisse hydrodynamique. Rotules radiales. Rotules à contact oblique. | |
| 24. Roulements : étude générale | 261 |
| Généralités. Charges supportées. Différents types de roulements. Critères de choix. | |
| 25. Montages de roulements : règles usuelles | 271 |
| Remarques et suggestions. Choix des ajustements. Fixation latérale des bagues. Lubrification. Graissage. Étanchéité. | |
| 26. Notions sur le calcul des roulements | 291 |
| Fiabilité et durée de vie L_{10} . Capacité de charges C et C_0 . Relation entre L_{10} et C . Charge équivalente P . Calculs. Exemples. Extraits de dimensions normalisées. | |
| 27. Liaisons glissières. Guidages en translation | 313 |
| Liaisons glissières lisses. Liaisons avec éléments roulants : douilles et guides à billes, systèmes par rails et patins... Dispositifs de réglages. Lubrification et étanchéité. Vis à billes. | |
| 28. Liaisons élastiques. Ressorts | 323 |
| Classification. Matériaux. Ressorts de compression à spires. Associations de ressorts. Ressorts de traction à spires. Ressorts de torsion. Rondelles ressorts. | |
| 29. Engrenages : étude générale | 333 |
| Différentes familles. Engrenages droits à denture droite. Engrenages droit à denture hélicoïdale. Engrenages coniques. Engrenages à roue et vis sans fin. Qualité. Exercices. | |
| 30. Trains d'engrenages | 355 |
| Recommandations. Schématisations. Trains classiques. Trains épicycloïdaux. Exercices. | |
| 31. Engrenages : efforts sur les dentures | 365 |
| Efforts sur les différents types de dentures. Calcul de la résistance de la dent. Exercices. | |
| 32. Transmissions par courroies et chaînes | 373 |
| Comparaison engrenages, courroies et chaînes. Courroies plates. Courroies trapézoïdales. Courroies crantées. Roues et chaînes. | |
| 33. Accouplements. Embrayages. Freins | 391 |
| Généralités. Accouplements rigides et élastiques. Cardans et assimilés. Embrayages. Freins. Coupleurs. Convertisseurs. | |
| 34. Lubrification. Graissage. Tribologie | 407 |
| Généralités. Les quatre cas du frottement. Huiles et dispositifs de lubrification. Graisses et dispositifs de graissage. | |

| | |
|--|-----|
| 35. Joints d'étanchéité | 415 |
| Généralités. Matériaux pour joint. Joints toriques. Joints à quatre lobes. Joints à lèvres. Déflecteurs. Joints plats. | |
| MÉTHODES D'ANALYSE ET ORGANISATION D'ENTREPRISE | |
| 36. Notion de projet et de produit | 423 |
| Démarche scientifique et démarche de projet. Principales étapes d'un projet. Notion de produit. Graphes pour projet : Gantt, Pert. | |
| 37. Méthodes d'analyse et Cahier des charges fonctionnel | 429 |
| Fonctions d'un produit. Analyse fonctionnelle. Diagrammes pour analyse fonctionnelle. Analyse de la valeur. Méthode AMDEC. Cahier des charges fonctionnel (CdCF). | |
| 38. Notions sur la qualité | 443 |
| Composantes de la qualité. Principales non qualité. Qualité totale. Gestion de la qualité. Assurance qualité. Conditions de réussite. Méthode et outil : Pareto, Ishikawa, diagnostic, certification... | |
| 39. Fiabilité, maintenabilité, disponibilité, durabilité | 455 |
| Notion de fiabilité et indicateurs. Fiabilité de composants montés en série et en parallèle. Durée de vie et cycle d'un produit. Exercices. | |
| 40. Technologie et statistiques | 463 |
| Probabilités. Populations, échantillons et individus. Variable discrète et continue. Distributions. Moyenne arithmétique et écart-type. Loi normale. Distribution binomiale. Loi de poisson. Distribution exponentielle. Loi de Weibull. Combinaisons de distribution. Régressions linéaires. Statistiques et cotation fonctionnelle. Exercices. | |
| SYSTÈMES AUTOMATISÉS ET AUTOMATISME | |
| 41. Vérins, distributeurs et accessoires | 489 |
| Vérins. Régleurs de vitesse. Distributeurs. Distributeurs spécialisés. Principaux accessoires. | |
| 42. Systèmes automatisés logiques | 507 |
| Généralités. Algèbre de Boole. Tables de vérité. Équations logiques. Tableaux de Karnaugh. Opérateurs et portes logiques. Diagrammes logiques. Chronogrammes. Fonction mémoire. Temporisateurs. Exercices. | |
| 43. GRAFCET | 521 |
| Principaux éléments. Règles d'évolution. Structure générale. Étape d'attente. Sous-programme. Macroétape. Étapes de verrouillage et de synchronisation. Forçage et figeage. Structuration par encapsulation. Représentation des actions. Réceptivités particulières. | |
| 44. Asservissements. Régulation. Automatique | 531 |
| Définitions. Schémas blocs. Transformation de Laplace. Fonction de transfert. Algèbre des schémas blocs. Réponses des systèmes. Précision et écarts. Étude fréquentielle. Diagrammes de Bode, Nyquist et Black. Analyse et stabilité. Correction des systèmes. | |
| ÉCO-CONCEPTION | |
| 45. Éco-conception : normalisation, Processus, Méthodologie | 567 |
| Définitions. Fondamentaux. Cycle de vie. Étiquetage environnemental. Méthodologie d'éco-conception NF E 01-005. Gaz à effet de serre. Réchauffement climatique. Données environnementales. Annexes. Réglementation. | |
| NORMALISATION – SYMBOLES NORMALISÉS POUR SCHÉMAS | 603 |
| Normes et matrice GPS. Schémas électriques (603). Schémas hydrauliques et pneumatiques (606). Symboles pour systèmes et liaisons mécaniques (608). Représentations simplifiées ; roulements, joints (610), cannelures, vis, inserts, assemblages, tuyauteries (611). Schémas synoptiques pour systèmes (614). Symboles pour organigrammes (617). Unités (618). Normes françaises (620). | |
| Index | 621 |

Je tiens à remercier mes collègues, les professeurs Louis Martine, Thérèse Legrand et Jean-Paul Varaire pour leur précieux concours dans la mise au point de ce livre et leur relecture.
Je remercie également mon épouse Ingrid sans laquelle ce livre n'aurait pas été possible.

1

DESSINS TECHNIQUES : GÉNÉRALITÉS

OBJECTIFS

- Décrire les principales familles de dessins techniques.
- Préciser les échelles et les formats utilisés ainsi que les divers éléments indispensables aux indications : cartouche, nomenclature, types de traits, écritures...
- Indiquer le matériel de base du dessin industriel manuel et les principales techniques de tracé.

Le dessin industriel ou technique, manuel ou assisté (DAO, CAO, etc.), est l'outil graphique le plus utilisé par les techniciens et les ingénieurs pour passer de l'idée (l'étude) à la réalisation (fabrication) d'un objet ou produit. C'est un langage universel, rigoureux, dont les règles précises sont normalisées internationalement (ISO : *International Standard Organisation*).

La vision dans l'espace, c'est-à-dire la capacité à voir ou à imaginer un objet à trois dimensions dans l'espace, est une formidable aide à la création pour l'esprit et le cerveau humain. Cette qualité fondamentale n'est pas un don du ciel, elle doit être travaillée, développée et cultivée par des exercices graphiques répétés et suffisamment nombreux. L'apprentissage du dessin industriel permet d'acquérir cette vision. Terminologie : NF EN ISO 10209

I - Principaux types de dessins techniques

Les dessins techniques ou industriels se divisent en plusieurs familles complémentaires.

Les schémas : ils sont tracés à partir de familles de symboles normalisés. Chaque symbole représente ou schématise un organe ou un composant particulier. Ils permettent de représenter, de manière simplifiée et condensée, des installations ou des systèmes techniques plus ou moins complexes.

Exemples : schémas électriques, électroniques, hydrauliques.

Les dessins d'ensemble : ils permettent la représentation non schématique, plus ou moins détaillée, à une certaine échelle, d'installations, d'immeubles, de machines, de systèmes techniques variés constitués de divers éléments de base (composants, pièces par exemple).

Les dessins de définition : complémentaires des précédents, ils définissent complètement et totalement chacun des éléments de base d'un produit et les exigences auxquelles il doit satisfaire. Ils servent souvent à établir des contrats entre concepteurs et réalisateurs (cahier des charges).

Les dessins de détail d'exécution : généralement obtenus à partir des dessins de définition, ils donnent les indications nécessaires à la réalisation d'un produit ou de l'un de ses éléments de base.

Exemples : dessin de fabrication, d'opération, d'implantation.

Les dessins d'avant-projet, ou de conception, et les dessins de projet : ce sont des dessins d'ensemble. Les premiers permettent de proposer et d'élaborer des solutions possibles au moment de la conception d'un produit. Les seconds servent à décrire et préciser tous les détails de la solution finalement choisie pour réaliser le produit.

II - Échelles

Lorsque les objets sont grands (immeubles, bateaux, automobiles) ou petits (montres, circuits électroniques, par exemple) il est nécessaire de faire des réductions ou des agrandissements pour les représenter.

L'échelle 1 (ou 1 : 1) présente l'avantage de visualiser l'objet à définir en vraie grandeur, sans réduction et sans agrandissement. Les échelles 1 : 2 et 2 : 1 peuvent apporter des impressions trompeuses en conception.

| Échelles usuelles – NF EN ISO 5455 | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------------|
| en vraie grandeur | 1 : 1 | | | | | | | | |
| en réduction | 1 : 2 | 1 : 5 | 1 : 10 | 1 : 20 | 1 : 50 | 1 : 100 | 1 : 200 | 1 : 500 | 1 : 1000 ... |
| en agrandissement | 2 : 1 | 5 : 1 | 10 : 1 | 20 : 1 | 50 : 1 | 100 : 1 | 200 : 1 | 500 : 1 | 1000 : 1 ... |

III - Formats normalisés

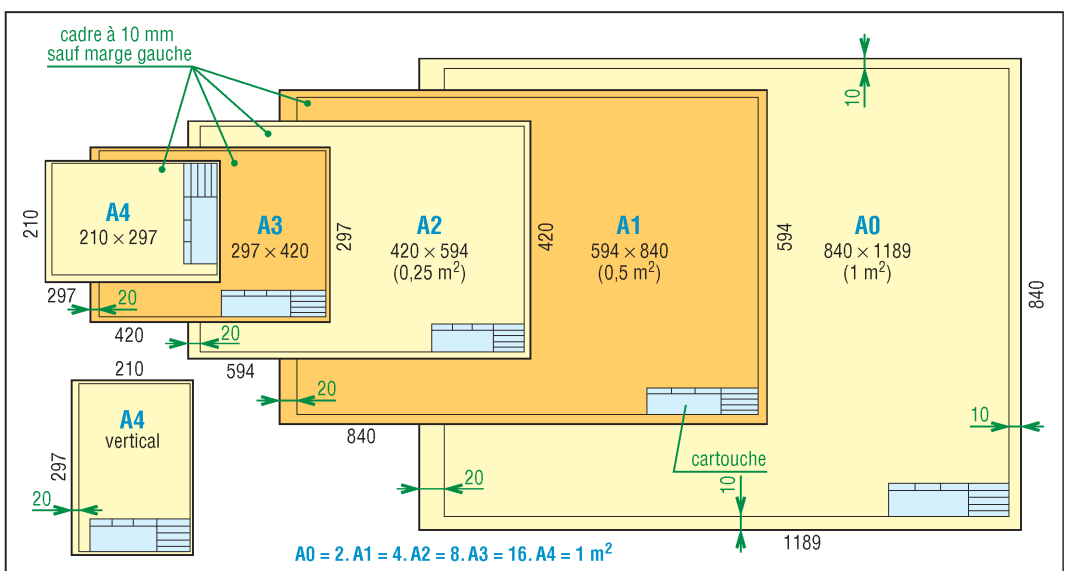
La série A (A0, A1, A2, A3, A4), normalisée ISO, est universellement utilisée.

Les formats A3 à A0 doivent être utilisés horizontalement et le format A4 verticalement (ISO 5457), cartouche en bas à droite, marge gauche à 20 mm, autres marges à 10 mm.

Le format A4 (210 × 297 mm) correspond à la taille d'une feuille de papier standard type courrier.

Le format A3 (420 × 297) se déduit du A4 en multipliant la plus petite dimension par deux (210 × 2 = 420). De même le A2 (594 × 420) s'obtient en multipliant la plus petite dimension du A3 par 2 (297 × 2 = 594) et ainsi de suite pour les autres formats.

Pour chaque format le rapport longueur sur largeur est égal à $\sqrt{2}$ ($\approx 1,414$).

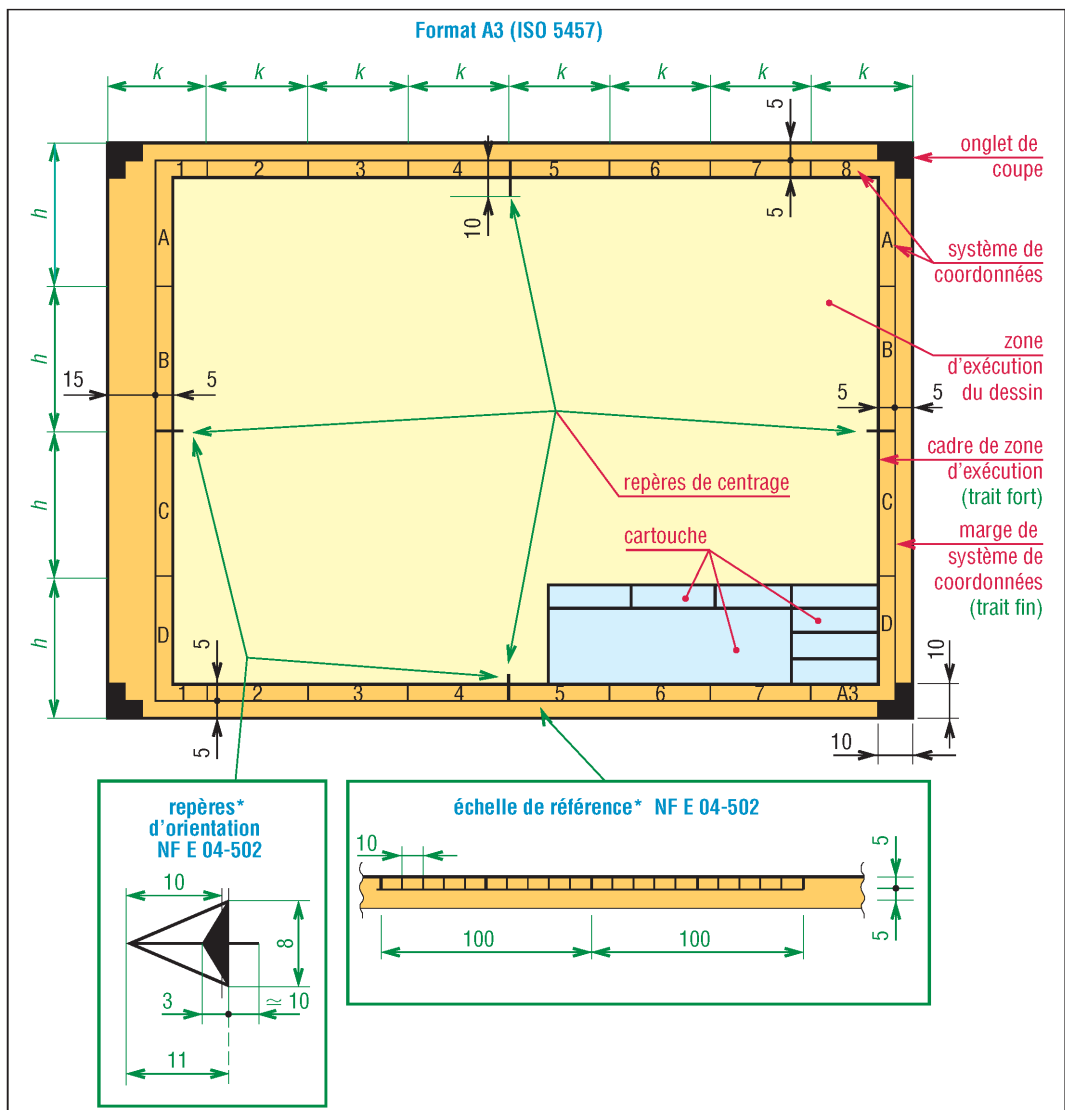


1. Principaux formats normalisés, position des cartouches, marges et cadres.

| Formats normalisés A (ISO 5457) | | | | | |
|---------------------------------|---------------|--------------|---------------------------------|--------------------------------|------------|
| désignation | longueur (mm) | largeur (mm) | zone d'exécution (entre marges) | nombre de coordonnées (fig. 2) | |
| | | | | côté long | côté court |
| A0 | 1 189 | 840 | 821 × 1 159 | 24 | 16 |
| A1 | 840 | 594 | 574 × 811 | 16 | 12 |
| A2 | 594 | 420 | 400 × 564 | 12 | 8 |
| A3 | 420 | 297 | 277 × 390 | 8 | 6 |
| A4 | 297 | 210 | 180 × 277 | 6 | 4 |

IV - Éléments graphiques permanents (NF EN ISO 5457)

Les éléments graphiques permanents permettent de cadrer le dessin, repérer certains détails, manipuler, plier et couper les formats.



2. Éléments graphiques permanents. * éléments non retenus par l'ISO 5457

- a) Le cadre** : il délimite la zone d'exécution du dessin. Dessiné en trait continu fort, il fait apparaître une marge sur tout le contour et délimite la zone d'exécution du dessin .
- b) Les repères** : ils sont situés dans la marge entre le cadre et le bord du dessin.
 - Les repères de centrage : au nombre de quatre, ils indiquent les axes de symétrie du format et sont généralement matérialisés par un trait continu fort (forme libre de choix).
 - Les repères d'orientation : au nombre de deux sur les supports pré-imprimés, ils se superposent aux repères de centrage. Une fois le dessin terminé il ne doit rester qu'un seul repère, celui orienté vers le dessinateur ou le lecteur. Ils ne sont pas retenus par l'ISO 5457.
- c) Le système de coordonnées** : à partir de lettres (A,B,C...), de haut en bas, et de chiffres (1,2,3...), de gauche à droite, il permet de localiser les différentes parties de la zone dessinée. Le nombre de coordonnées, fonction du format, divisible par 2, est indiqué page 7. Hauteur des caractères : 3,5 mm.
- d) La graduation centimétrique de référence** : non chiffrée (longueur minimale 200 mm, largeur maximale 5 mm), elle peut figurer dans la marge près du cadre (non retenue par ISO 5457).
- e) Les onglets de coupe** : placés aux quatre coins du dessin, ils facilitent la découpe des reproductions au format voulu et sont matérialisés par deux rectangles 10 × 5 se chevauchant.

V - Cartouche

Le cartouche est la carte d'identité du dessin ou document. Son emplacement dans le format est indiqué figure 1 ; le sens de lecture du dessin est celui du cartouche. Plus complet en gestion numérisée, il rassemble les renseignements essentiels : données d'identification (propriétaire, numéro d'identification, indice de révision, date d'édition, numéro partie, langue...), titre et données administratives (auteur, département, référence technique, visé par ; type, stade et format du document...).

département responsable (20 mm) | référence technique (contact...) | auteur | visé par | stade du document : en préparation, en approbation, publié ou retiré. | zone libre pour indication complémentaire : indice classement, format... (10 mm)

cadre | 180 mm

3 ou 4 lignes au choix

marge gauche

propriétaire (entreprise, société...) | type de document | titre | titre complémentaire | numéro d'identification | indice de révision | date d'édition | langue | partie

Remarques : en gestion numérisée, échelle, symbole de disposition des vues et exigences liées aux tolérances et à l'état de surface sont souvent présentés en dehors du cartouche.

Exemple de cartouche utilisé en gestion non numérisée (d'après NF E 04-503) :

| | | | | |
|---------------------------------|-------------|---|----|--------------------|
| échelle | ECHELLE 1:5 | FUSELAGE AVANT S.N.A. 13, rue de Salouël - SAINT ETIENNE | 04 | indice de révision |
| symbole de disposition des vues | | | 03 | |
| format | A0 | 2003-789-122 | 01 | numéro |
| | | | 00 | |

3. Exemple de cartouche utilisé en gestion numérisée suivant recommandations NF EN ISO 7200.

VI - Nomenclature

Liée à un dessin d'ensemble elle dresse la liste complète de tous les éléments constitutifs (par exemple, pièces, composants) du système dessiné. Chaque élément est répertorié, numéroté, classé et tous les renseignements nécessaires le concernant sont indiqués.

10

10

10

↑

NF EN ISO 6433

Reperage des éléments :
représentations variantes

Exemple de nomenclature

| | | | | |
|-------------------------|--------------|---------------|-------|-----------|
| 12 | 12 | Écrou H, M8 | inox. | |
| 11 | 1 | Écrou | inox. | |
| 10 | 1 | Bague | PTFE | |
| 9 | 3 | Étoupe | | composite |
| 8 | 1 | Presse étoupe | inox. | |
| 7 | 2 | Joint torique | NBR | 120 x 2,6 |
| 6 | 6 | Tirant | inox. | |
| 5 | 2 | Siège | PTFE | "téflon" |
| 4 | 1 | Axe | inox. | |
| 3 | 1 | Sphère | inox. | |
| 2 | 2 | Bride | inox. | |
| 1 | 1 | Corps | inox. | |
| Rep. | Nb | Désignation | Mat. | Obs. |
| ÉCHELLE 1:2 | | | | 04 |
| Vanne à boisseau | | | | 03 |
| | | | | 02 |
| | | | | 01 |
| | | | | 00 |
| A3 | 2004-789-122 | | | |

Nomenclatures sur A4

Nomenclatures sur A3

Extensions de nomenclature

4. Exemples de disposition de nomenclatures.

La présentation proposée, en cinq colonnes, est classique. La première colonne reprend les repères, ou chiffres, indiqués sur le dessin d'ensemble par ordre croissant de bas en haut. Chaque pièce ou élément dessiné doit avoir un repère, sauf dans le cas des pièces identiques. La seconde colonne indique le nombre de pièces identiques. Les autres colonnes précisent dans l'ordre : le nom ou la désignation normalisée de l'élément repéré ; la matière (matériau utilisé) ; au besoin des observations ou renseignements complémentaires utiles.

Remarques : la CAO/DAO offre des possibilités de nomenclaturage automatique avec présentation personnalisée. L'ISO 7573 propose une variante avec repère ; nombre ; référence pièce ; nom pièce ; désignation pièce ; observations – 6 colonnes.

VII - Principaux traits

Le dessin industriel utilise de nombreux traits différents. Chaque trait a sa nature (continu, interrompu, mixte), une épaisseur (fort, fin) et est destiné à un usage donné ; **exemple, cas de la norme NF EN ISO 128-20, figure 5**. Les dispositifs CAO/DAO en propose une grande variété. Largeurs recommandées (ISO) : 0,13 ; 0,18 ; 0,25 ; 0,35 ; 0,5 ; 0,7 ; 1 ; 1,4 ; 2.

arêtes fictives :
 – aident à la compréhension des formes
 – ne se dessine pas en vue cachée

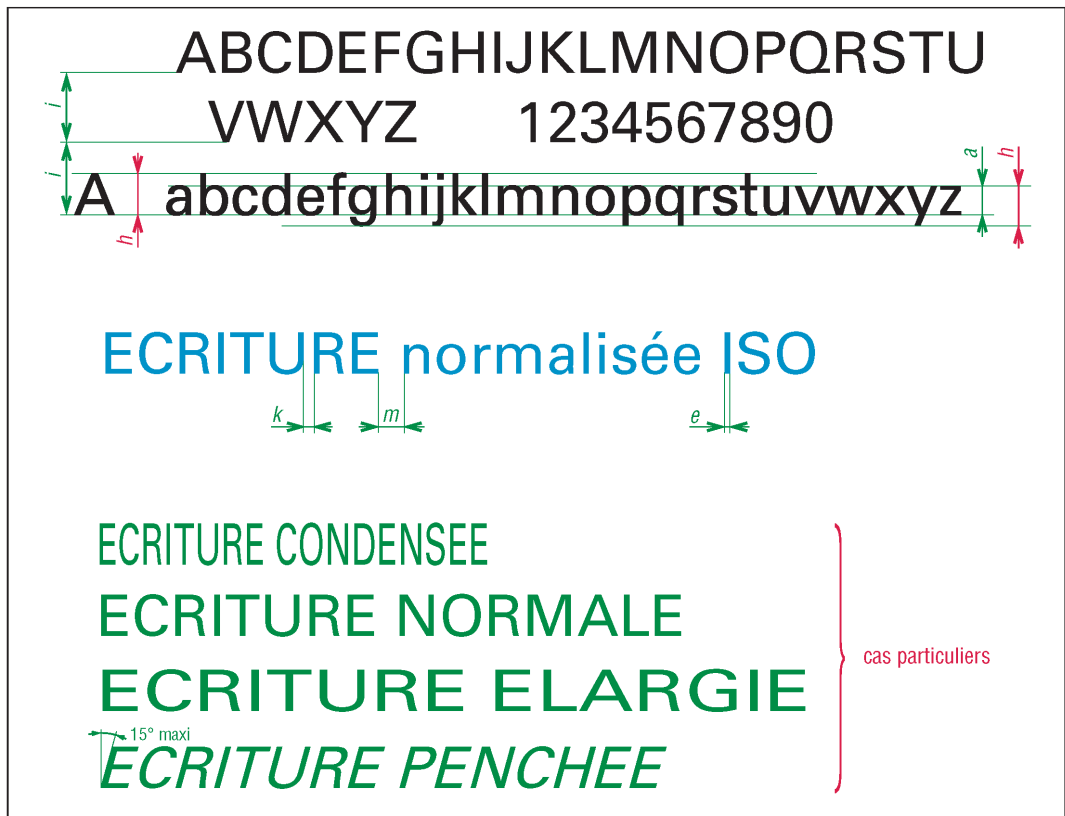
| | types de traits | principaux usages | épaisseurs (en mm) | |
|---|--|---|--------------------|--------|
| | | | encre | crayon |
| 1 | continu fort ————— | arêtes vives et contours vus | 0,5 à 0,7 | 0,5 |
| 2 | interrompu fin - - - - - ≈ 1 2 à 3 | arêtes et contours cachés | 0,25 à 0,35 | 0,2 |
| 3 | mixte fin — · — · — 1 2 10 à 20 | axes, plans de symétrie, lignes primitives, trajectoires | 0,18 à 0,35 | 0,2 |
| 4 | continu fin ————— | hachures, lignes de cotes et d'attache, lignes de repère, filets, arêtes fictives vues, axes courts | 0,18 à 0,35 | 0,2 |
| 5 | continu fin main levée en zigzag ~~~~~ 〰️ | limites de vues et de vues interrompues ; coupes partielles | 0,18 à 0,35 | 0,2 |
| 6 | mixte fort - - - - - | traitements de surface... | 0,7 | 0,5 |
| 7 | mixte fin à 2 tirets - - - - - | contours de pièce voisine ; 1/2 rabattement ; pièces mobiles... | 0,18 à 0,35 | 0,2 |

5. Principaux types de traits normalisés. Arêtes fictives (épaisseur trait fort ≥ 2 × épaisseur trait fin). NF EN ISO 128-20 et 24.

VIII - Écritures

- On doit utiliser en priorité des écritures normalisées. La norme NF EN ISO 3098-0 retient les types A et B de la norme ISO (l'ancienne norme NF E 04-505 ne retenait que le type B et pas $h = 1,8$). Les types A et B ont même hauteur h . A est plus fin que le B.
- Il faut préférer une écriture droite à une écriture penchée. La norme tolère une écriture penchée de 15° maximum vers la droite. En dessin manuel, les écritures sont le plus souvent réalisées avec des trace-lettres ; les systèmes par lettres transferts sont également utilisés.
- Les dispositifs CAO/DAO offrent une grande variété de caractères, permettent des écritures condensées, élargies, penchées, proposent des facilités pour centrer, aligner les textes...

| Écriture ISO type B (NF EN ISO 3098-0) : principales dimensions (en mm) | | | | | | | | | |
|---|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|---------|-------------|---------|
| hauteur nominale | h | 1,8 | 2,5 | 3,5 | 5 | 7 | 10 | 14 | 20 |
| hauteur des minuscules | a | 1,26 | 1,75 | 2,5 | 3,5 | 5 | 7 | 10 | 14 |
| largeur du trait | e | 0,18 | 0,25 | 0,35 | 0,5 | 0,7 | 1 | 1,4 | 2 |
| interligne | i | 2,3 à 3,4 | 3,2 à 4,8 | 4,5 à 6,7 | 6,5 à 9,5 | 9,1 à 13,3 | 13 à 19 | 18,2 à 26,6 | 26 à 38 |
| espace entre mots | m | 1,08 | 1,5 | 2,1 | 3 | 4,2 | 6 | 8,4 | 12 |
| espace entre lettres | k | 0,36 | 0,5 | 0,7 | 1 | 1,4 | 2 | 2,8 | 4 |



6. Exemple d'écriture normalisée.

IX - Dessin industriel manuel

Le dessin industriel manuel, à main levée ou aux instruments, est facile à mettre en œuvre et nécessite peu d'équipements, cependant il exige un minimum de dextérité et de soin.

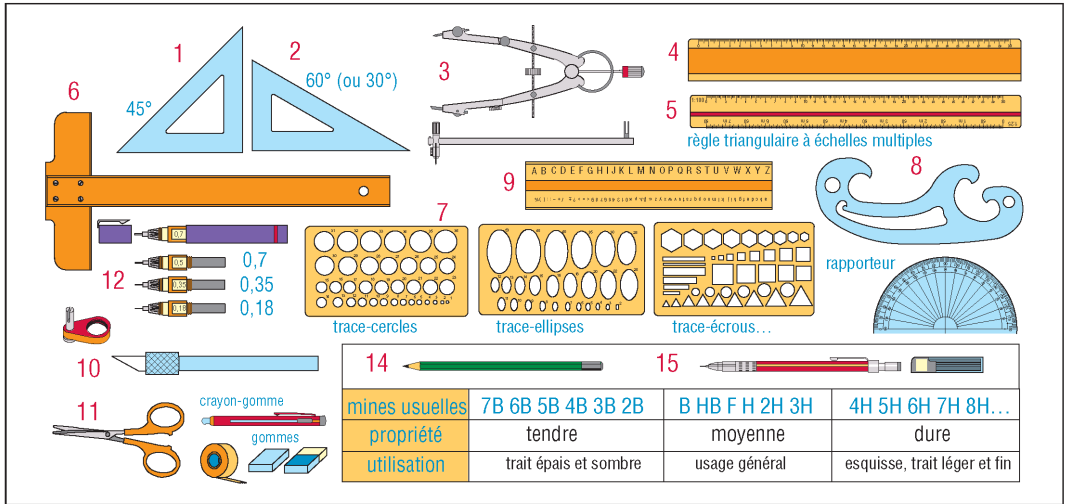
C'est un outil nécessaire au technicien et à l'ingénieur car dans certaines circonstances et suivant les applications (croquis, recherche de solutions...), il n'est pas toujours possible ni même avantageux d'utiliser un ordinateur graphique. De plus il fournit un savoir-faire supplémentaire augmentant les possibilités et la qualification des individus.

Sur le plan pédagogique il permet aux étudiants d'acquérir plus rapidement et plus facilement la connaissance des règles fondamentales normalisées du dessin industriel. En CAO/DAO à la maîtrise de ces règles s'ajoute celle du logiciel (double difficulté).

1. Matériel et équipement usuel

| Liste du matériel de base (voir fig. 7) | | |
|---|--------------------------|----------------------------------|
| 1 : équerre à 45° | 6 : té | 11 : ciseaux |
| 2 : équerre à 60° et 30° | 7 : trace-cercles, etc. | 12 : plumes à encre calibrées |
| 3 : grand compas avec rallonge | 8 : trace-courbes | 13 : adaptateur plume sur compas |
| 4 : règle graduée (300 mm) | 9 : trace-lettre | 14 : crayon |
| 5 : règle graduée à échelles multiples | 10 : cutter « grattoir » | 15 : porte-mine (0,5...) |

Remarque : la planche à dessiner, le té et les équerres sont avantageusement remplacés par un pantographe ou des règles guidées sur les tables à dessin évoluées.



7. Équipement typique du dessin industriel manuel.

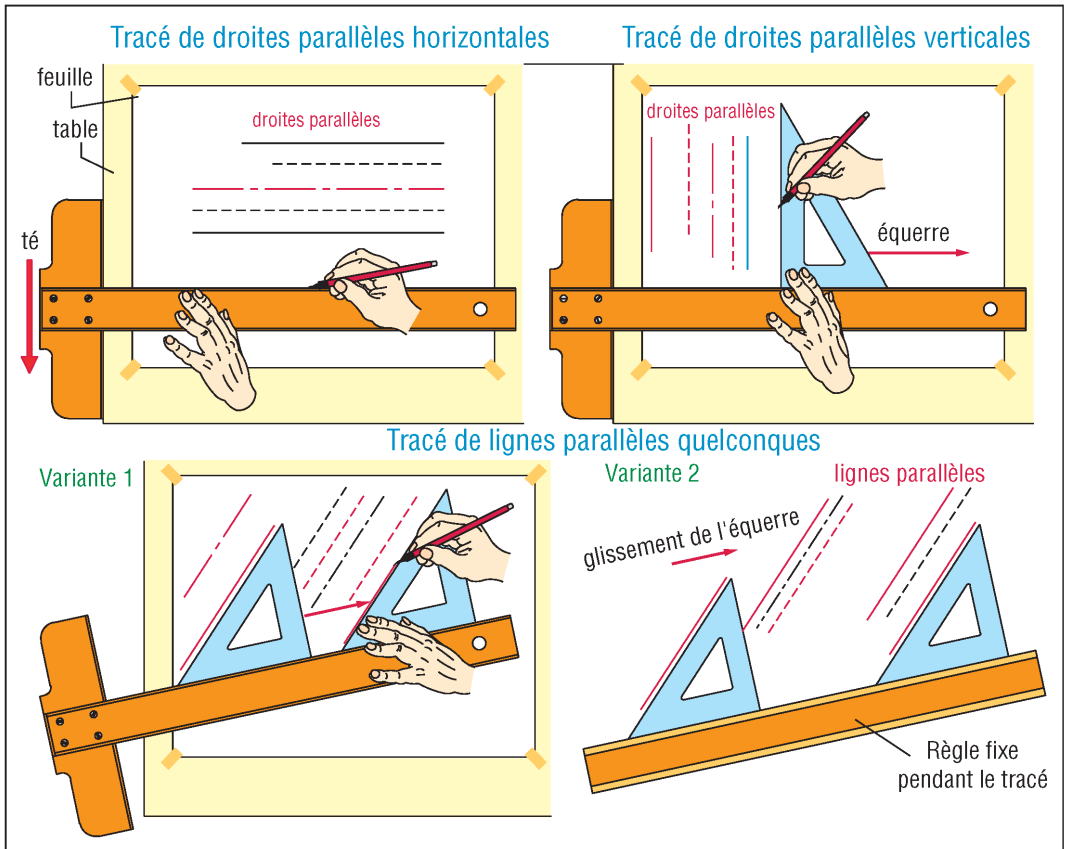
2. Principales techniques de tracés

Les dessins les plus complexes utilisent au départ les mêmes figures géométriques de base : points, lignes, arcs, cercles, ellipses, volumes usuels...

L'une des premières préoccupations du dessinateur consistera à tracer correctement toutes ces figures. Parmi les tracés les plus courants on trouve les lignes parallèles, les lignes perpendiculaires, les angles, les cercles, les arcs, les ellipses...

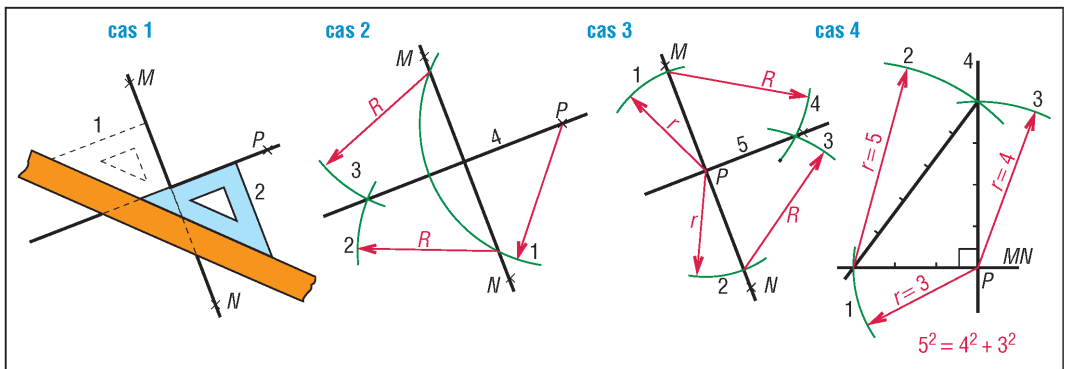
Les principales techniques utilisées pour effectuer ces tracés dans le cas du dessin manuel sont rassemblées et décrites aux pages suivantes.

a) Tracés des droites parallèles



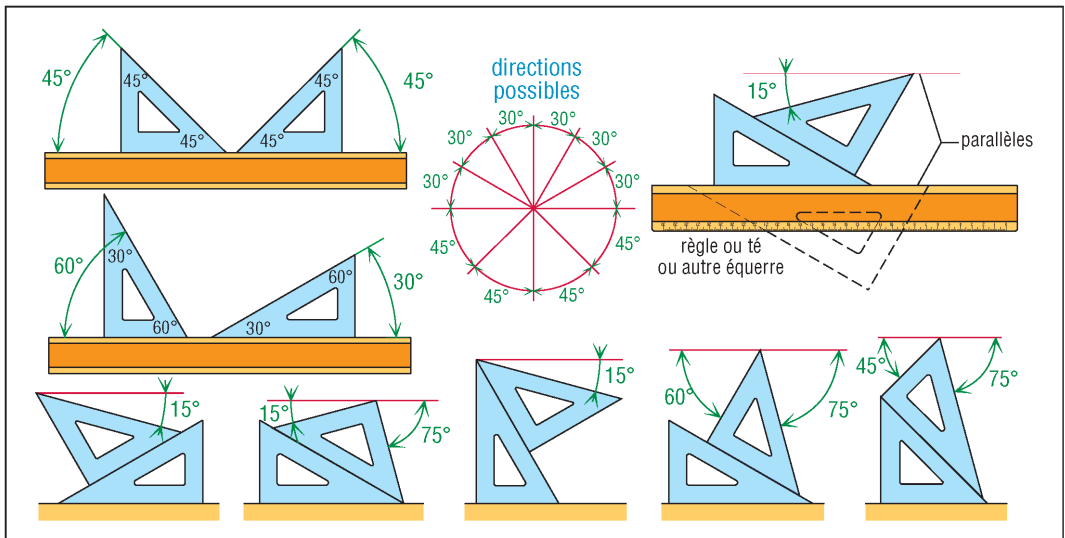
8. Tracés de parallèles avec té et équerres.

b) Tracés des perpendiculaires



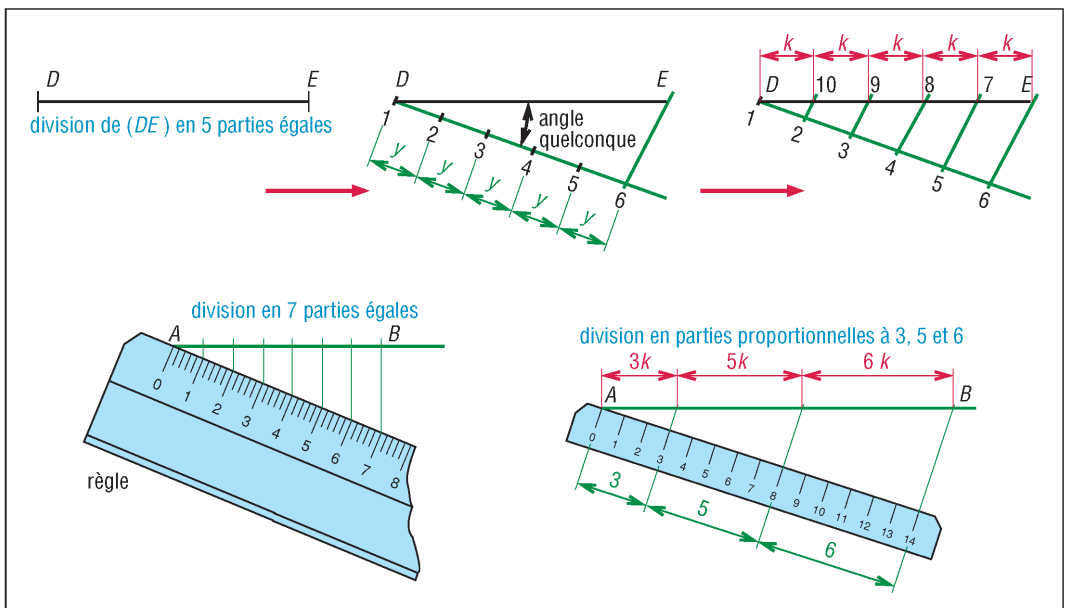
9. Tracé de la perpendiculaire à MN passant par le point P.

c) Combinaisons possibles avec les équerres



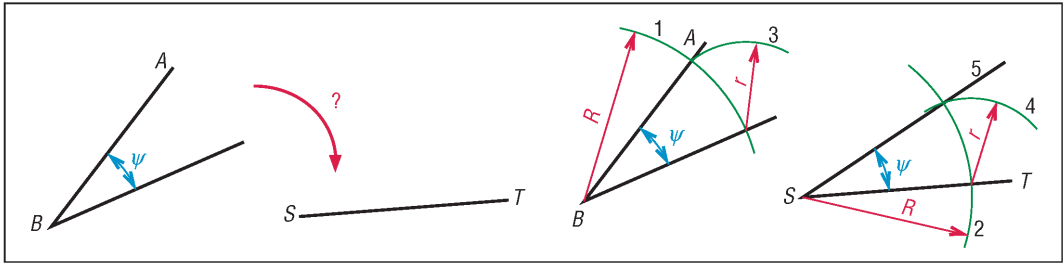
10. Exemples d'angles obtenus par combinaison des équerres à 45° et 60°.

d) Division d'un segment en parties égales



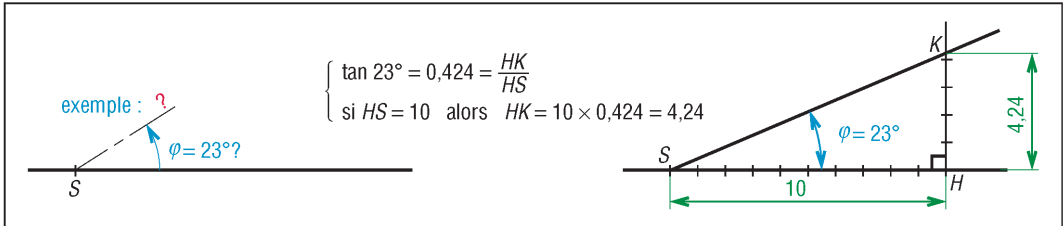
11. Exemples de division d'un segment.

e) Transfert d'un angle



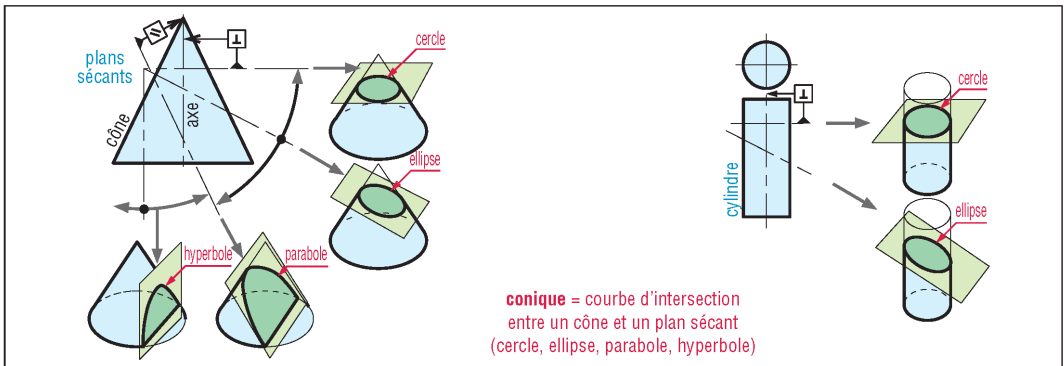
12. Construction de l'angle ψ à partir de la droite ST.

f) Tracé d'un angle quelconque sans rapporteur



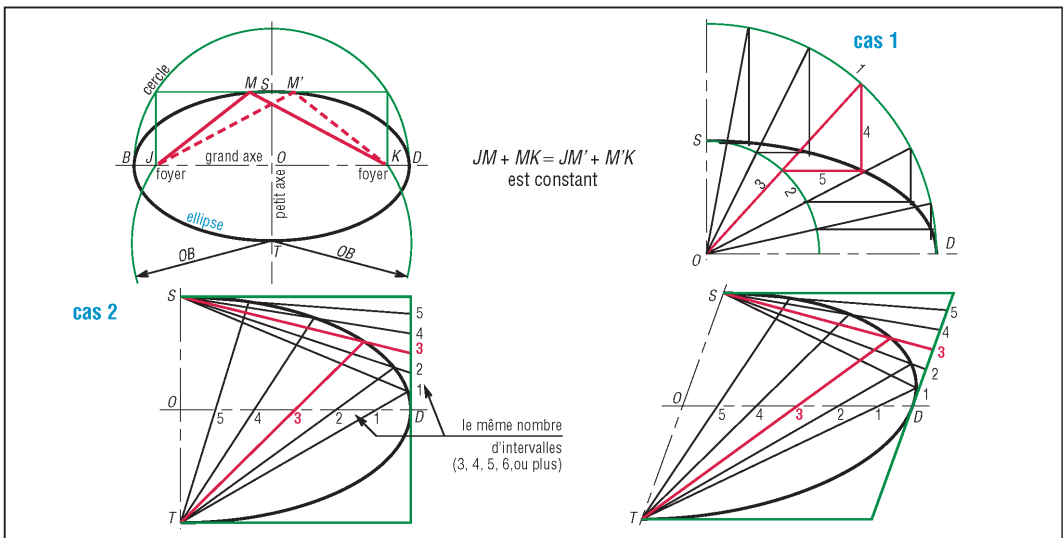
13. Tracé de l'angle $\phi = 23^\circ$ en utilisant les propriétés de la tangente.

g) Les coniques

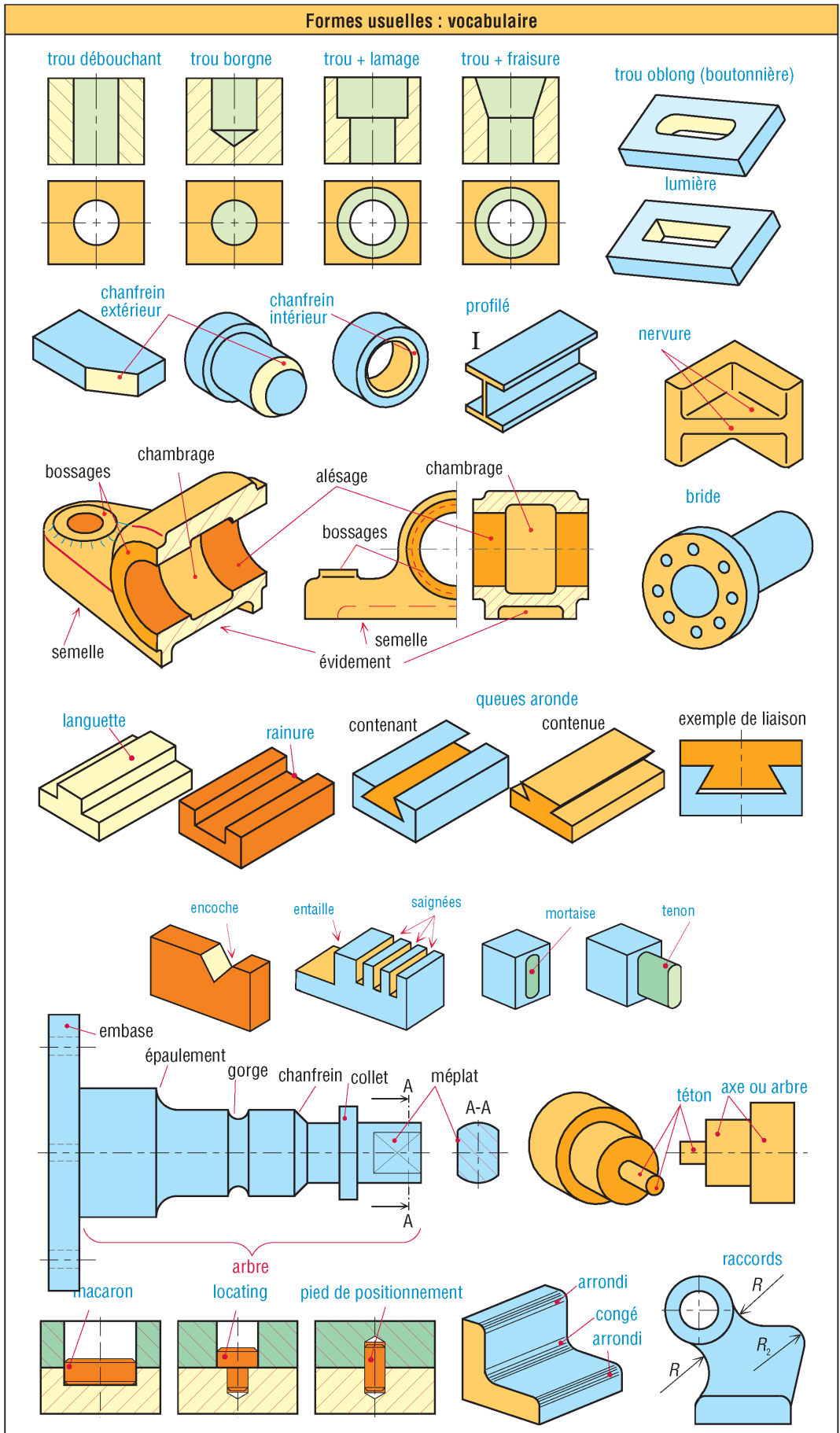


14. Définition des coniques.

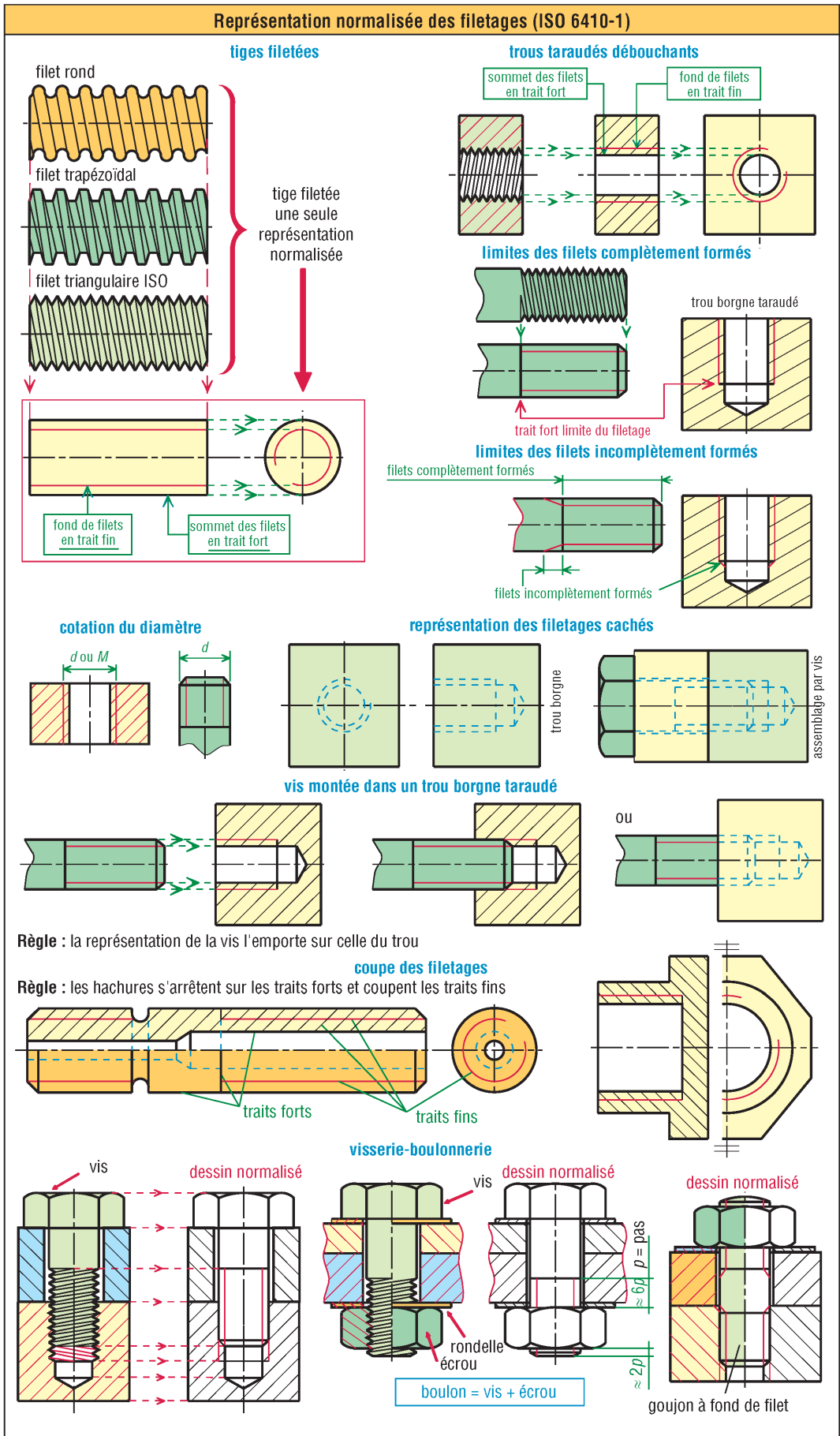
h) Tracé d'une ellipse



15. Exemples de tracé d'une ellipse.



* alésage = trou de grand diamètre.



Autres représentations p. 197. « Les fonds de filets en rouge sont normalisés en traits fins noirs ».

2

CAO/DAO LOGICIELS 2D

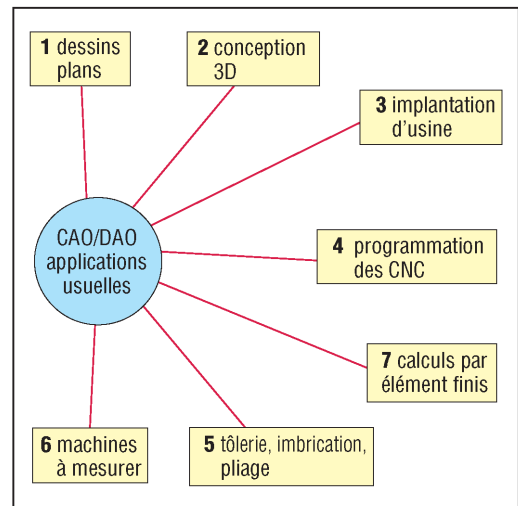
OBJECTIFS

- Indiquer les formats standards utilisés pour l'échange des fichiers informatiques.
- Décrire les configurations générales des logiciels.
- Préciser les familles de commandes et les commandes les plus universelles.

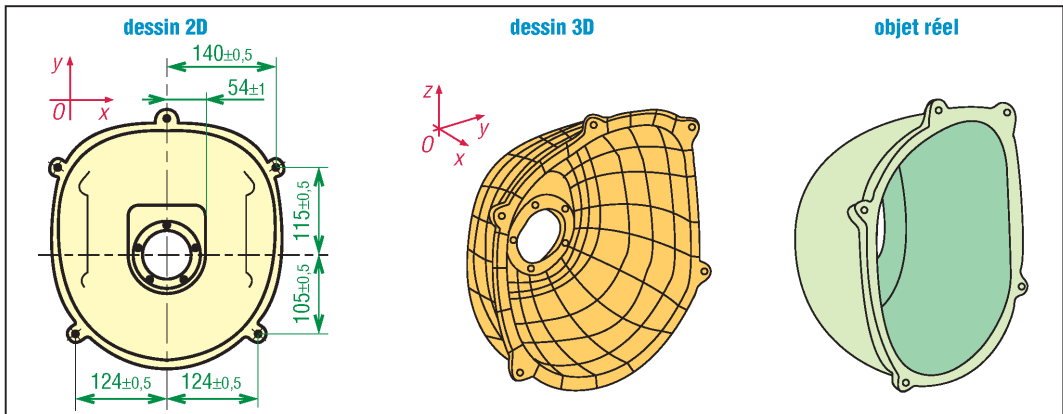
La CAO/DAO est au dessin et à la conception ce que le traitement de texte est à l'écriture. Il existe de nombreux logiciels, simples ou sophistiqués, économiques ou coûteux, spécialistes (CATIA...) ou généralistes (Autocad...). La plupart sont écrits à partir de langages évolués (Pascal, Fortran, Lisp...). Les dessins 2D sont numérisés en deux dimensions [x, y].

Exemples : dessin industriel classique en plusieurs vues, schémas d'électronique, d'hydraulique.

Les dessins 3D, numérisés en trois dimensions [x, y, z], exigent plus de mémoire et de capacité de calcul.



1. Logiciels CAO/DAO et applications.



2. Dessins 2D et 3D.

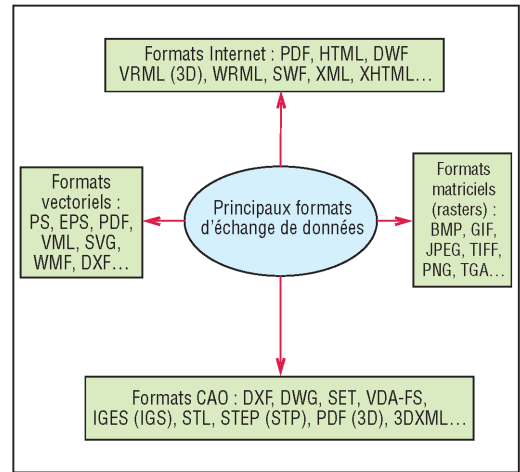
Variantes : 3D filaire, 3D surfacique et 3D volumique (voir chapitre 6 : CAO/DAO 3D).

La plupart des commandes décrites dans ce chapitre, bien que communes à de nombreux logiciels, ont pour référence AUTOCAD. Ce logiciel international, parmi les plus utilisés, polyvalent grâce à des modules ou extensions (industrie, architecture, jeux...) se décline en plusieurs versions y compris des versions pour smartphones...

I - Formats d'échange des données

L'une des difficultés de la CAO/DAO est l'échange des données entre systèmes. Il existe différents formats d'échange et la plupart des logiciels proposent plusieurs formats possibles pour écrire, exporter, charger ou importer des données.

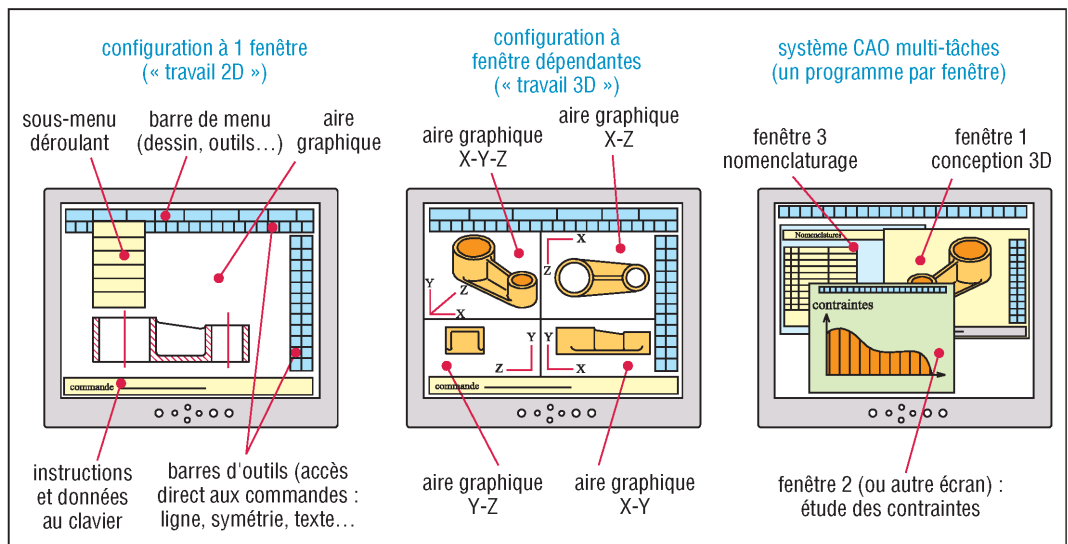
Remarques : les fichiers dessin d'Autocad ont tous « DWG » pour suffixe ; exemple : navette.DWG. Ces fichiers peuvent être convertis aux formats DXF, WMF, SAT... STEP est un format normalisé ISO 10303 ; IGES est à la norme ANSI....



3. Principaux formats d'échanges de données.

II - Configurations des logiciels

La plupart des logiciels travaillent à partir de menus de commandes accessibles par pointage (souris...) à l'écran. D'autres utilisent en complément, une tablette à digitaliser, des boîtiers de fonctions, sortes de « claviers », etc. Le menu principal (fig. 4 et 5), affiché en permanence, généralement en haut de l'écran, donne accès à divers commandes essentielles (copier, coller, annuler...) et à des sous-menus contenant des commandes de base (zoom, aides...).



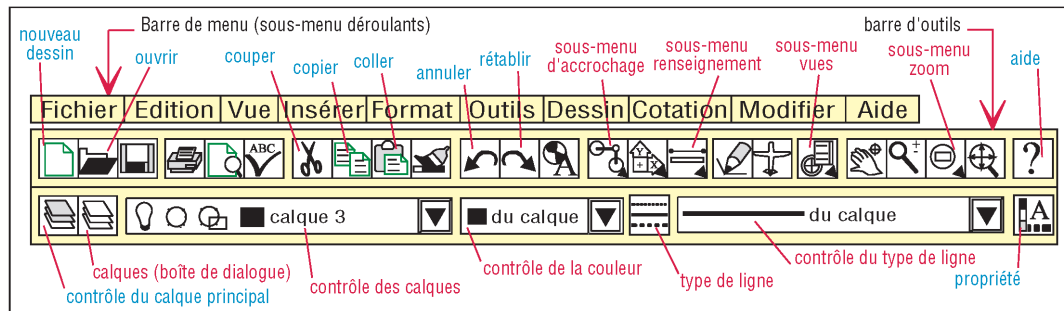
4. Exemple de configuration d'écran.

Un menu complémentaire (fig. 4 et 6), situé à gauche et/ou à droite de l'écran, personnalisable par l'opérateur, rassemble les commandes usuelles et les barres de commande amovibles (cotation...) momentanément utilisées. Une troisième zone, souvent au bas de l'écran, permet de visualiser les commandes particulières et les données numériques introduites au clavier.

Remarque : la présentation, le nombre des menus et sous-menus varie d'un logiciel à l'autre. De même, un même logiciel varie avec le système d'exploitation choisi (Windows...).

1. Forme des menus écran

Les formes utilisées sont celles observées dans les autres logiciels (TT...).



5. Exemple de menu principal.

a) Menu de lignes d'instructions ou barres de cases

Les commandes peuvent être écrites ligne par ligne ou présentées sous forme de barre d'outils amovible ou non, chaque instruction étant symbolisée par un dessin différent (fig. 6).

b) Menu déroulant

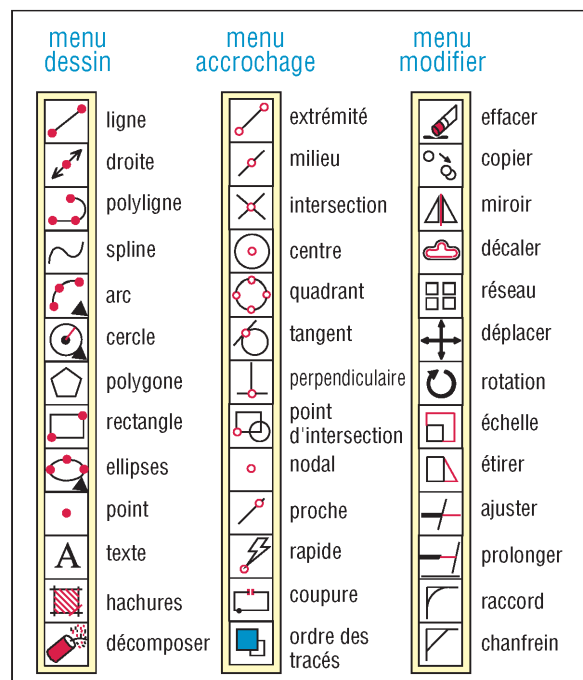
Sous forme de lignes d'instructions, il recouvre la zone graphique dès qu'on l'appelle et disparaît sans laisser de traces, dès qu'un choix est réalisé. Il faut souvent faire apparaître plusieurs menus déroulants en cascade avant d'obtenir une commande désirée.

c) Menu icône (fig. 7 et 8)

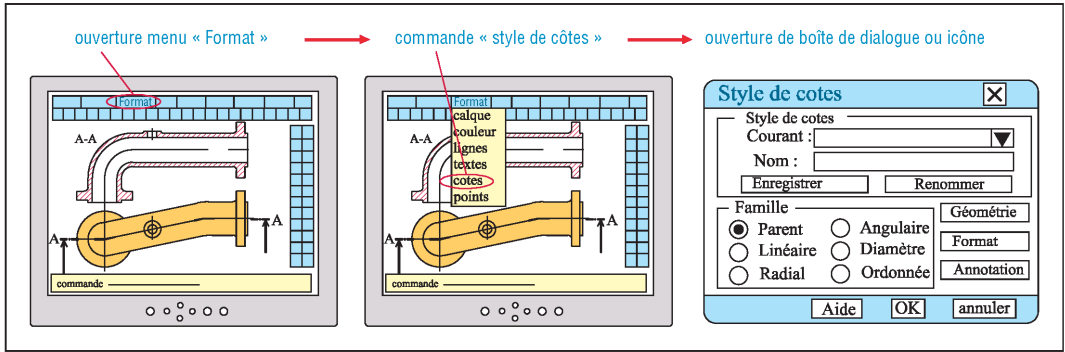
Sorte de tableau visualisant les options possibles (motifs...) d'une même commande (hachure...), la sélection s'obtient par pointage de l'option choisie.

d) Case de dialogue (fig. 7 et 8)

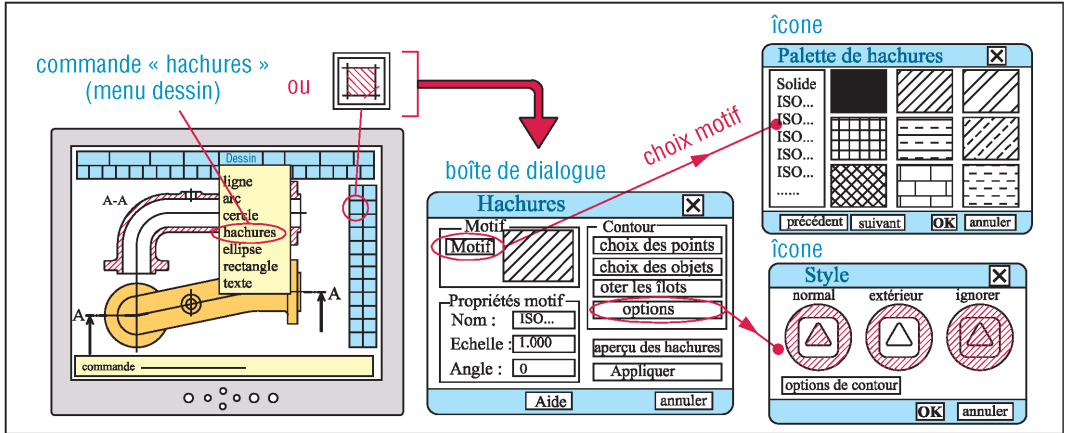
Sorte de tableau dont les cases contiennent les paramètres (couleur, nom...) d'une même commande (calque...), chacun pouvant être modifié par pointage ou réécriture au clavier.



6. Exemple de menu complémentaire.



7. Exemple de navigation par menu déroulant, boîte de dialogue et icône.



8. Principes de travail par boîtes de dialogue et icône.

2. Composition du menu principal, sous-menus typiques en 2D

La composition (fig. 5 et 9) varie sensiblement d'un logiciel à l'autre ; cependant on retrouve souvent les mêmes familles de commandes sous des noms parfois différents.

Certaines commandes, avec nombreuses options peuvent faire l'objet de sous-menus particuliers : cotation, calque (plan), zoom, type de lignes, de vues...

Remarque : le sous-menu Fichier regroupe les commandes permettant de gérer les fichiers et le fonctionnement général : arrêt, fin, sortie, copies de fichiers, sauvegardes, copies sur traceur, sur imprimante. Les autres sous-menus sont décrits dans les chapitres suivants.

| Composition typique de la barre des menus du menu principal | | | | | | | |
|---|----------|------------|------------|----------------|----------------|-----------|------------|
| Fichier | Édition | Affichage | Insérer | Format | Outils | Dessin | Modifier |
| nouveau | annuler | redessiner | bloc | calque | orthographe | ligne | effacer |
| ouvrir | rétablir | régénérer | image | couleur | renseignements | polyligne | copier |
| enregistrer | couper | zoom | solide SAT | type ligne | base données | spline | miroir |
| exporter | copier | pan | format DXB | style texte | accrochages | rectangle | décaler |
| imprimer | coller | | format WMF | style cotes | aides | polygone | réseau |
| utilitaires | effacer | | format | style... | tablette | arc | déplacer |
| envoyer | ... | | ... | unités | préférences | cercle | rotation |
| quitter | | | | limites dessin | ... | anneau | étirer |
| ... | | | | renommer | | ellipse | ajuster |
| | | | | | | point | prolonger |
| | | | | | | hachures | chanfrein |
| | | | | | | texte | raccord |
| | | | | | | bloc | décomposer |
| | | | | | | cotation | ... |
| | | | | | | ... | |

9. Exemple de composition typique (simplifiée) de la barre de menus.

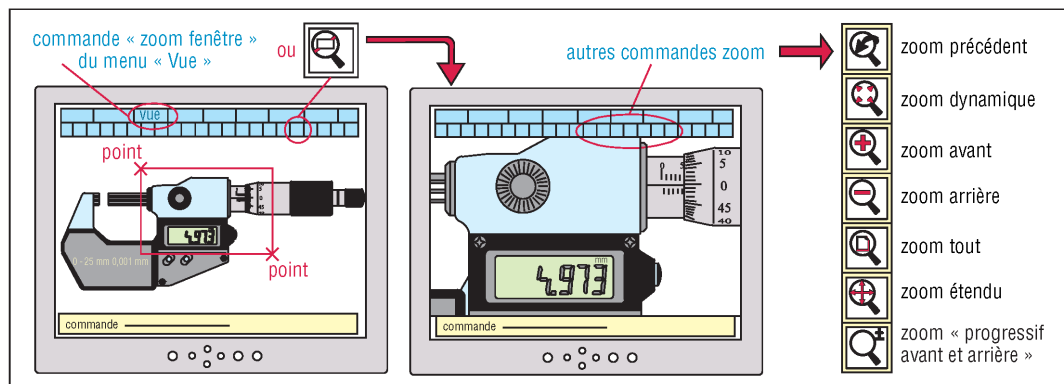
III - Sous-menu Vue et sous-menu Calque

Les commandes du sous-menu « Format » permettent de gérer la forme, le style, la couleur et autres propriétés des calques, lignes, textes, cotes, etc.

1. Commandes d'affichage

Ces commandes sont utilisées pour gérer l'écran et ce que désire observer l'utilisateur. Elles n'ont aucune influence sur les tracés et leur définition en mémoire.

Zoom : permet de choisir (agrandissement, réduction) ou de modifier la partie visible du dessin à l'écran (plusieurs options possibles : zoom total, zoom fenêtre).

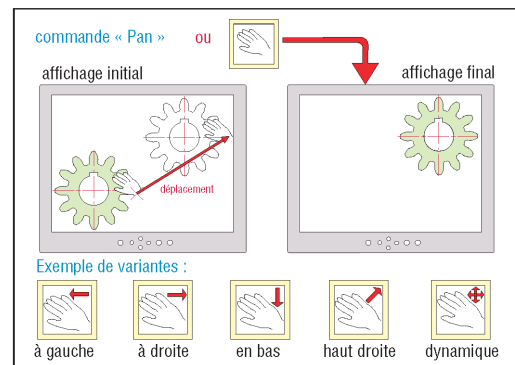


10. Principe de la commande Zoom et variantes.

Pan : déplace la vue à l'écran ou la fenêtre d'affichage sans réduire ni agrandir (analogie à une translation lors d'une prise de vue).

Redessiner : redessine la vue à l'écran en enlevant les points et les traces de travail ; il « met au net ou gomme les esquisses ».

Régénérer : recalcule et redessine l'ensemble de la vue à l'écran, ou la totalité du dessin, à partir des données en mémoire (fichier dessin).



11. Principe de la commande « pan » et variantes.

2. Commande Calque (Plan...)

a) Principe

La zone graphique, ou vue à l'écran, peut être assimilée à un empilage de plans comparables à des feuilles de papier calque superposées les unes sur les autres.

Par transparence, les dessins de tous les calques sont visibles en même temps et il est possible d'enlever une ou plusieurs feuilles de la pile pour faciliter la lecture ou la compréhension.

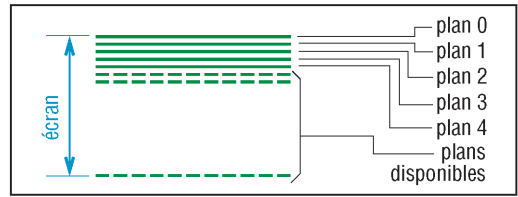
La commande Plan permet le même résultat en rendant invisible à l'écran (« en gelant »), un ou plusieurs plans de la pile. Si un plan redevient nécessaire il suffit de le rendre à nouveau visible. Si un plan est rendu inactif ou gelé, aucune manipulation d'entités n'est réalisable.

b) Définition des plans

Chaque plan est défini par un nom, une couleur et un type de ligne. Tous les tracés effectués dans un plan sont automatiquement réalisés à partir de la couleur et du type de lignes choisies, sauf indications particulières en cours de tracé ou modifications (modifier).

c) Plan de travail (plan courant...)

Parmi tous les plans actifs (visibles) existants, le plan de travail est celui choisi par l'utilisateur pour contenir les tracés en cours. À tout instant le plan de travail est unique ; c'est le seul qui peut recevoir les tracés obtenus à partir des commandes du sous-menu Dessin (voir fig. 15).



12. Principe de la commande Plan.

Propriétés des plans

| Nom | A | G | V | C | type de ligne |
|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| plan 0 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | continu |
| plan 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | continu |
| axes | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | axe |
| calque 2 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | interrompu |

Sélectionner types de ligne

| type de ligne | apparence |
|----------------|-----------|
| axe | --- |
| axex2 | --- |
| interrompu | --- |
| interrompux0.5 | --- |
| fantôme | --- |

Sélectionner la couleur

couleur standards

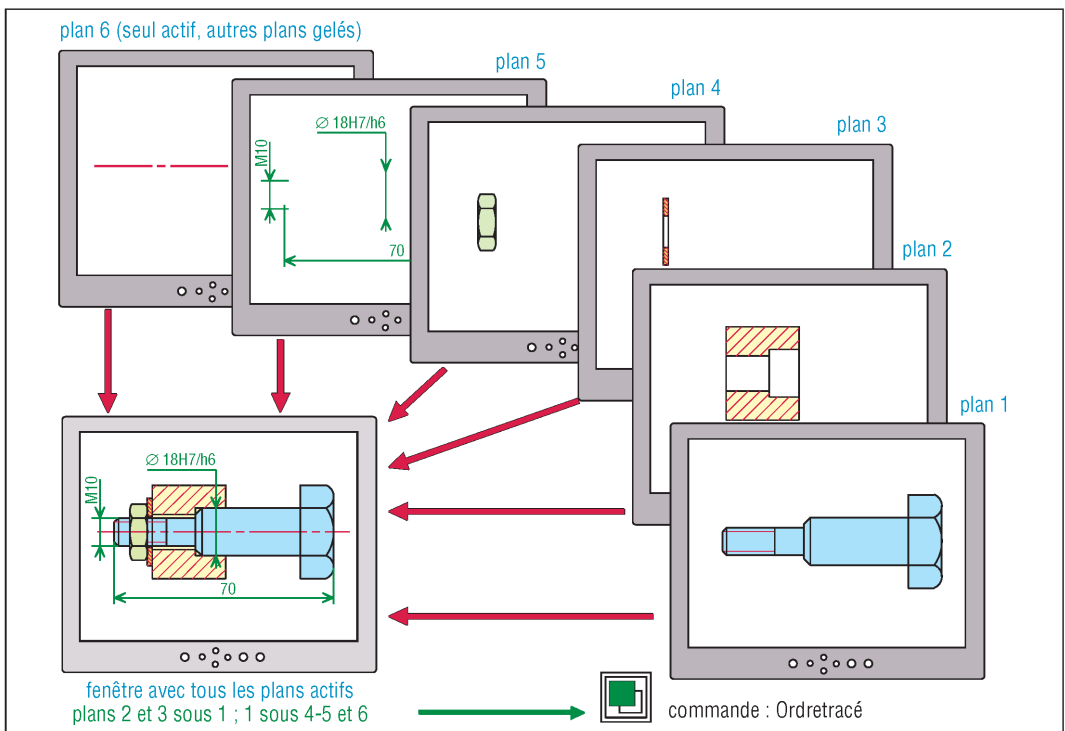
nuances de gris

couleur du calque bloc

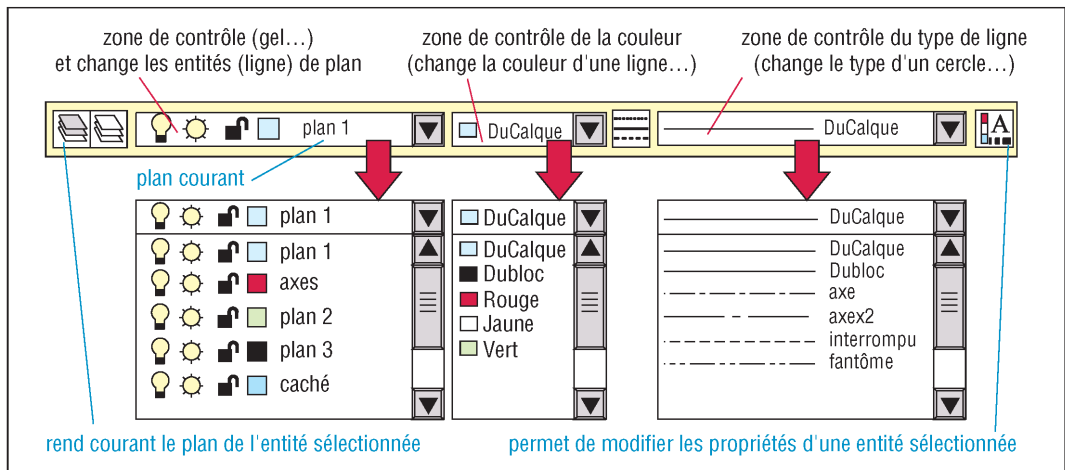
palette de couleurs

couleur bleu

13. Exemple d'utilisation de la commande Plan ou calque (nombreuses variantes possibles).



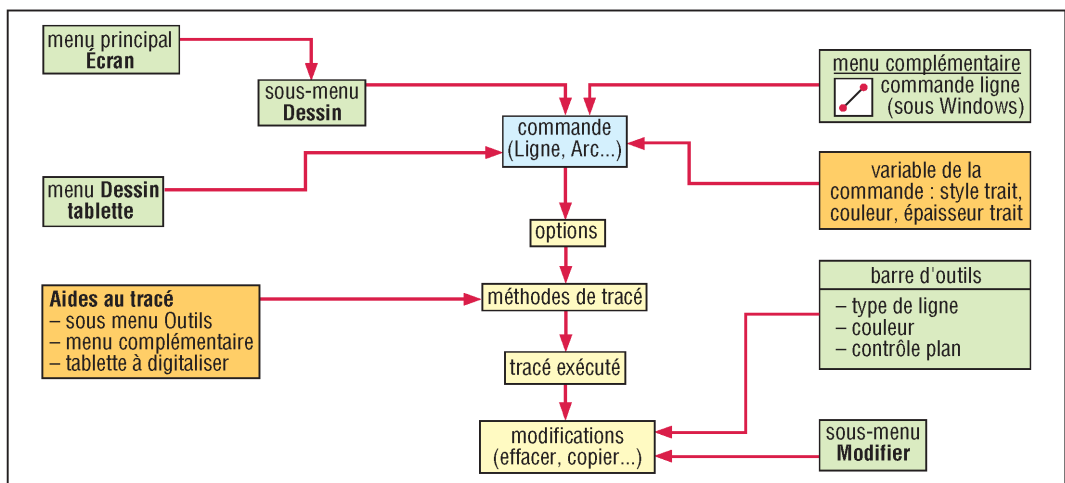
14. Exemple d'utilisation de la commande Plan ou Calque (nombreuses variantes possibles).



15. Exemples de commandes utilisées pour contrôler les plans et les paramètres d'entités sélectionnées.

IV - Principales commandes du sous-menu Dessin

Les commandes de ce menu interviennent sur la définition des tracés et à leur mémorisation ; elles agissent uniquement dans le plan de travail et dans aucun autre plan actif.

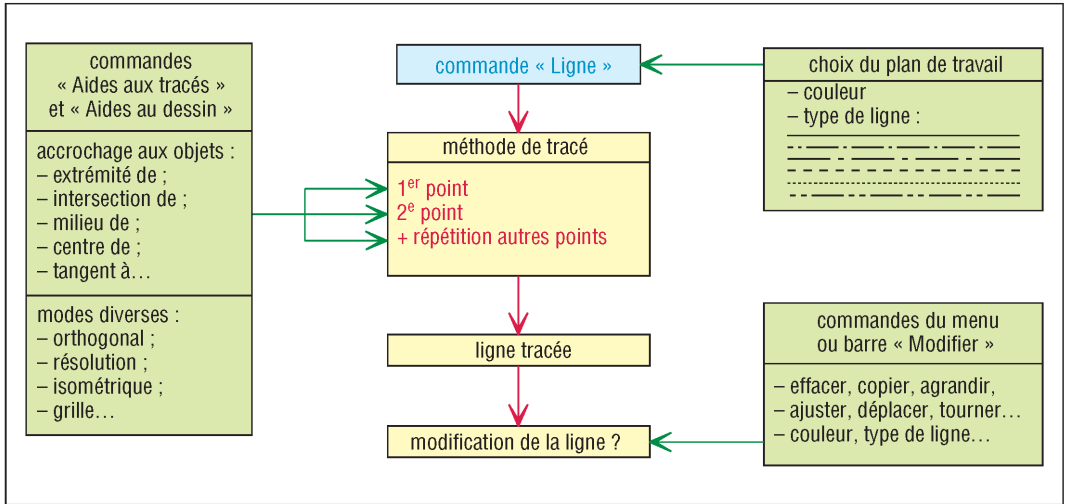


16. Principe de fonctionnement des commandes du sous-menu Dessin.

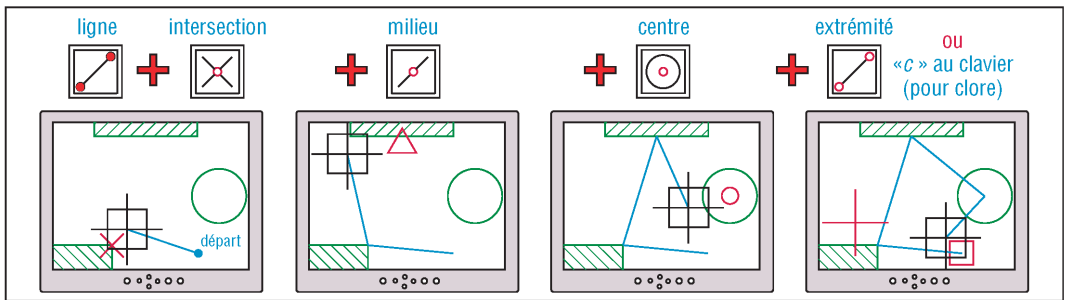
1. Primitives de base : commandes : lignes, arc, cercle, ellipse, polygone...

Tous les dessins sont construits à partir d'éléments graphiques de base, ou primitives, comme des lignes, des arcs... Par assemblage de ces primitives toutes les formes sont possibles. En CAO/DAO, avant qu'une primitive (ligne...) puisse être tracée, plusieurs choix de variables (style de trait, épaisseur, couleur) et plusieurs manipulations, ou méthode de tracé, sont nécessaires.

Les logiciels proposent de nombreuses options : une ligne peut être définie comme horizontale ou verticale... Un cercle peut être obtenu à partir du centre plus un rayon, du centre plus un diamètre... Un arc peut être tracé à partir du centre plus deux points significatifs, du centre plus un point plus un angle...



17. Principe de fonctionnement de la commande Ligne.



18. Principe d'utilisation de la commande ligne avec les commandes d'accrochage aux objets.

| Commande Cercle : tracés usuels | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------|----------------------|
| centre C rayon R | centre C diamètre \varnothing | centre C point circonférence P | 2 points extrémité d'un diamètre | 3 points | rayon 2 tangentes |
| | | | | | |

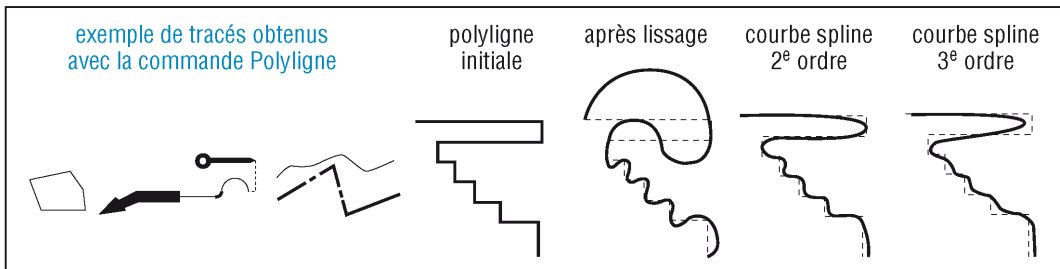
19. Méthodes et paramètres utilisés pour le tracé des cercles.

| Commande Arc : tracés usuels (sens trigonométrique) | | | | | |
|---|---|--|--|--|---|
| centre C point départ P_1 point final P_2 | centre C point départ P_1 angle inscrit φ | centre C point départ P_1 longueur corde L | point départ P_1 point final P_2 rayon R | point départ P_1 point final P_2 angle inscrit φ | point départ P_1 point final P_2 direction initiale T |
| | | | | | |

20. Méthodes et paramètres utilisés pour le tracé des arcs.

2. Commandes Polyligne et Spline

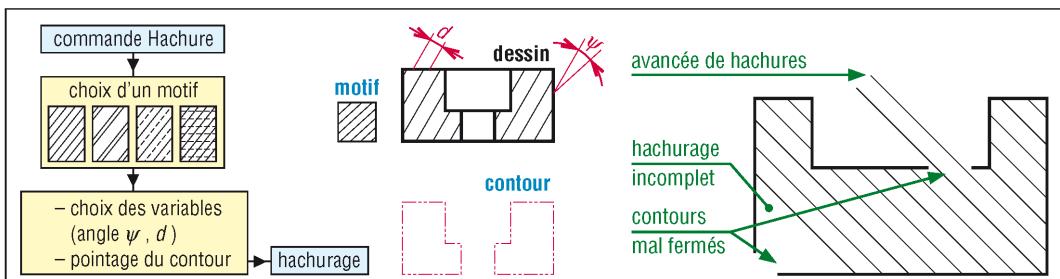
La commande Polyligne permet de tracer en continu des arcs et des lignes. Des épaisseurs différentes et des styles différents sont possibles. L'ensemble ainsi constitué est traité de façon groupée comme un seul et même objet par les autres commandes (effacer...). Options : lissage... De même, la commande « Spline » permet de tracer une courbe complexe à partir d'une série de points et de deux directions (initiale et finale).



21. Commande Polyligne et manipulations possibles.

3. Hachures

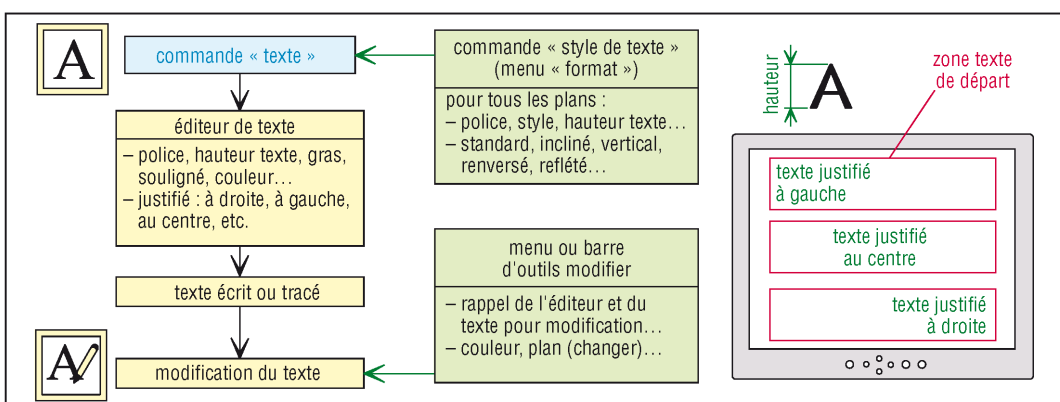
Les logiciels proposent de nombreux motifs différents, normalisés ou non. La distance entre les hachures, l'angle d'inclinaison et divers paramètres sont à indiquer par l'utilisateur. Sous peine d'insuccès (hachurage incomplet ou débordant), la surface à hachurer doit avoir un contour parfaitement fermé avec des extrémités de lignes jointives. Plusieurs hachurages superposés, avec motifs différents et ordre de tracé sont possibles.



22. Principe de fonctionnement de la commande Hachure et principales erreurs.

4. Texte

Les logiciels proposent de nombreux styles de textes différents. Plusieurs hauteurs, largeurs et épaisseurs peuvent être utilisées. Options typiques : vertical, horizontal, justifié à gauche, à droite, écriture penchée, couleur...



23. Principe de fonctionnement de la commande Texte.

5. Cotation

Elle est indispensable lorsque les dessins sont destinés à être utilisés en fabrication. Elle permet d'ajouter des informations complémentaires, précision, état des surfaces, au dessin de base et doit être établie compte tenu de la normalisation en vigueur. Les logiciels proposent en général les quatre types de cotation usuelle : linéaire (horizontale ou verticale), angulaire, diamètre et rayon. La cotation est semi-automatique dans la mesure où le tracé des lignes de rappel, de la ligne-cote et le centrage du texte sont effectués par la machine. L'utilisateur doit uniquement indiquer (pointage au réticule) la position de ces différentes lignes et au besoin la valeur de la cote et des tolérances.

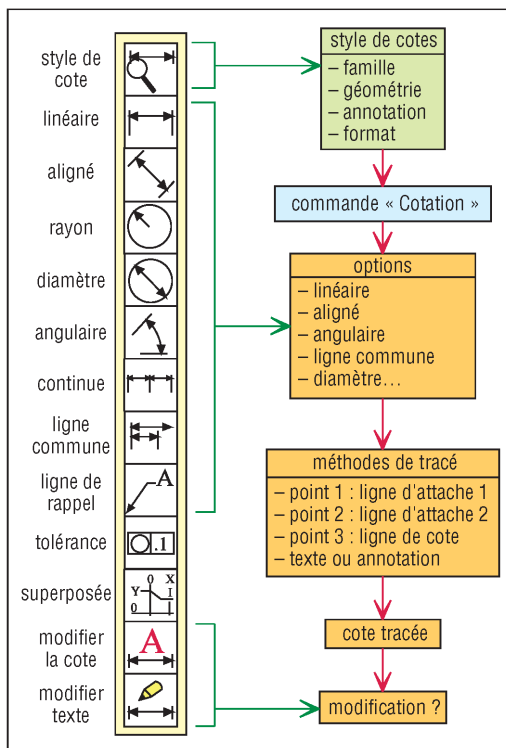
Options usuelles : cotation continue, cotation par rapport à une ligne commune, avec ligne de rappel...

| Principaux types de cotation | | | |
|------------------------------|-----------|----------|-------|
| linéaire | angulaire | diamètre | rayon |
| | | | |

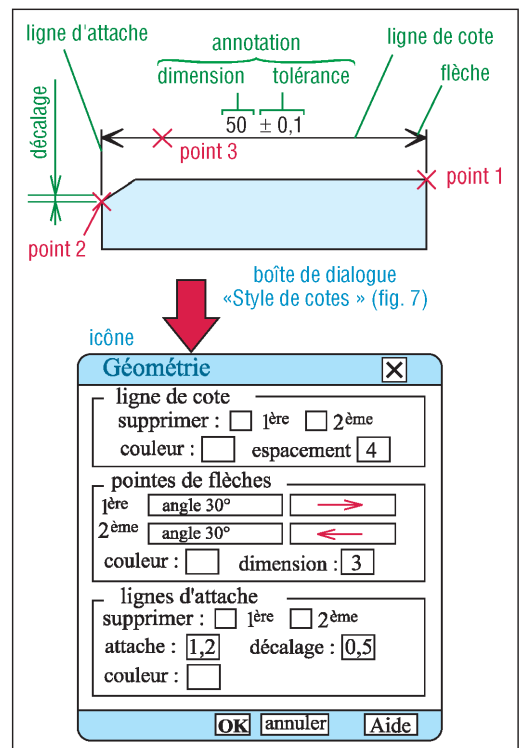
24. Les quatre types de cotation proposées en CAO/DAO.

| Options usuelles de la commande Cotation | | | | |
|--|------------|-------------------|------------------------------|----------------------|
| aligné selon AB | angle % AB | cotation continue | à partir d'une ligne commune | avec ligne de rappel |
| | | | | |

25. Options proposées par les logiciels CAO/DAO.



26. Principe de fonctionnement de la commande Cotation.



27. Exemple d'icône associée à la géométrie des cotes.

V - Principales commandes du sous-menu Aides au dessin ou Outils

1. Commandes d'Aide aux tracés, Modes d'accrochage

On peut les considérer comme des instruments ou des outils complémentaires à utiliser en parallèle avec les commandes du menu Dessin et destinés à faciliter les tracés délicats ou particuliers. Appelées à n'importe quel moment par l'utilisateur pendant le tracé, elles permettent la jonction entre la primitive en cours de tracé avec celles déjà existantes : extrémité de ligne, milieu d'un segment... Dans ce mode de travail le réticule agit comme un aimant et permet la liaison ou l'accrochage aux autres tracés. Voir barre de menu Accrochage (fig. 6).

| | extrémité de | milieu de | perpendiculaire à | intersection de |
|--------------|--------------|-----------|-------------------|-----------------|
| état initial | | | | |
| état final | | | | |
| | plus proche | tangent à | centre de | quadrant à |
| état initial | | | | |
| état final | | | | |

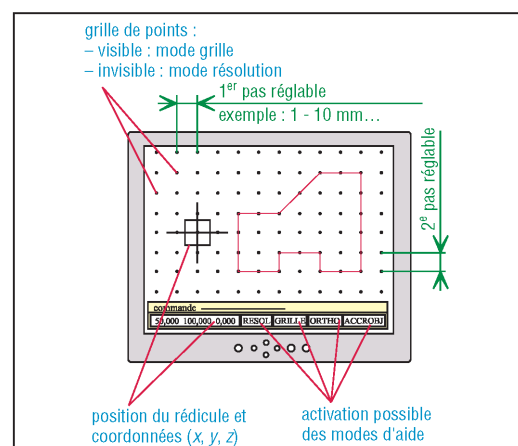
28. Principes des commandes d'accrochage aux objets.

2. Commandes d'aide au dessin

Elles simplifient le positionnement des points et certains tracés particuliers fréquents.

Exemples :

- mode résolution : il oblige le tracé à s'effectuer sur une trame de points précis, sorte de grille de points invisible à pas réglables ;
- mode orthogonal : sorte de té et d'équerre ne traçant que des verticales et des horizontales.
- outils divers : grille de points à pas réglables en x et y (sorte de trame visible et réglable), systèmes de coordonnées spéciaux...

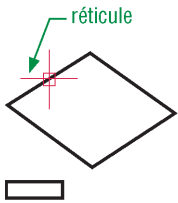
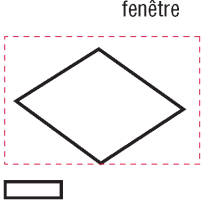
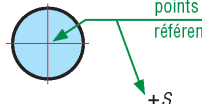
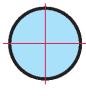
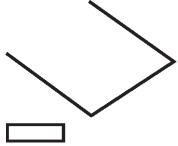

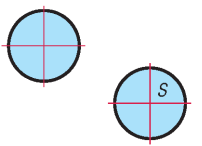



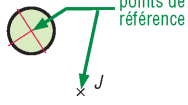

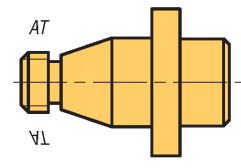
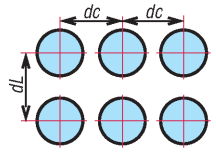
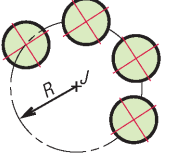
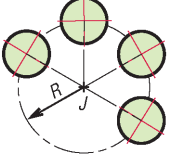
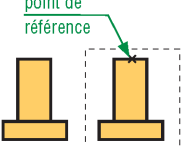
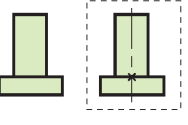

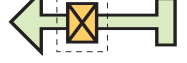
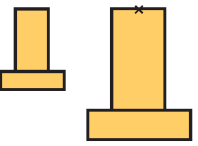


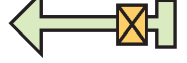
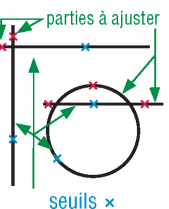
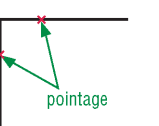

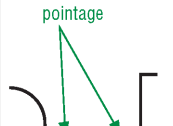


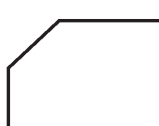



29. Exemples de commandes d'aide au dessin.

VI - Principales commandes du sous-menu Modifier

Les commandes de ce menu permettent de modifier, transformer, compléter ou copier des tracés déjà existants. Elles agissent en même temps dans tous les plans actifs et pas uniquement dans le plan de travail. Voir barre d'outils « Modifier » (fig. 6).

| Description des principales commandes du sous-menu Modifier ou Édition | |
|--|---|
| Effacer | permet de supprimer une seule primitive de base, «au réticule», ou plusieurs primitives en même temps «par fenêtre de sélection». |
| Annuler (U ...) | permet d'effacer le dernier tracé effectué. La répétition de la commande permet de remonter dans le dessin en effaçant les tracés immédiatement précédents les uns après les autres, en ordre inverse. |
| Copier | permet de faire une copie d'un élément ou objet choisi du dessin sans effacer l'original avec choix d'un point de base et d'arrivée. |
| Déplacer | permet de translater, sans le tourner, un élément ou un objet ; semblable à copier, mais efface l'original. |
| Miroir | permet de copier un dessin, ou une partie, symétriquement à un axe à préciser. |
| Réseau | permet de faire des copies multiples d'un même élément sous forme rectangulaire ou sous forme polaire, avec ou sans rotation. |
| Échelle | permet d'agrandir ou de diminuer un original ; modifie la taille sans changer les proportions. |
| Rotation (tourner...) | permet de tourner (angle à préciser) une figure choisie autour d'un point de référence à indiquer. |
| Décaler | permet de créer une figure, plus petite ou plus grande, parallèlement à un original. |
| Ajuster | semblable à couper ; s'utilise en fin de tracé pour supprimer des fins de lignes et des extrémités indésirables ; garantit des extrémités jointives. |
| Raccord | permet de tracer un rayon de raccordement (rayon à préciser) entre deux lignes sécantes. |
| Chanfrein | permet de tracer un chanfrein (cotes à préciser) entre deux lignes sécantes. |
| Étirer | permet de déplacer une partie d'un dessin tout en maintenant des liens ou des liaisons avec les autres parties. |
| Prolonger | permet de prolonger une ligne ou un arc jusqu'à une autre ligne (arc, cercle...). Comparable à ajuster. |
| Couper (coupure) | permet d'effacer une partie ou un tronçon d'une ligne, d'un arc, d'un cercle... |

| Principales commandes du menu Modifier (Édition...) | | | | |
|---|---|---|--|---|
| état initial |  |  |  |  |
| résultat |  |  |  |  |
| commande | effacer | | copier | déplacer |
| état initial |  |  |  |  |
| résultat |  |  |  |  |
| commande | miroir | réseau | | |
| état initial |  |  |  |  |
| résultat |  |  |  |  |
| commande | échelle | rotation | décaler | étirer |
| état initial |  |  |  |  |
| résultat |  |  |  |  |
| commande | ajuster | raccord | chanfrein | prolonger |
| commande | ajuster | raccord | chanfrein | couper |

30. Fonctionnement des commandes du menu Modifier.

VII - Commandes Renseignement et variables du dessin

Les commandes permettent de faire des calculs, mesurer des distances, calculer des aires, des volumes, des masses, des moments d'inertie...

Il est également possible de gérer le temps (compteur...), disposer d'une bibliothèque de formats normalisés (A4, A3...), choisir différents types d'unités, faire des changements d'échelle...

VIII - Commande Bloc : objet, symbole, macro, motif

Particulièrement intéressante et disponible sur de nombreux logiciels, elle permet de créer des bibliothèques de dessins et constituer des bibliothèques : dessins, schémas, symboles...

Principe : n'importe quel tracé ou dessin peut être mis en mémoire (menu Dessin... commande Bloc) sous forme de bloc avec nom de baptême à indiquer et point de référence à choisir. Une fois mémorisé, un bloc peut être appelé à tout moment (menu Insérer... commande Bloc) et copié dans le travail en cours, le point de référence devenant point d'insertion.

Options possibles, au moment de l'insertion : rotation autour du point de référence, facteurs d'échelle différents en x et y qui permettent des agrandissements ou des réductions...

Remarques : une fois inséré, un bloc est traité, par les autres commandes, comme un objet unique et indissociable, comme une polyligne. Par exemple la commande Effacer supprimera tout bloc inséré par un seul pointage.

Au besoin, il est possible d'éclater ou décomposer (commande Décomposer) un bloc inséré suivant les primitives de base qui le composent (même remarque pour une polyligne).

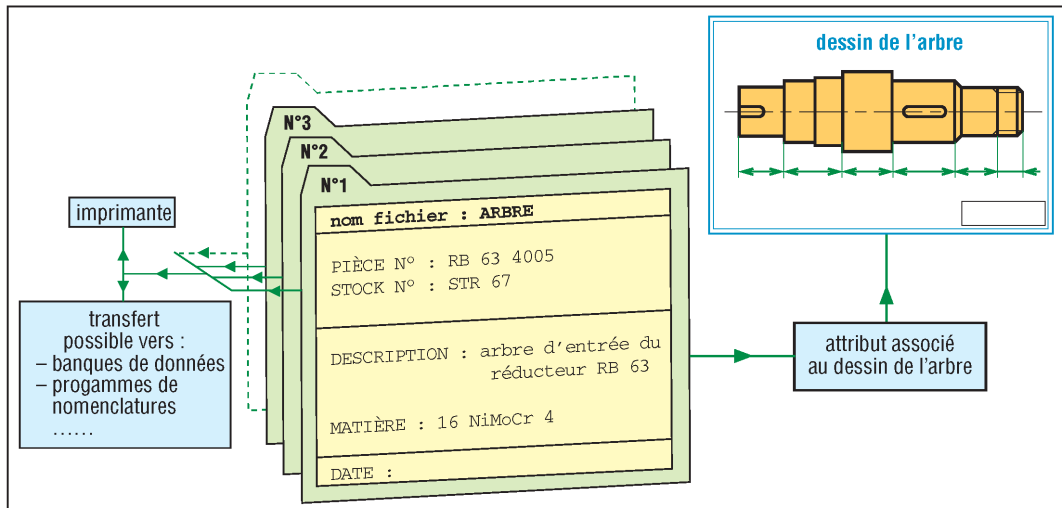
Si le tracé d'un bloc mémorisé est modifié, toutes les copies ou insertions réalisées avant changement seront automatiquement modifiées ou mises à jour après régénération.

| Commande Bloc (objet...) | | |
|--------------------------|--|--|
| dessin original | mémorisation avec commande Créer bloc | exemple de copie / d'insertion commande Insérer bloc |
| <p>vérin</p> | <p>fenêtre de sélection point de référence</p> | <p>point d'insertion rotation de 40°</p> |
| <p>diode (symbole)</p> | <p>point de référence</p> | <p>point d'insertion rotation de 90° agrandi en x et y (x 1,5)</p> |
| <p>ressort (schéma)</p> | <p>point de référence</p> | <p>agrandi uniquement en X (2 fois) point d'insertion</p> |

31. Principe d'utilisation de la commande Bloc (objet...).

IX - Commande Attribut

Les attributs sont des fichiers spéciaux contenant une information texte (prix, matière...) liée ou associée à un dessin ou à une de ses parties (bloc) ; cette information peut ensuite être aisément utilisée, manipulée par d'autres logiciels : nomenclatures, devis, banques de données. Chaque attribut est étiqueté avec un nom de référence ou nom de fichier qui est souvent celui du composant ou de l'objet.



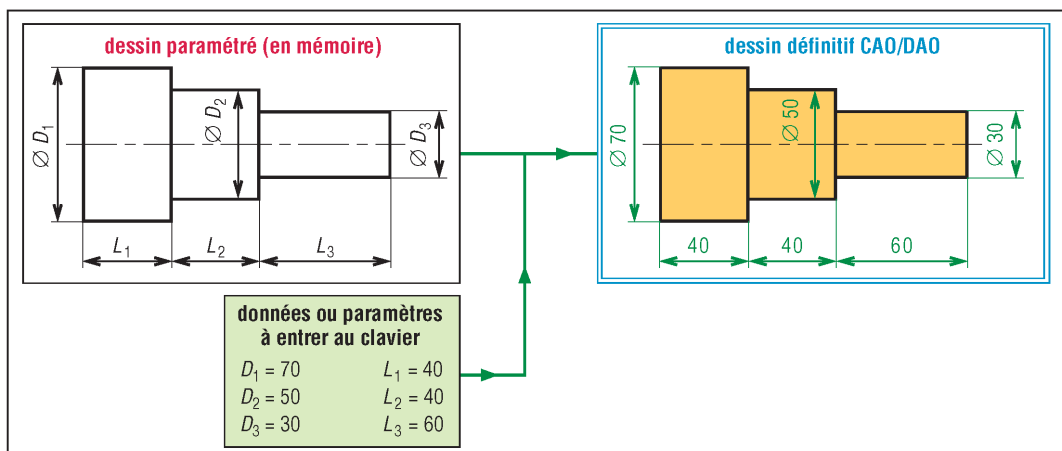
32. Principe d'utilisation de la commande Attribut.

X - Dessins paramétrés et compléments

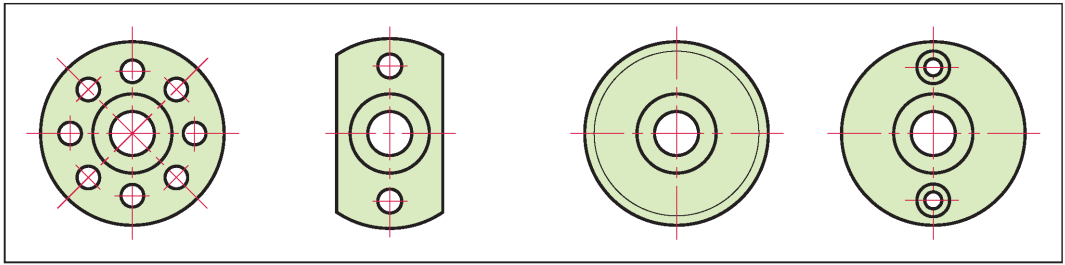
On peut les comparer à des blocs dont les dimensions (diamètres, longueurs, textes...) seraient variables ou programmables et à choisir par l'utilisateur. Réalisés à partir d'un langage de programmation (pascal, lisp...) ils exécutent les tracés « sur mesure » à partir des indications fournies (clavier ou fichiers de paramètres).

Ils sont intéressants lorsqu'il est nécessaire d'exécuter des dessins de familles de pièces (objets dont la forme générale est la même mais dont les dimensions sont différentes).

Exemples : bibliothèques de composants normalisés (roulements, vis, écrou, composants électroniques).



33. Principe d'utilisation des dessins paramétrés.

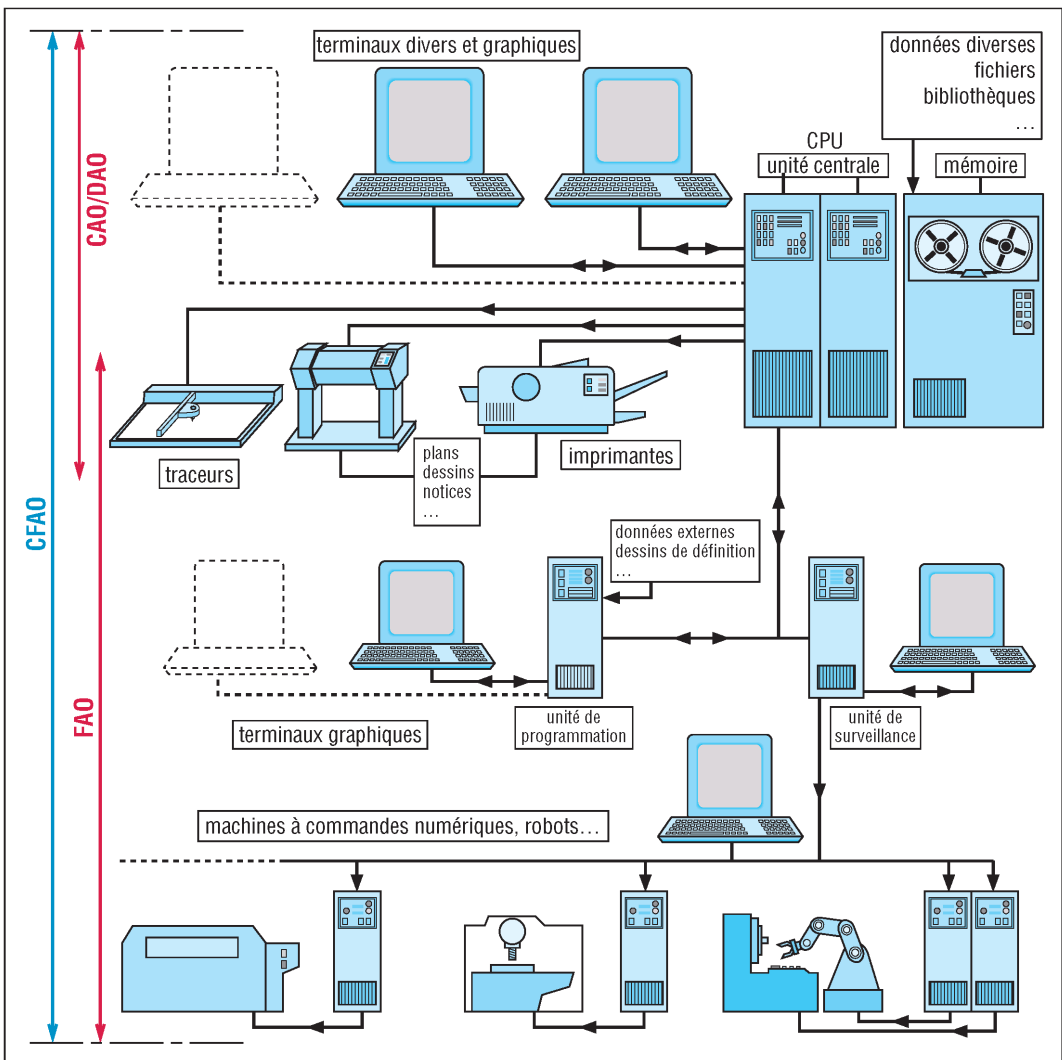


34. Exemple de familles de pièces obtenues avec le même dessin paramétré.

En CAO/DAO, les dessins et les documents techniques sont stockés dans des mémoires informatiques sous forme de bases de données. En fait, un dessin doit être considéré comme tel. Ces données sont ensuite disponibles et facilement exploitables par d'autres disciplines : FAO, service qualité, publicité...

Abréviations françaises et anglo-saxonnes courantes

| | |
|--|--|
| CAO : conception assistée par ordinateur | CN : commande numérique |
| DAO : dessin assisté par ordinateur | CNC : computer numeric control (commande numérique en anglais) |
| CAD : computer aided design (CAO/DAO en anglais) | FMS : flexible manufacturing system (chaîne de fabrication flexible) |
| FAO : fabrication assistée par ordinateur | CIM : computer integrated manufacturing (processus de production des produits entièrement automatisé) |
| CFAO : conception et fabrication assistées par ordinateur | |



35. Configuration générale d'un système de production automatisé.

3

PROJECTIONS ORTHOGONALES NORMALISATION

OBJECTIFS

- Définir le principe de la représentation par projections orthogonales et la propriété de correspondance des vues. Normalisation.
- Donner des recommandations et suggestions pour choisir les vues.
- Cas des vues particulières (partielles, interrompues, auxiliaires...).
- Indiquer les interprétations de lecture et le principe de construction d'une vue à partir d'autres connues.
- Proposer des exercices d'entraînement.

Une photographie ou un dessin artistique peuvent montrer un objet sous une forme plus ou moins avantageuse mais ne peuvent prétendre le décrire complètement en ce qui concerne les formes et les dimensions.

Industriellement, une description précise et claire des formes et des dimensions d'un objet est nécessaire pour que la fabrication puisse être réalisée exactement comme le concepteur l'a prévue. À cette fin on utilise un certain nombre de vues de l'objet, toutes en correspondance les unes avec les autres et choisies pour leur aptitude à le définir.

La représentation orthographique obtenue par le système des projections orthogonales est universellement utilisée.

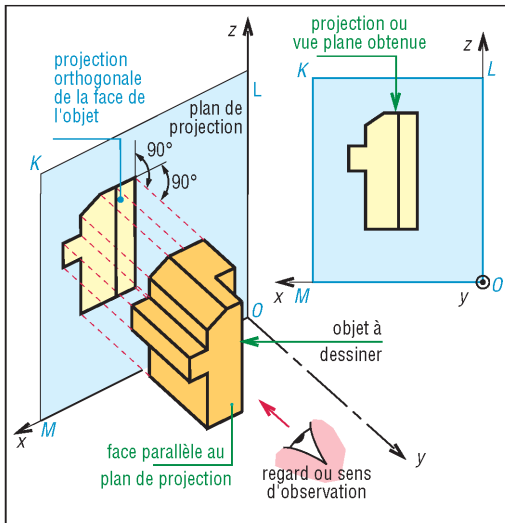
I - Projections orthogonales

1. Principe

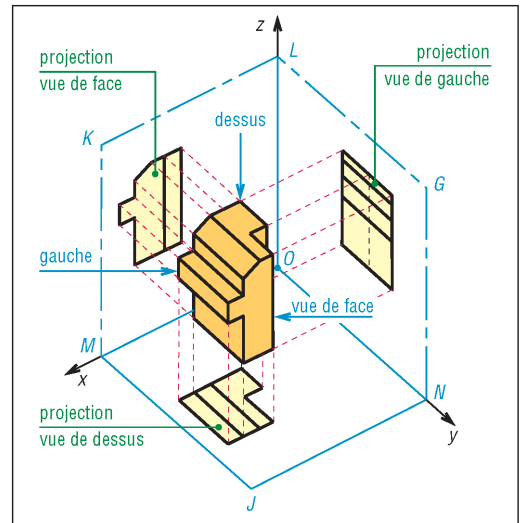
L'observateur se place perpendiculairement à l'une des faces de l'objet à définir. La face observée est ensuite projetée et dessinée dans un plan de projection parallèle à cette face et situé en arrière de l'objet. La vue, plane, dessinée obtenue est une projection orthogonale de l'objet.

2. Système des projections orthogonales

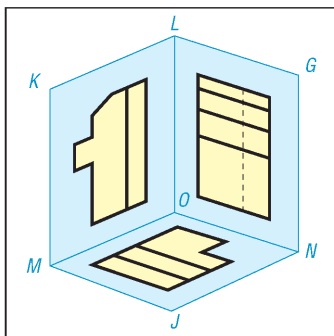
Dans ce système de représentation, l'observateur se place perpendiculairement à l'une des faces de l'objet, appelée vue de face. À partir de cette vue, sorte de vue principale, il est possible de définir cinq autres vues ou projections orthogonales (analogie avec les six faces d'un dé ou d'un cube). Les projections obtenues s'appellent les vues de droite, gauche, dessus, dessous et arrière. La description la plus générale utilise six plans de projections. Le plus souvent trois vues, parfois moins, suffiront pour définir la plupart des objets.



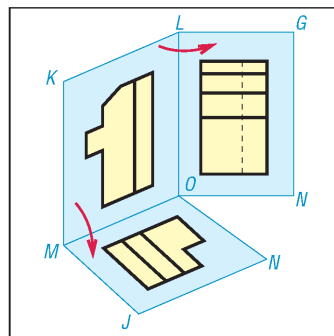
1. Principe de la projection orthogonale.



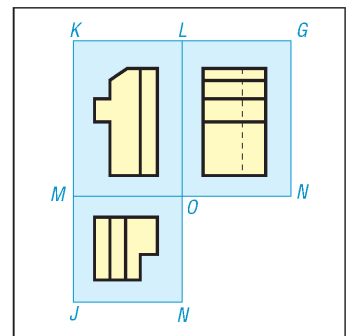
2. Projections orthogonales dans trois plans perpendiculaires entre eux.



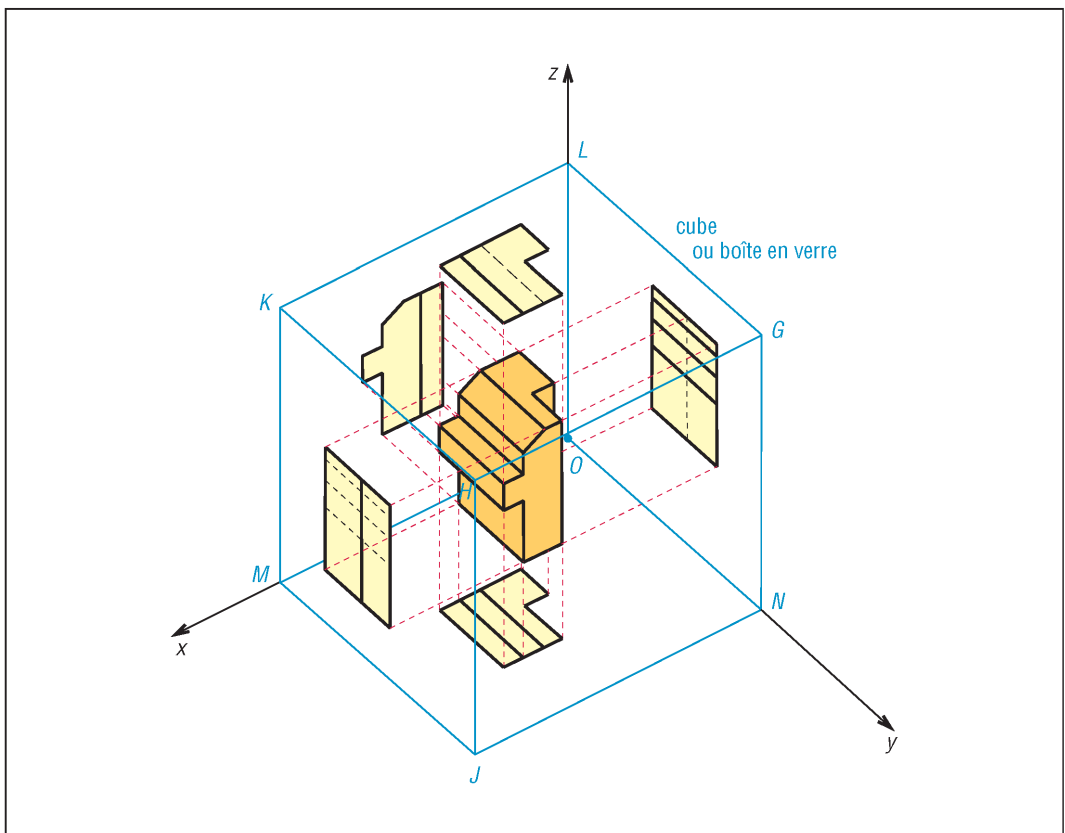
3. Avant dépliage.



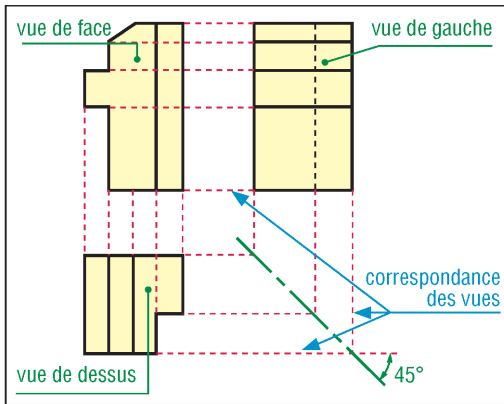
4. Dépliage à partir de KLMO.



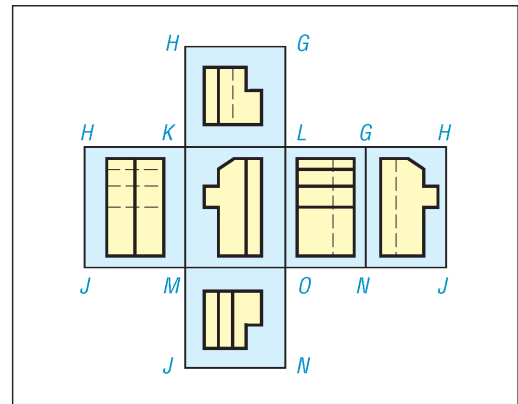
5. Position après dépliage.



6. Projections orthogonales dans les six plans de projection possibles (sauf vue arrière dans le plan *HJNG*).



7. Correspondance entre les vues après dépliage.

8. Dépliage usuel à partir du côté *KLMO*.

3. Règles (normalisation)

Les parties vues de l'objet (arêtes, surfaces) sont dessinées en trait fort. Les parties cachées (arêtes, surfaces, formes intérieures...) sont tracées en traits interrompus.

En cas de chevauchement, ou de superposition, l'ordre de priorité pour le tracé définitif des lignes ou traits est :

1. ligne continue ou trait fort ;
2. ligne discontinue ou trait interrompu court ;
3. ligne mixte ou trait mixte fin (axe...).

Exemple : si le tracé d'un trait fort superpose celui d'un trait interrompu court, c'est le tracé du trait fort qui l'emporte en définitif.

Remarques :

- Lorsqu'elles ne sont pas nécessaires à la définition, il est fréquent que les parties cachées (traits interrompus) ne soient pas dessinées. Ceci permet d'alléger les tracés et facilite la lecture.
- N'importe laquelle des six projections peut être choisie comme vue de face, le choix appartenant au dessinateur. Ce choix doit être aussi judicieux que possible.

4. Gaspard Monge (1746 - 1818)

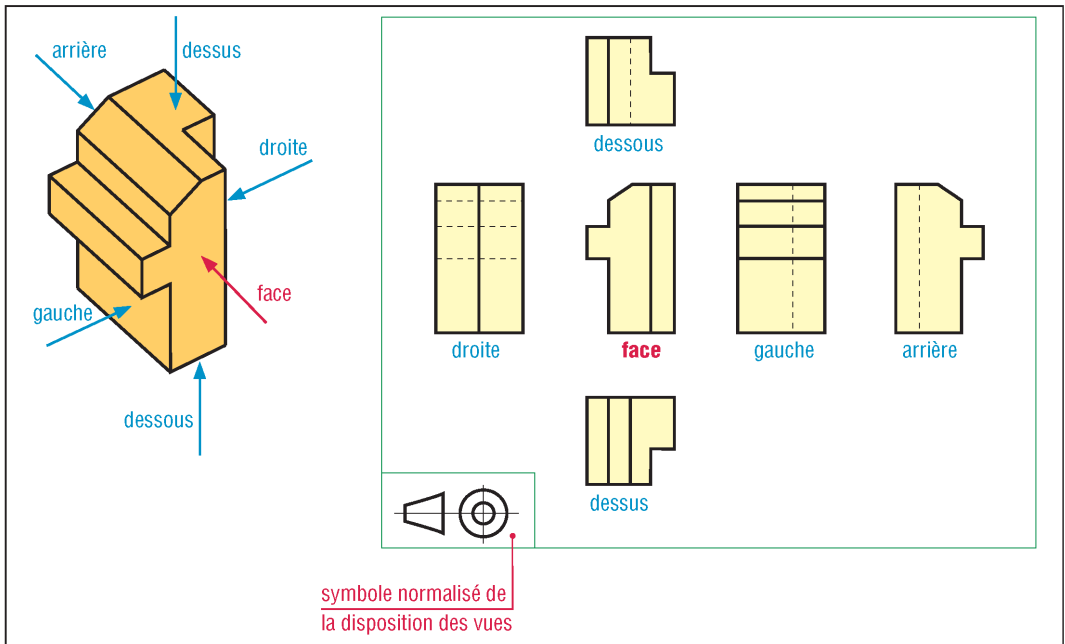
Né à Beaune près de Dijon, il peut être considéré comme le père fondateur du dessin industriel moderne basé sur le concept des projections orthogonales (système connu et utilisé partout de la même façon dans le monde entier). Il travailla beaucoup pour la technologie dans son ensemble et comprit très tôt que le développement de l'industrie et ses réalisations dépendaient d'abord de la qualité de l'enseignement technique. Avec Lavoisier, Carnot et d'autres il fut l'un des fondateurs de l'École Normale.

II - Disposition des vues : méthode du 1^{er} dièdre normalisation ISO/AFNOR (NF EN ISO 5456-2)

La normalisation internationale ISO, suivie par l'AFNOR, reprend le principe des projections orthogonales et la position des vues qui en résulte. Le symbole normalisé correspondant est à mettre sur chaque dessin utilisant ce principe.

Remarque : dans ce système, la vue de gauche est dessinée à droite de la vue de face, la vue de dessus au-dessous de la vue de face...

Les intervalles ou les espaces entre les vues, c'est-à-dire la mise en page, sont au choix du dessinateur. Ils peuvent être identiques ou non. Les espaces réguliers apportent une plus belle présentation.

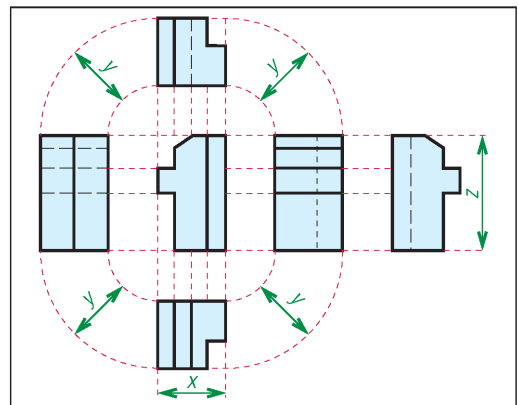


9. Disposition normalisée des vues et directions d'observation.

III - Correspondance des vues

Les vues, construites à partir de plans de projections perpendiculaires entre eux, présentent la propriété, après dépliage et développement, d'être en correspondance ou alignées les unes avec les autres.

Les dimensions de l'objet ou de ses formes se conservent d'une vue à l'autre, sans variations, et peuvent se déduire à partir des mêmes lignes de rappel verticales, horizontales, etc.



10. Correspondance entre les six vues possibles.

| Tracés corrects | | Tracés incorrects typiques | |
|-----------------|--|------------------------------------|-------------------------|
| | | <p>non correspondance des vues</p> | <p>vues mal placées</p> |
| | | <p>hauteur non respectée</p> | |

11. Erreurs typiques de représentation.

IV - Choix des vues

Objectif : avec un nombre minimum de vues, il faut avoir le maximum de définition et de clarté pour décrire les formes et les dimensions de l'objet.

| Choix des vues | |
|---|--|
| 3 vues suffisent en général pour définir un objet | |
| | |
| exemples où 2 vues suffisent | |
| | |
| exemples où 1 vue suffit | |
| | |

12. Principes du choix des vues.

1. Critères de choix

Après avoir judicieusement choisi la vue de face le dessinateur sélectionnera, parmi les cinq autres vues possibles, celles qui montrent le mieux les formes et les contours.

La préférence ira aux vues ayant le moins de contours cachés ou de traits interrompus. Les vues non nécessaires seront éliminées. La vue arrière est très rarement utile.

Trois vues suffisent en général pour définir un objet même complexe. Cas typiques : vue de face + vue de gauche ou de droite + vue de dessus ou de dessous...

Pour des objets possédant des formes simples, une épaisseur constante ou présentant des symétries particulières (pièces de révolution : arbres, axes, visserie...) deux vues ou une seule vue peuvent suffire.

2. Remarque

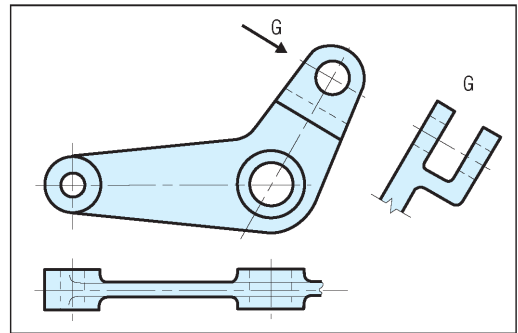
Dans certains cas, une vue supplémentaire, même si elle n'est pas strictement nécessaire à la définition, peut être une aide à la lecture et à la compréhension du dessin. Cette vue peut aussi être une vue auxiliaire, une section, une coupe partielle...

V - Vues partielles

Si une partie seulement d'une vue est utile à la compréhension, si la forme de l'objet est mal adaptée à une représentation conventionnelle, il est fréquent que l'on dessine une vue partielle plutôt qu'une vue entière.

Dans ce cas, seuls les contours utiles sont représentés, le reste de la vue, inutile, est supprimé.

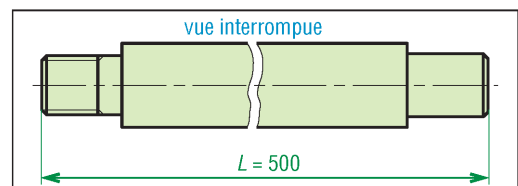
Règle normalisée : une vue partielle doit être limitée par un trait continu fin, tracé à la main, ou par un trait en zigzag, à la règle.



13. Exemple avec vues partielles.

VI - Vues interrompues

Ce sont des vues partielles particulières utilisées lorsque les objets sont très longs. Seules les parties essentielles sont dessinées et une cote indique la longueur. Deux traits fins ou zigzag limitent les parties raccourcies.



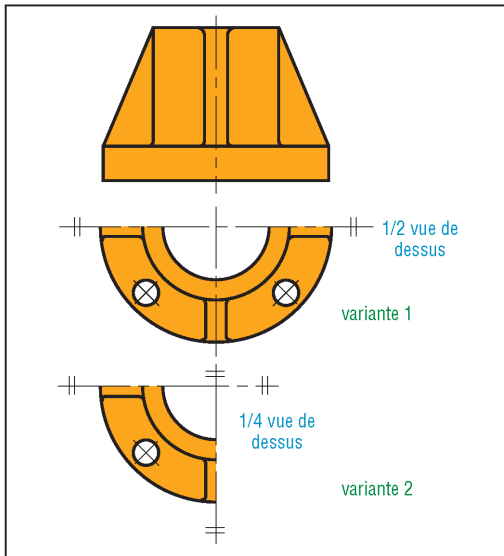
14. Exemple de vue interrompue.

VII - Cas des objets symétriques

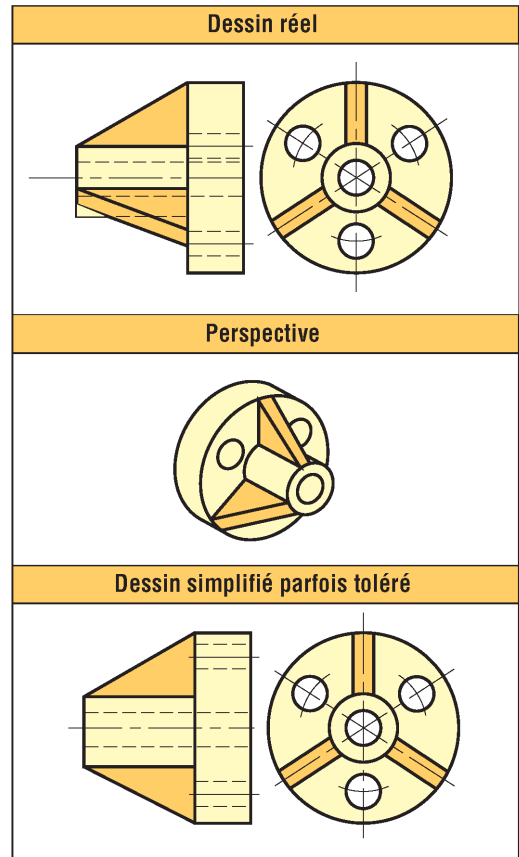
Une demi-vue, parfois un quart de vue, remplace avantageusement une vue complète lorsque les objets sont symétriques (fig. 15).

Règle normalisée : la demi-vue doit être limitée par un trait d'axe et la symétrie symbolisée par deux paires de petits traits fin parallèles tracés perpendiculairement aux extrémités de ce trait d'axe.

Cas particulier (parfois toléré) : pour certains objets symétriques présentant des nervures et des trous en nombre impair, un tracé simplifié peut parfois être toléré. Les formes les plus délicates à dessiner peuvent être ramenées dans le plan de symétrie de l'objet afin de simplifier les tracés de l'une des vues (**fig. 16**).



15. Exemple de pièces symétriques.



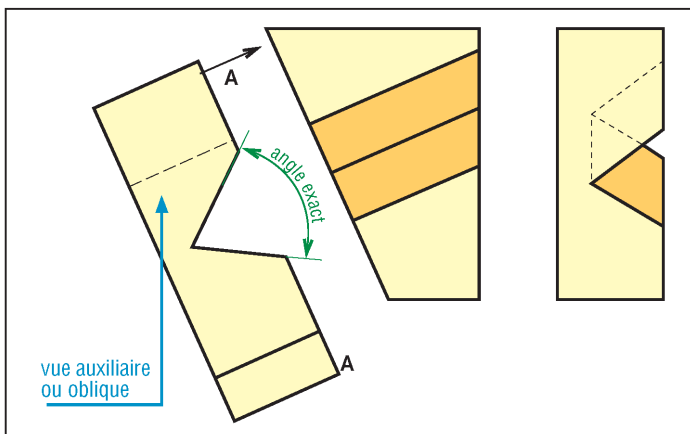
16. Exemple de tracé simplifié pour une pièce symétrique.

VIII - Vues auxiliaires

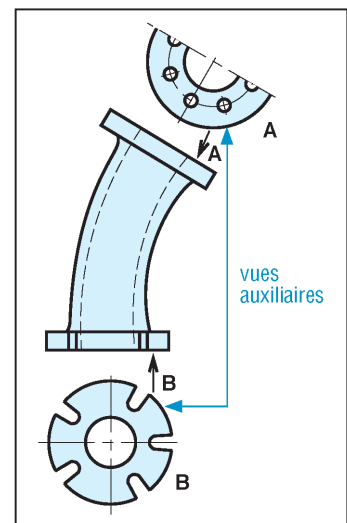
La forme des objets ne permet pas toujours une description aisée à partir des plans de projection usuels. Afin de simplifier la lecture et les tracés, la norme permet l'utilisation des vues auxiliaires : vue entière, partielle, demi-vue....

Règle : ces vues n'appartenant à aucun des plans de projection usuels liés à la vue de face choisie, il est nécessaire d'indiquer le sens d'observation adopté par une flèche avec lettre repère. Cette lettre doit ensuite être inscrite près de la vue auxiliaire.

Remarque : ce type de vue permet de faire apparaître certaines dimensions (longueur, angle...) en vraie grandeur.



17. Exemple avec vue auxiliaire.

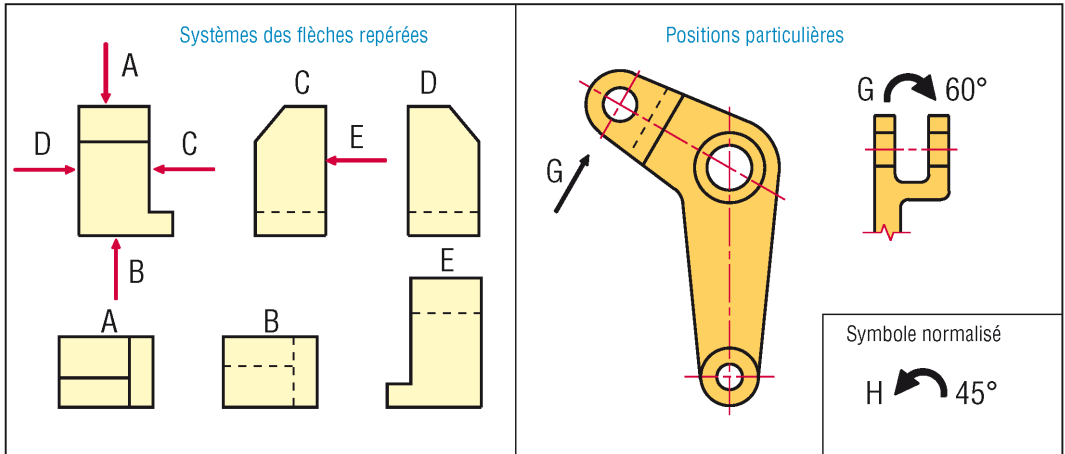


18. Autre exemple avec vues auxiliaires.

IX - Positions particulières des vues

Système des flèches repérées : les vues peuvent être placées de façon quelconque par rapport à une vue principale. Des majuscules (A, B...) identifient à la fois les vues et les directions d'observation correspondantes.

Positions particulières : si la vue est dessinée dans une autre position que la projection normale, celle-ci doit être signalée par un arc fléché orienté dans le sens de la rotation avec au besoin l'angle correspondant.

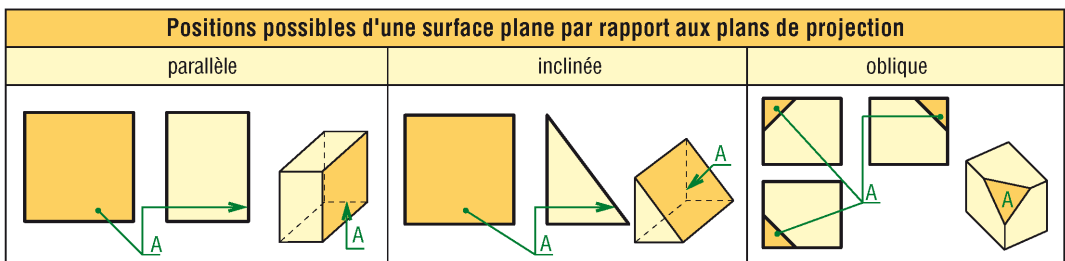


19. Systèmes de positionnement particuliers des vues orthogonales (NF ISO 128-30).

X - Représentation des formes et des surfaces

1. Représentation d'une surface plane

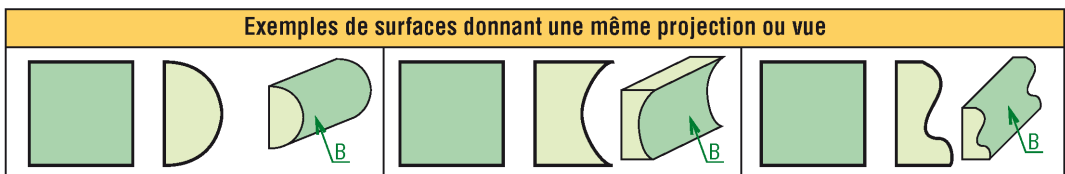
Propriété : une surface plane limitée ou entourée par n côtés (triangle $n = 3$; carré $n = 4$...) peut apparaître, dans les plans de projection, suivant une arête ou ligne (verticale, horizontale ou inclinée) ou suivant une aire entourée de n côtés.



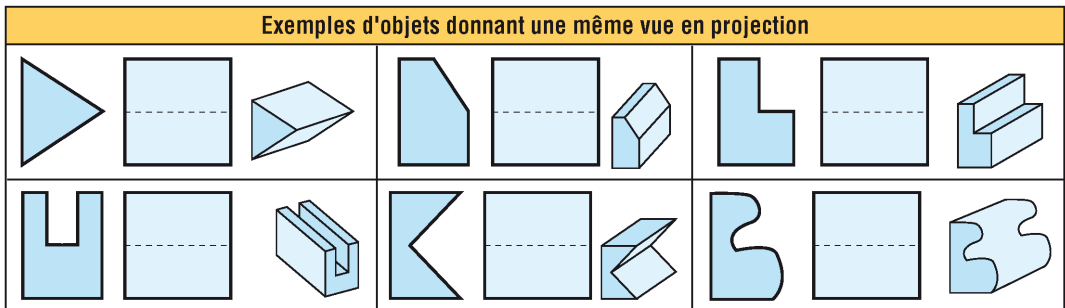
20. Exemples de projections de surfaces.

2. Interprétations possibles des vues ou projections

Des surfaces différentes (plane, cylindrique...) ou des objets différents peuvent avoir la même projection. En conséquence, une seule vue ne suffit pas en général pour assurer la définition.

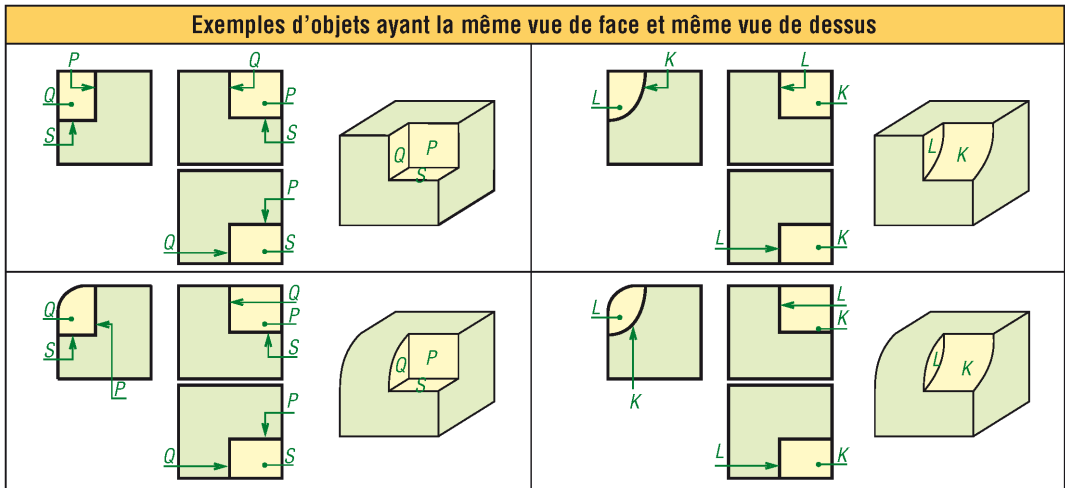


21. Surfaces différentes donnant la même vue de face.



22. Objets différents donnant la même vue de face.

Deux vues ne suffisent pas toujours pour définir les formes d'un objet. Par exemple, il est possible de trouver une grande quantité d'objet ayant tous même vue de face et même vue de dessus.

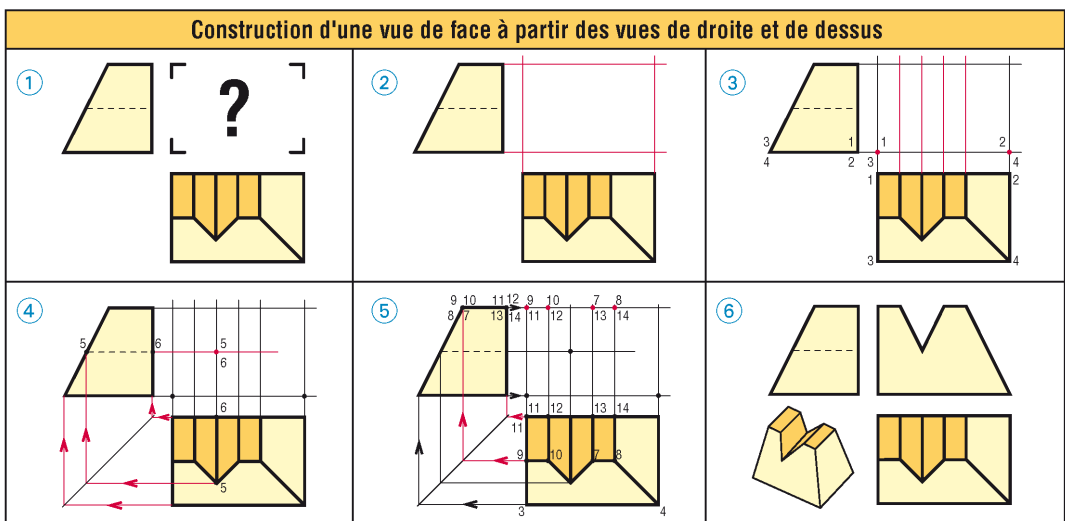


23. Objets différents donnant deux projections identiques.

XI - Construction d'une vue supplémentaire

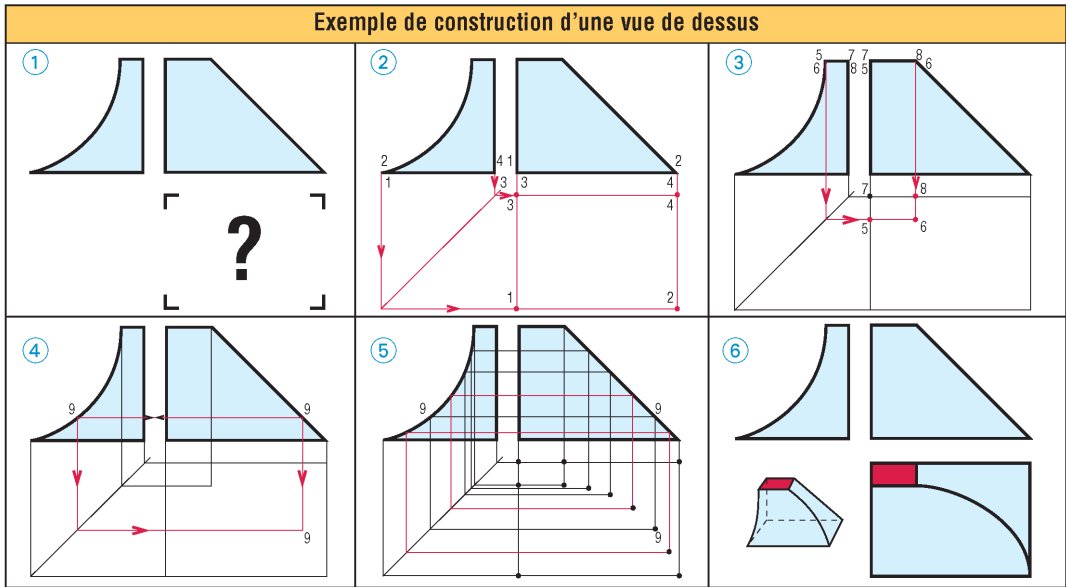
La vue manquante s'obtient point par point, en utilisant la correspondance des vues.

Exemple 1 : tracer les limites de la vue cherchée (case 2), puis les surfaces principales : plan de base (repères 1-2-3-4 case 3) ; fond rainure (5-6 case 4) ; face supérieure (7-8-9-10-11-12-13-14 case 5) ; faire le tracé définitif et éliminer les constructions annexes (case 6).



24. Étapes de constructions de l'exemple 1.

Exemple 2 : construction d'une vue de dessus connaissant la vue de face et la vue de droite. Le principe est le même. Tracer dans l'ordre : les limites de la vue (case 2) ; la surface de base (repères 1-2-3-4 case 2) ; la face supérieure (5-6-7-8 case 3) ; puis point par point l'arête 6-9-2 de forme complexe (cases 4 et 5) et le tracé définitif de la vue (case 6).



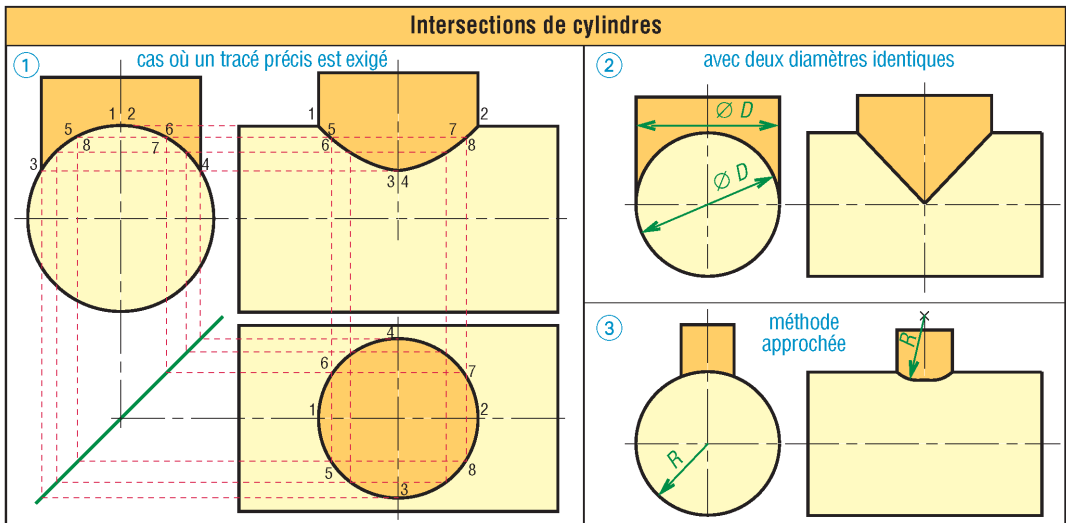
25. Exemple 2 : construction de la vue de dessus à partir de la vue de face et de la vue de droite.

XII - Intersection de cylindres

C'est un tracé qui revient régulièrement. Pour le réaliser il faut tenir compte de la précision exigée, de la difficulté des constructions (place disponible...) et de la taille relative des surfaces (comparaison des diamètres).

Avec des diamètres assez différents et si aucune précision particulière n'est exigée, une méthode approchée suffit. Si les diamètres sont identiques l'intersection se réduit à deux droites perpendiculaires.

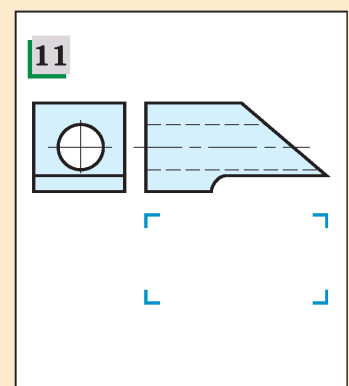
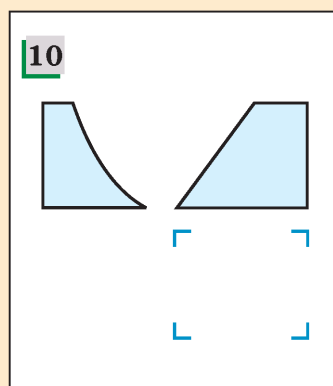
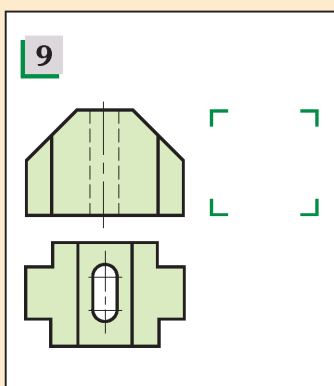
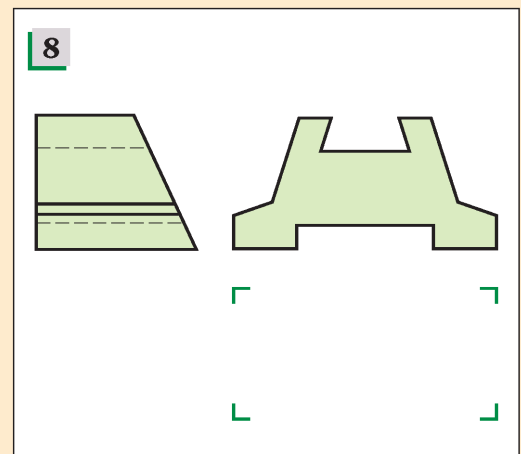
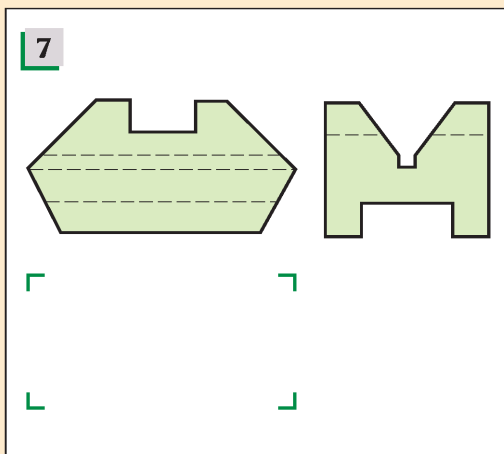
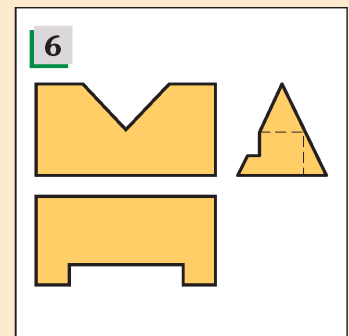
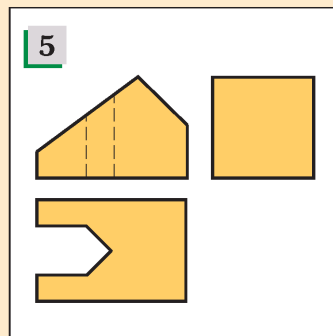
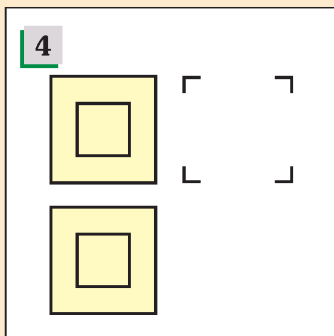
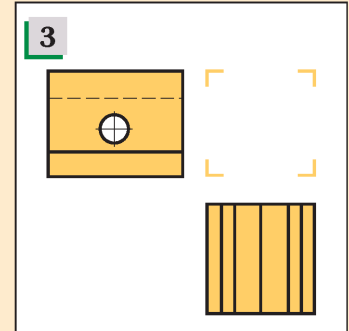
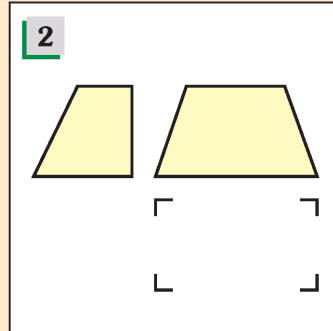
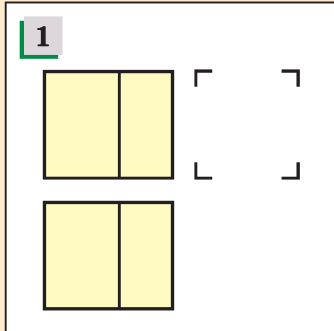
Si un tracé précis est exigé l'intersection peut être tracée point par point. De nombreux logiciels CAO/DAO réalisent automatiquement ces intersections (en mode 3D).

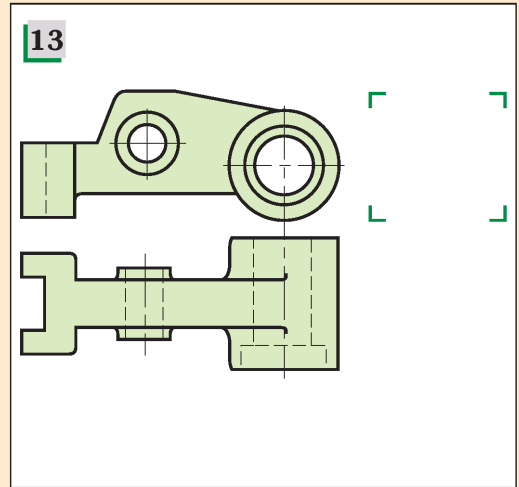
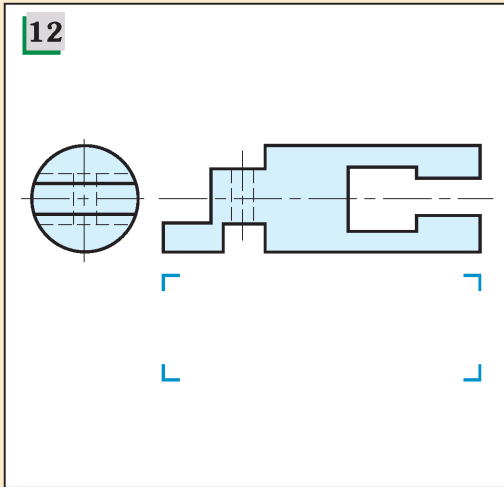


26. Exemples de tracés d'intersections.

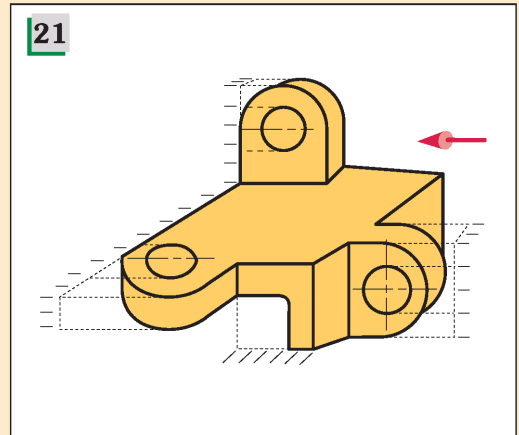
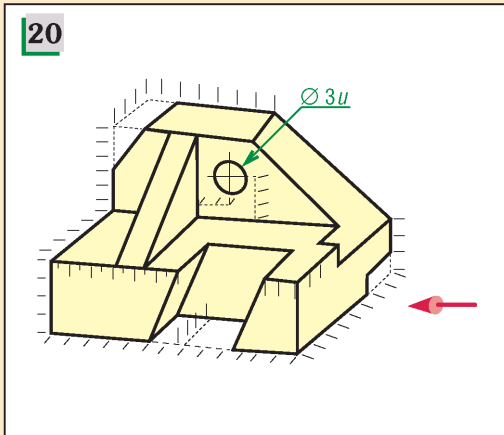
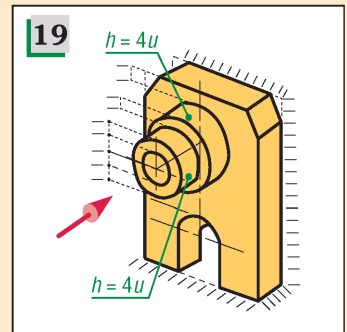
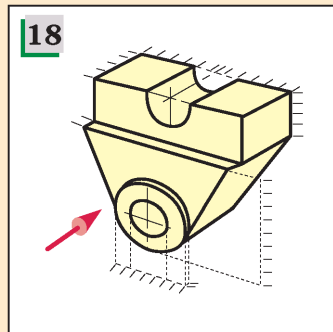
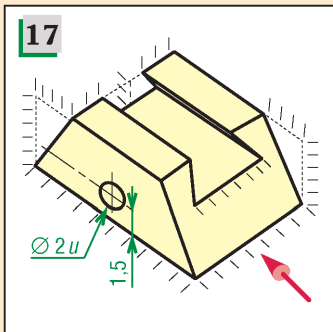
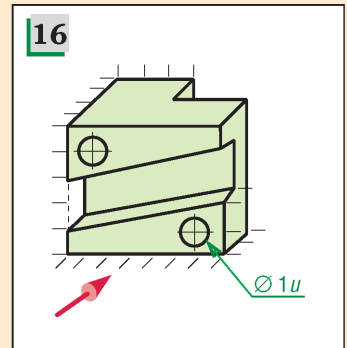
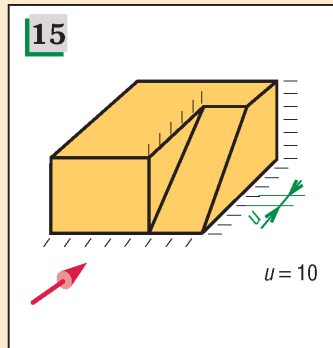
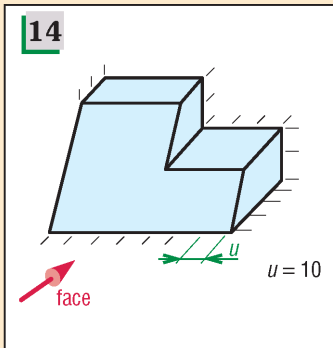
XIII - Exercices

Toutes les surfaces sont supposées planes (sauf 10-11-12-13) et les trous débouchants. Pour les exercices suivant (1 à 13), déterminer et tracer les vues manquantes, compléter au besoin les vues connues et faire une perspective à main levée de l'objet représenté.





Pour l'objet proposé en perspective, dessiner la vue de face repérée par une flèche, plus deux vues au choix : vue de dessus et vue de gauche (ou de droite). Dessiner les parties cachées. Les dimensions sont repérées par des intervalles de 10 mm ($u = 10$), les trous sont débouchants.



4

COUPES ET SECTIONS

OBJECTIFS

- Indiquer le principe des vues coupées (coupe, demi-coupe, coupes partielles, coupes brisées et sections) et préciser les règles de représentation normalisée.
- Mettre en évidence les fautes typiques de dessin.
- Proposer des exercices d'entraînement.

Les principes de représentation étudiés dans le chapitre précédent sont parfaitement adaptés à la description et à la définition des formes et contours extérieurs, même pour les objets complexes. Dans le cas de pièces creuses il n'en est pas de même, les formes intérieures décrites à partir de traits interrompus courts sont difficiles à définir. Pour améliorer la définition et la lecture on dispose des vues en coupe (coupes et sections).

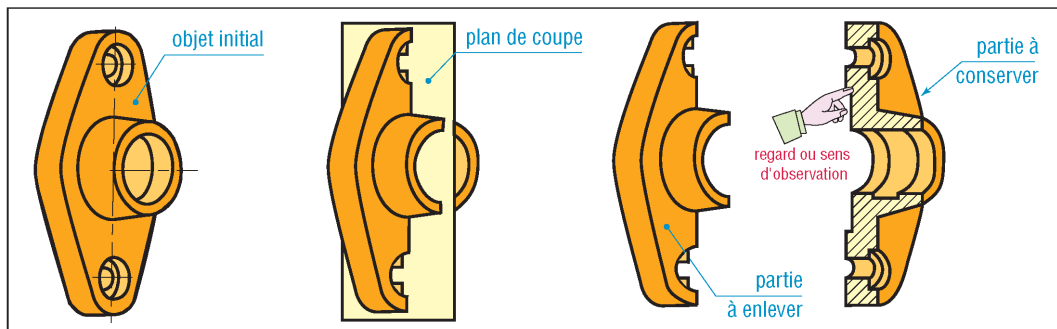
I - Coupes

1. Principe

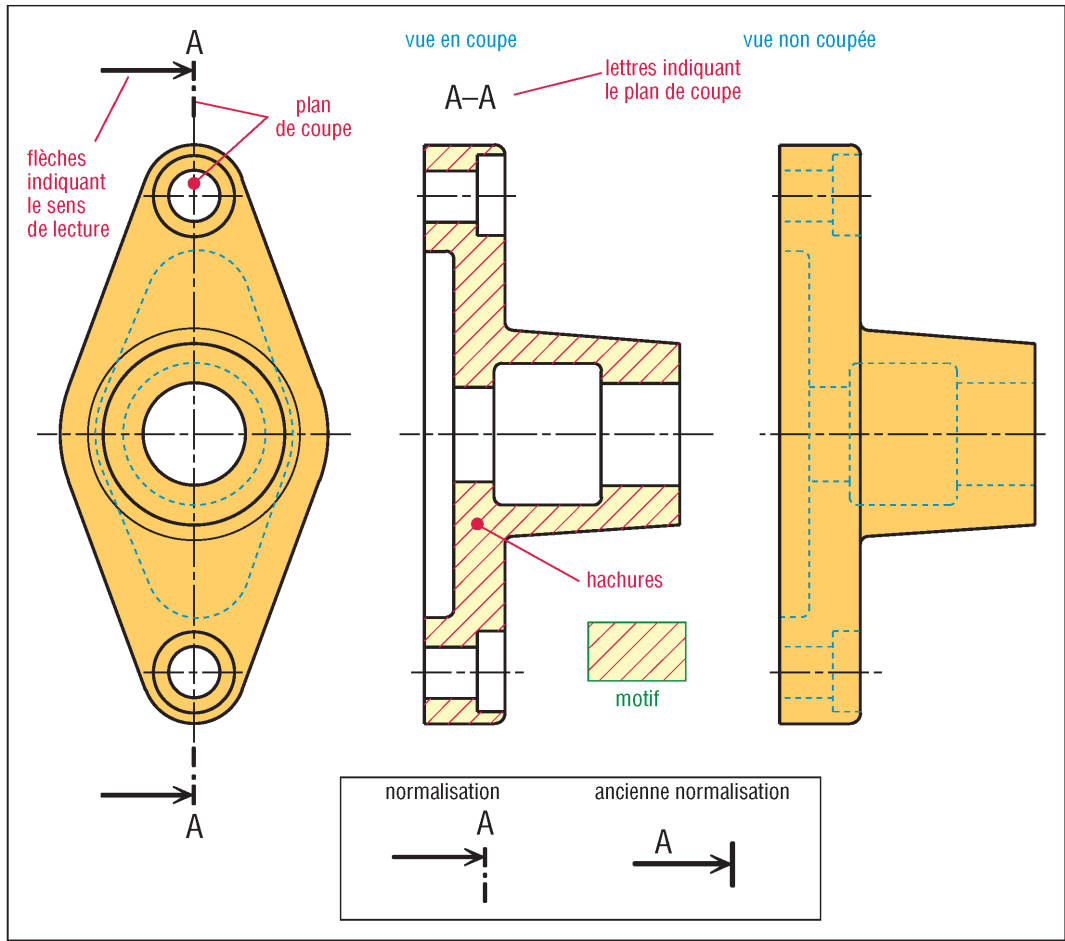
Dans ce mode de représentation l'objet est coupé (analogie avec un fruit coupé au couteau). Les morceaux sont séparés. Le plus représentatif est choisi. L'observateur, le regard tourné vers le plan coupé, dessine l'ensemble du morceau suivant les règles habituelles. L'intérieur, devenu visible, apparaît clairement en traits forts.

2. Règle

En général, on ne dessine pas les contours cachés, ou traits interrompus courts, dans les vues en coupe, sauf si ceux-ci sont indispensables à la compréhension.



1. Principe des vues coupées ; plan de coupe.



2. Représentation normalisée de l'objet coupé (NF ISO 128-40).

II - Règles de représentation normalisées

1. Plan de coupe

- Il est indiqué dans une vue adjacente.
- Il est matérialisé par un trait mixte fin (« trait d'axe ») renforcé aux extrémités par deux traits mixtes forts courts (trait-point-trait). Le trait mixte fin peut être omis.
- Le sens d'observation est indiqué par deux flèches (en traits forts) orientées vers la partie à conserver. Les extrémités « touchent » les deux traits forts courts.
- Deux lettres majuscules (AA, BB...) servent à la fois à repérer le plan de coupe et la vue coupée correspondante. Ces indications sont particulièrement utiles lorsque le dessin comprend plusieurs vues coupées. S'il n'y a pas d'ambiguïté possible elles sont parfois omises.

2. Hachures

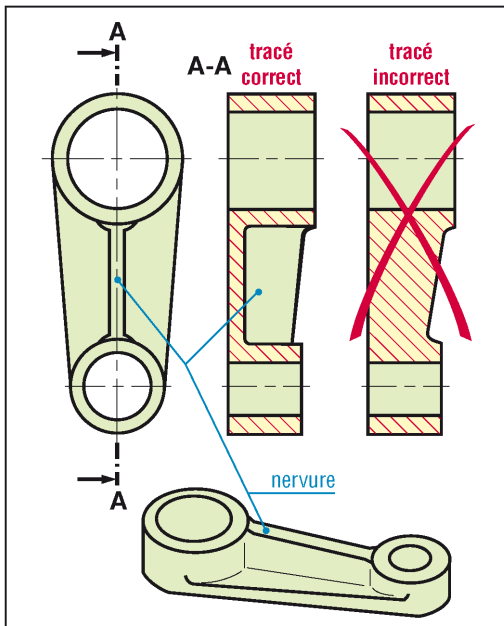
- Les hachures apparaissent là où la matière a été coupée.
- Elles sont tracées en trait continu fin et sont de préférence inclinées à 45° (dans le cas où un seul objet est coupé) par rapport aux lignes générales du contour.
- Elles ne traversent pas ou ne coupent jamais un trait fort.
- Elles ne s'arrêtent jamais sur un trait interrompu court.
- Le motif des hachures ne peut en aucun cas préciser la nature de la matière de l'objet coupé. Cependant, en l'absence de nomenclature, les familles de matériaux (ferreux, plastiques, alliages légers...) peuvent être différenciées par les motifs d'emploi usuel (fig. 3).

| Hachures – motifs usuels | | |
|--------------------------|--|-------------------------------------|
| | usage général tous métaux et alliages | sol naturel |
| | métaux et alliages légers (aluminium ...) | bobinages électro-aimants |
| | cuivre et ses alliages béton léger | béton |
| | matières plastiques ou isolantes (élec.) élastomères | béton armé |
| | | antifriction |
| | | verre, porcelaine, céramique ... |
| | | bois en coupe transversale |
| | | bois en coupe longitudinale |

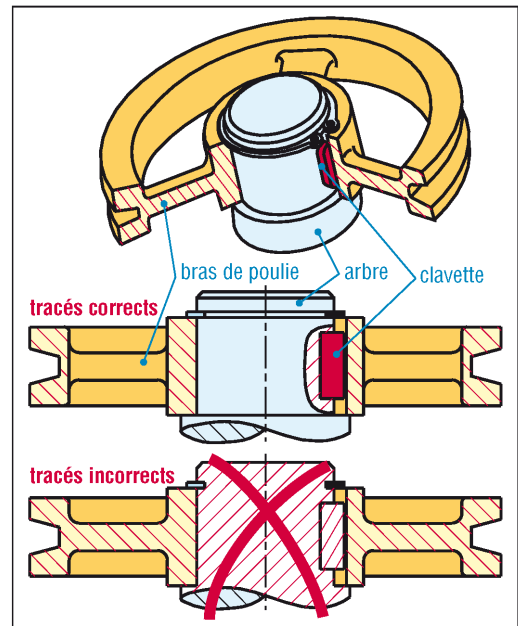
3. Exemples de hachures d'emplois usuels NF E04-520. « Traits rouges normalisés en trait fins noirs ».

3. Règles complémentaires simplifiant la lecture des dessins

a) On ne coupe jamais des nervures lorsque le plan de coupe passe dans le plan de leur plus grande surface. La règle est la même avec les bras de poulie, de volant ou de roue.

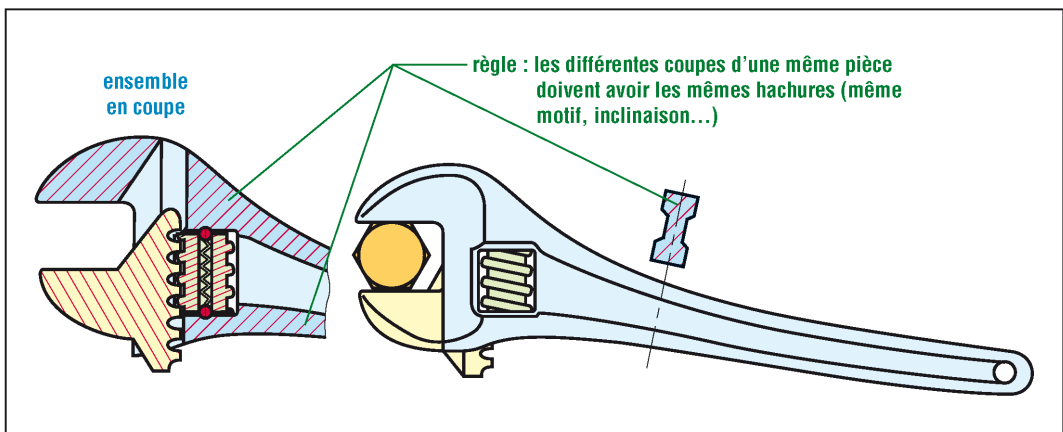


4. Exemple de coupe de nervure.



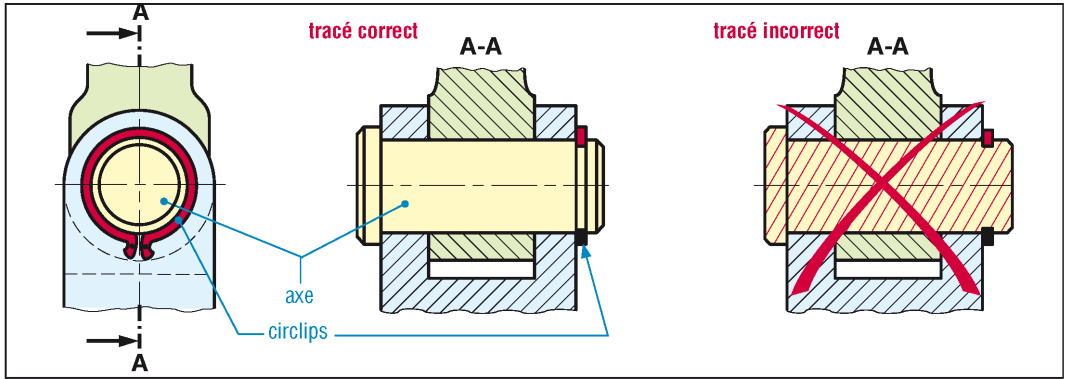
5. Coupes : bras de poulie, arbre et clavette.

b) Des pièces ou des objets différents appartenant à un même ensemble en coupe doivent avoir des hachures différentes : inclinaisons différentes et au besoin motifs différents.

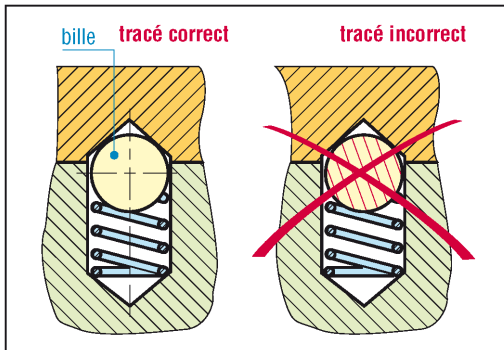


6. Exemple d'ensemble en coupe avec des hachures différentes pour chaque pièce coupée.

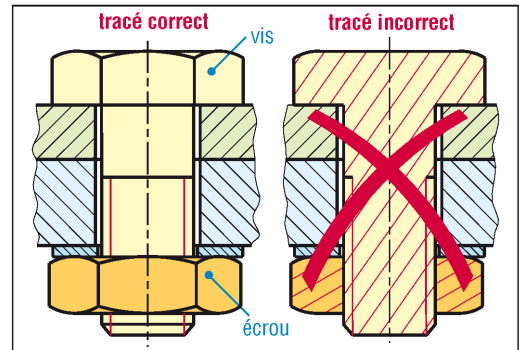
c) On ne coupe jamais les pièces de révolution pleines (cylindriques ou sphériques telles que axes, arbres, billes...), les vis, boulons, écrous, rivets, clavettes.



7. Coupe des axes et articulations.



8. Coupe des billes.



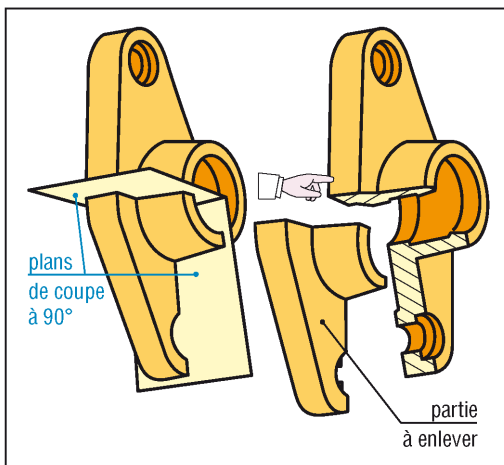
9. Coupe des vis, boulons et écrous.

III - Demi-coupe

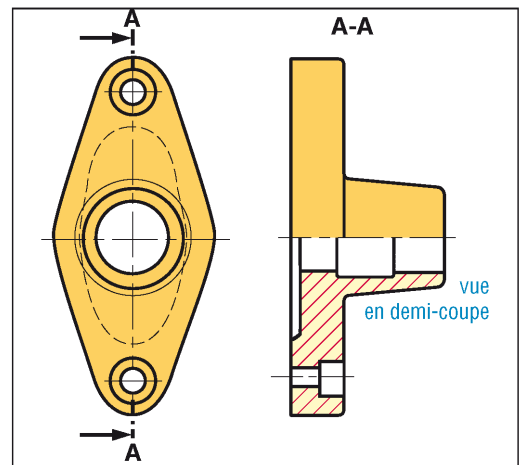
Les vues en demi-coupe sont particulièrement intéressantes dans le cas des pièces symétriques.

1. Principe

Dans ce mode de représentation la moitié de la vue est dessinée en coupe, afin de définir les formes et les contours intérieurs, alors que l'autre moitié reste en mode de représentation normal pour décrire les formes et les contours extérieurs.



10. Principe de la demi-coupe.



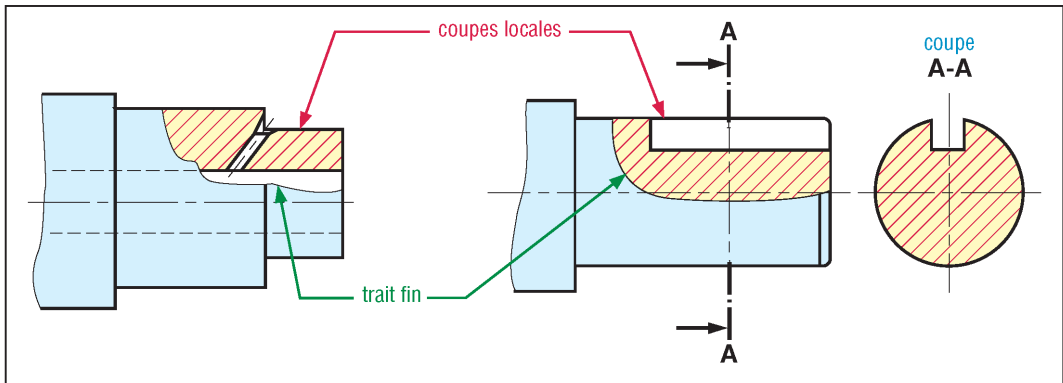
11. Représentation normalisée.

2. Règles

Elles sont les mêmes que pour les coupes normales, l'indication du plan de coupe est inchangée. Les deux demi-vues sont toujours séparées par un axe de symétrie, trait mixte fin l'emportant sur tous les autres types de traits.

IV - Coupe locale ou partielle

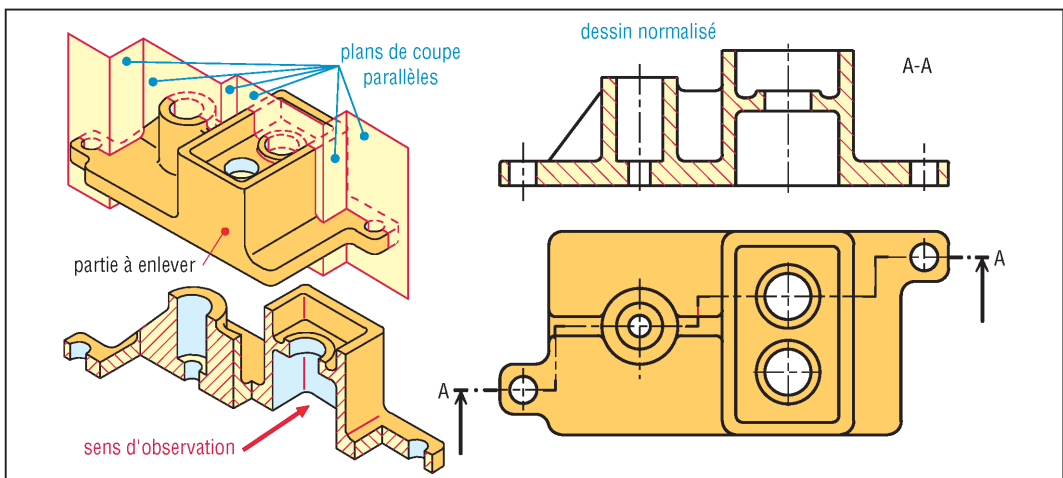
Il arrive fréquemment que l'on ait besoin de définir uniquement un seul détail (un trou, une forme particulière etc.) du contour intérieur. Il est alors avantageux d'utiliser une coupe locale plutôt qu'une coupe complète amenant trop de tracés inutiles. L'indication du plan de coupe est inutile dans ce cas. Un trait fin ondulé ou en zigzags sert de limite aux hachures.



12. Exemples de coupes locales.

V - Coupe à plans parallèles

Elle est utilisée avec des objets présentant des contours intérieurs relativement complexes. Elle apporte un grand nombre de renseignements et évite l'emploi de plusieurs coupes normales. Le plan de coupe est construit à partir de plans de coupe classiques parallèles entre eux. La correspondance entre les vues est dans ce cas conservée. Les discontinuités du plan de coupe ne sont pas dessinées.

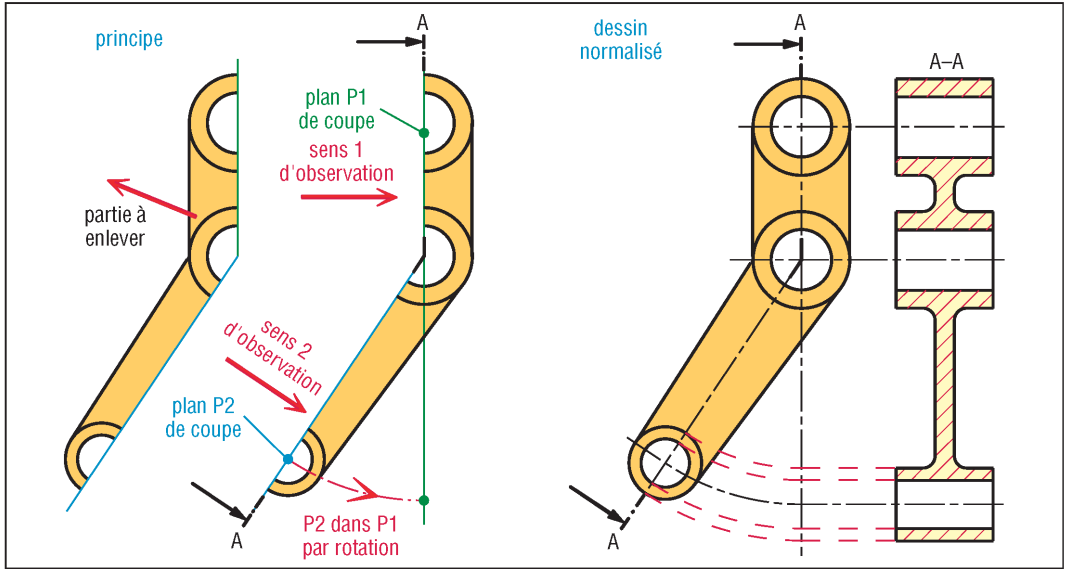


13. Principe des coupes brisées à plans parallèles et représentation normalisée.

VI - Coupe à deux plans sécants

Le plan de coupe est constitué de deux plans sécants. La vue coupée est obtenue en ramenant dans un même plan les tronçons coupés par les plans de coupe successifs ; les parties coupées s'additionnent. Dans ce cas la correspondance entre les vues n'est que partiellement conservée.

Les règles de représentation restent les mêmes. Les discontinuités du plan de coupe (arêtes ou angles) ne sont pas dessinées dans la vue coupée.



14. Principe des coupes à plans sécants et représentation normalisée.

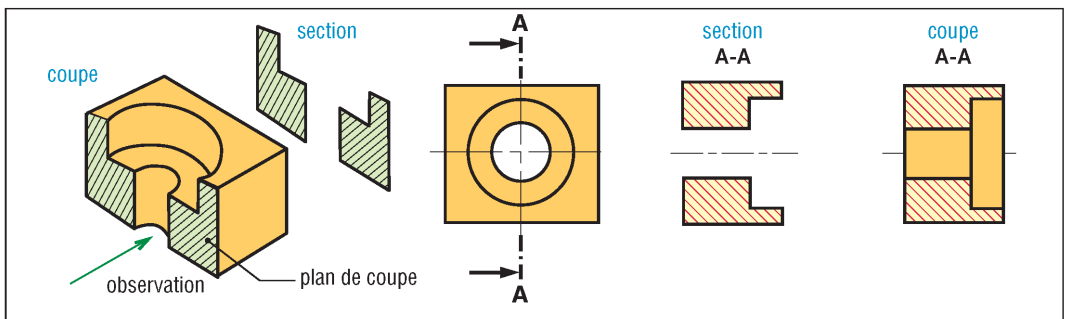
VII - Sections

On peut les considérer comme des vues complémentaires ou auxiliaires. Elles se présentent comme une variante simplifiée des vues en coupe et permettent de définir avec exactitude une forme, un contour, un profil en éliminant un grand nombre de tracés inutiles.

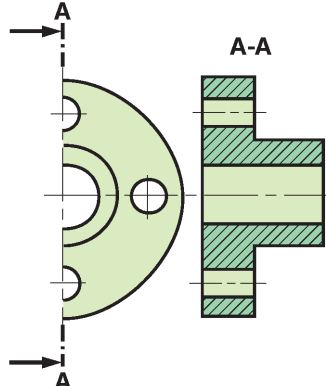
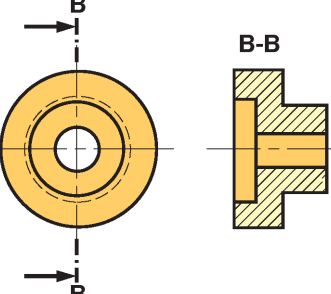
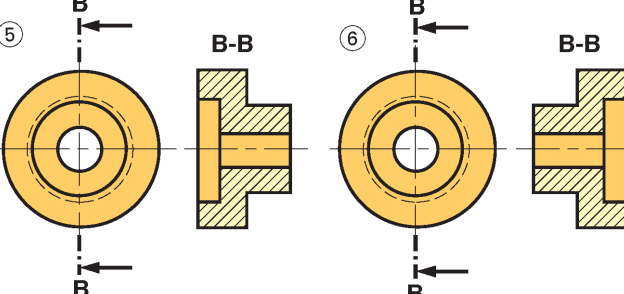
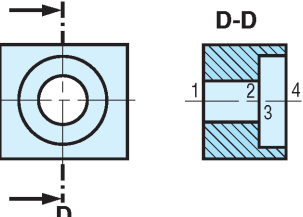
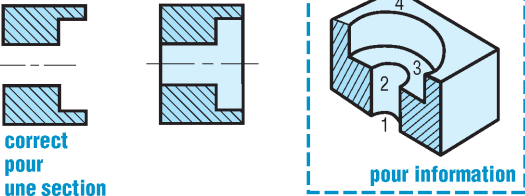
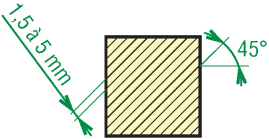
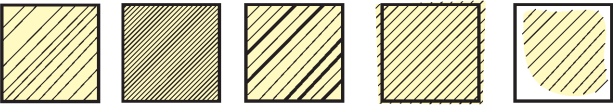
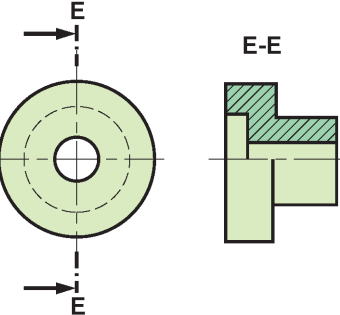
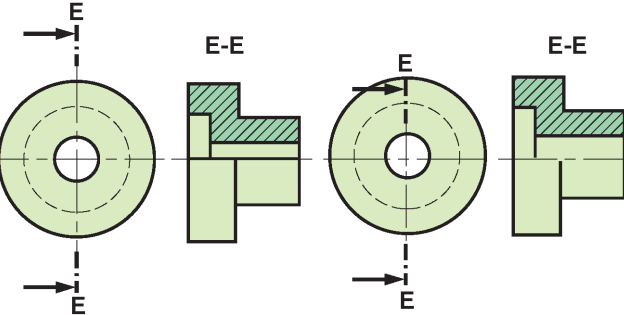
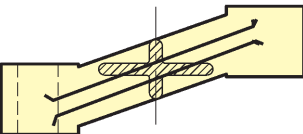
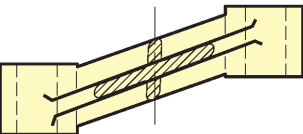
Les sections sont définies de la même manière que les coupes : plan de coupe, flèches, etc.

1. Principe

Dans une coupe normale toutes les parties visibles au-delà (en arrière) du plan de coupe sont dessinées. Dans une section, seule la partie coupée est dessinée (là où la matière est réellement coupée ou sciée).



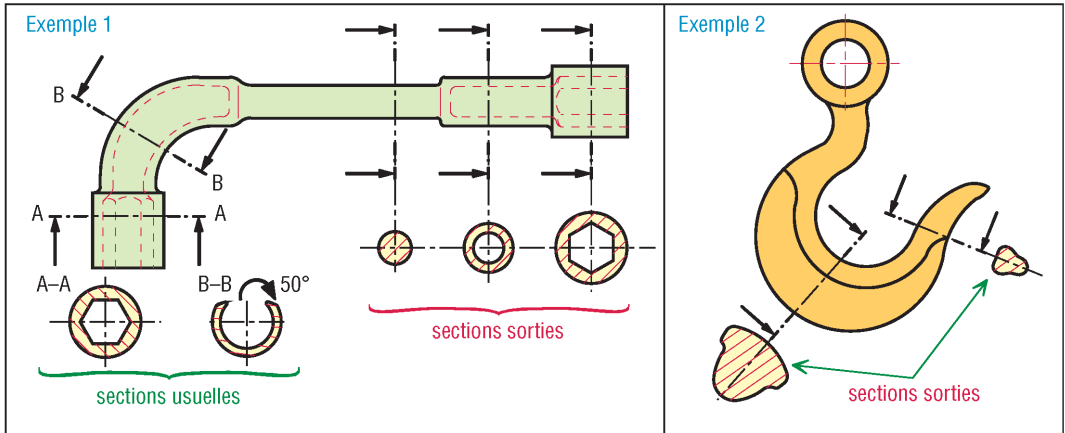
15. Principe des sections, comparaison avec les coupes, représentation normalisée.

| Tracés corrects demandés | Tracés incorrects : erreurs typiques réalisées |
|---|---|
|  |  <p>① correct pour une section</p> <p>② pointillés surabondants</p> |
|  |  |
|  |  <p>correct pour une section</p> <p>pour information</p> |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

16. Exemples typiques de tracés incorrects concernant les vues coupées.

2. Sections sorties

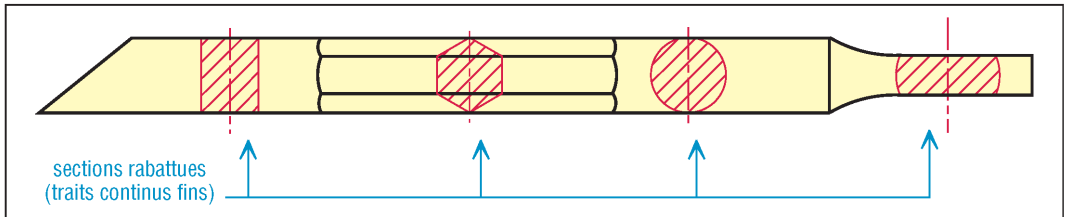
Elles sont dessinées, le plus souvent, au droit du plan de coupe si la place le permet. L'inscription du plan de coupe peut être omise.



17. Exemples de sections sorties et principe de représentation.

3. Sections rabattues

Ces sections sont dessinées en traits continus fins (pas de traits forts) directement sur la vue usuelle (en superposition). Pour plus de clarté il est parfois préférable de gommer ou d'éliminer les formes de l'objet vues sous la section ; si ces formes sont nécessaires, préférer une section sortie. L'indication du plan de coupe est en général inutile.

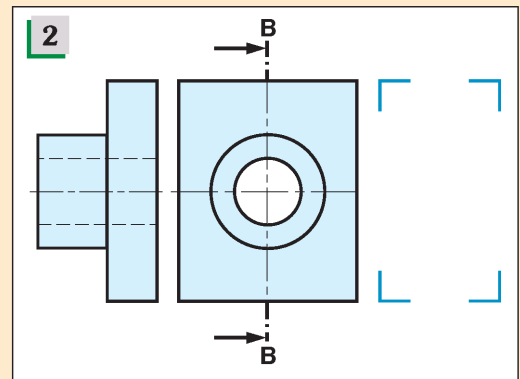
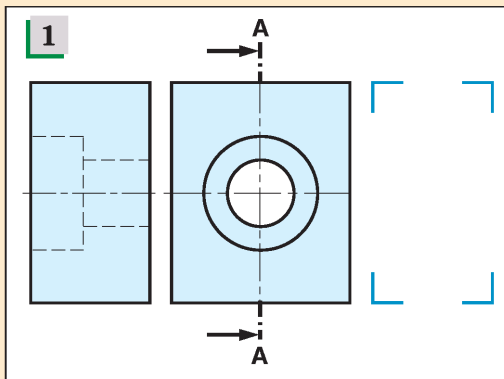


18. Exemples de sections rabattues et principe de représentation.

VIII - Exercices

Pour chaque exercice, tracer la vue coupée manquante. Utiliser le plan de coupe indiqué.

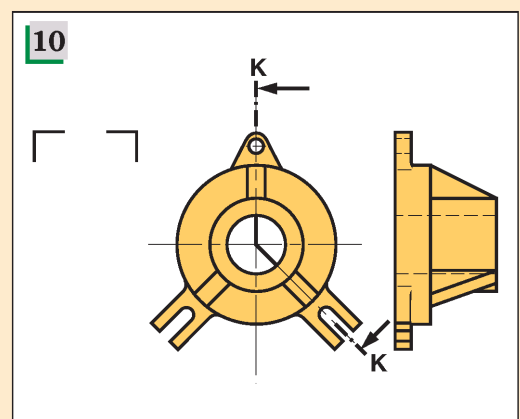
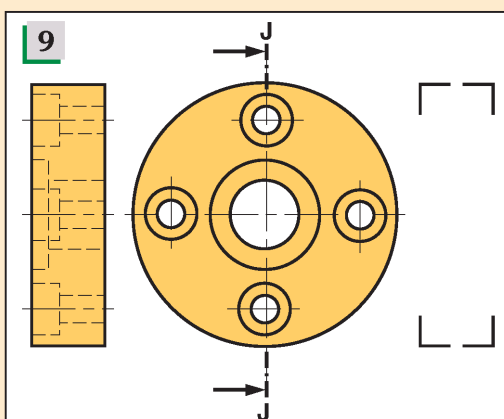
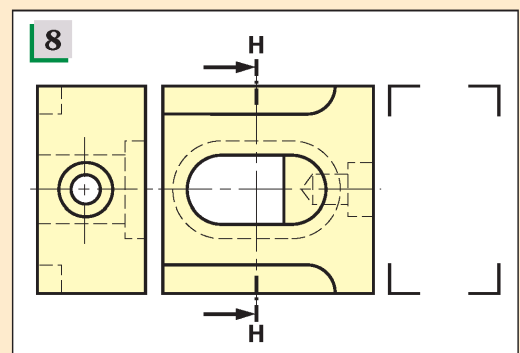
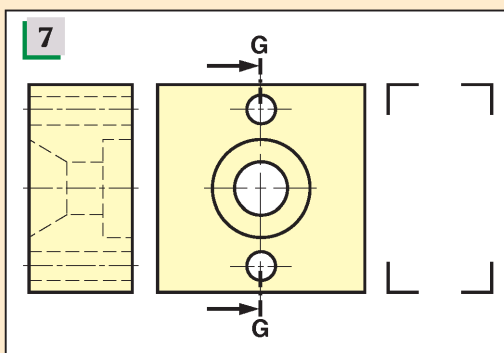
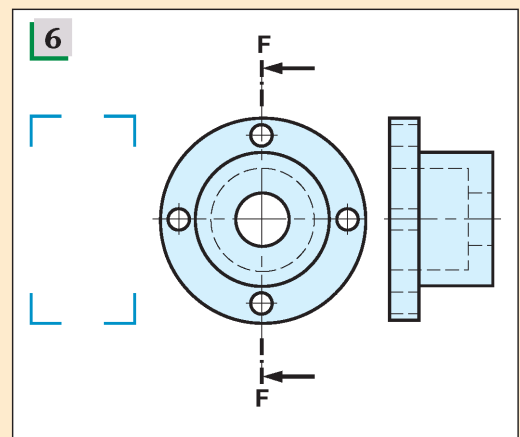
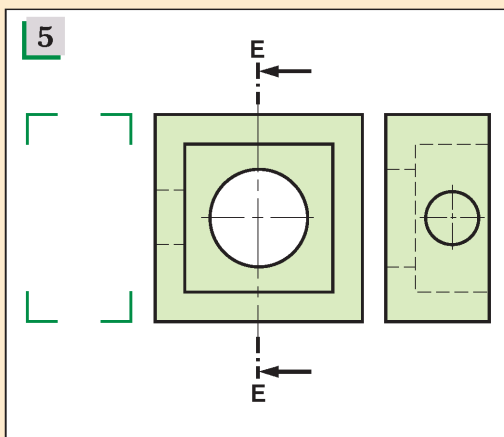
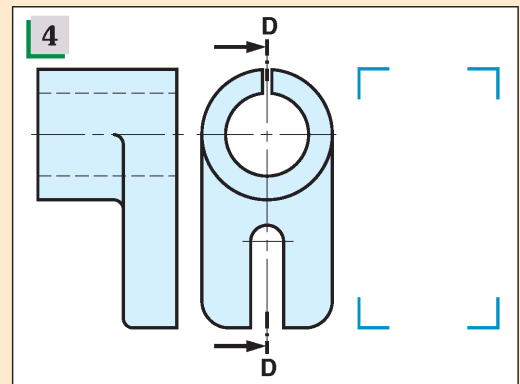
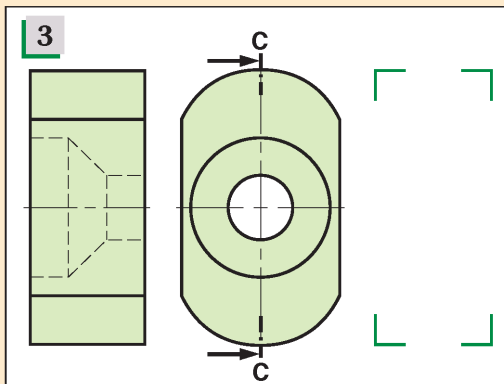
Exercices 1-2-4-5-7-11-13-14-15 : faire une coupe classique.

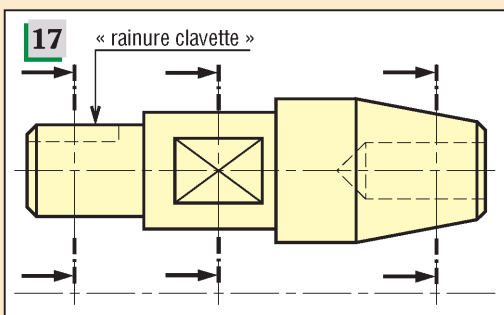
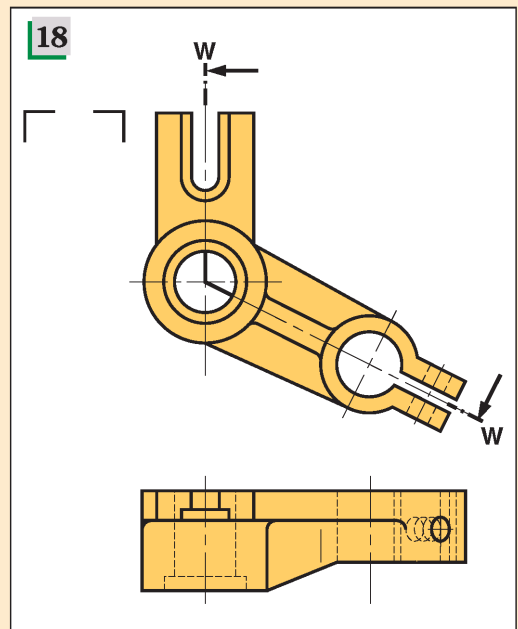
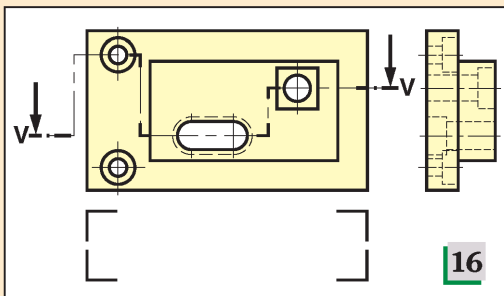
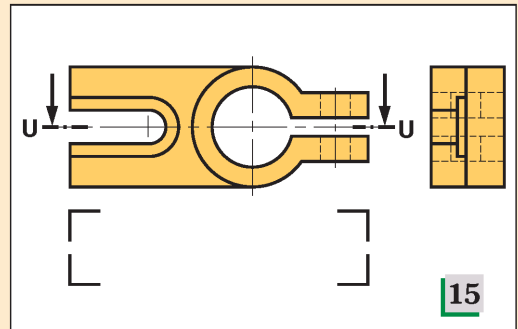
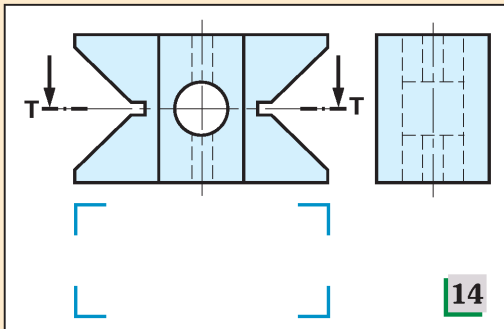
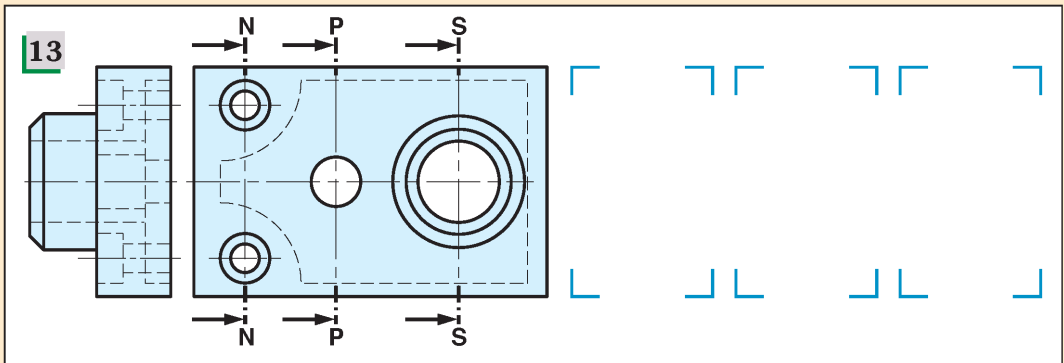
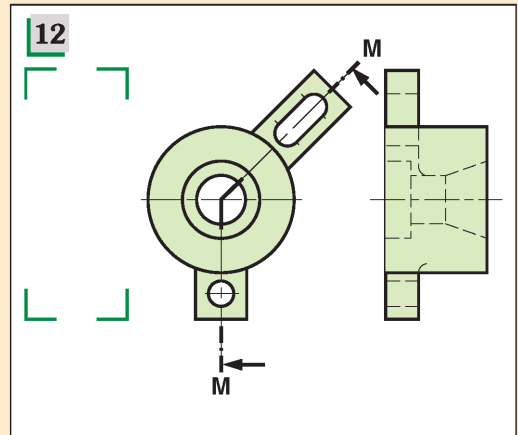
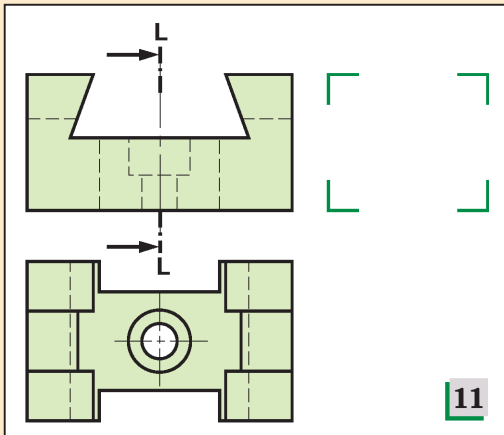


Exercices 3-6-9 : faire une demi-coupe.

Exercices 10-12-16-18 : faire une coupe brisée.

Exercice 17 : faire les sections sorties.





5

PERSPECTIVES

OBJECTIFS

- Indiquer les principaux systèmes de projection utilisés en dessin industriel.
- Décrire et préciser les caractéristiques des perspectives usuelles.
Utilisation de la CAO/DAO.

Les vues en perspective sont utilisées pour illustrer ou visualiser les objets dans leurs trois dimensions. En une seule image, elles montrent le plus de faces possibles et le maximum de renseignements. À noter qu'une description précise et rigoureuse ne peut être obtenue qu'avec le système des projections orthogonales : vue de face, gauche, etc. ; cependant, ce type de représentation est mal adapté aux non-techniciens : règles, normalisation, effort pour imaginer l'objet dans l'espace...

Les perspectives usuelles décrites dans ce chapitre et utilisées internationalement proposent une représentation suffisamment précise et scientifiquement correcte tout en restant accessibles aux non-techniciens.

En CAO/DAO ces perspectives sont dessinées et numérisées en deux dimensions (2D) et l'image obtenue à l'écran, unique et fixe, ne peut pas être changée. L'utilisation des trois dimensions (3D) offre d'autres possibilités et des perspectives d'une autre nature avec de nombreux angles d'observations possibles et modifiables.

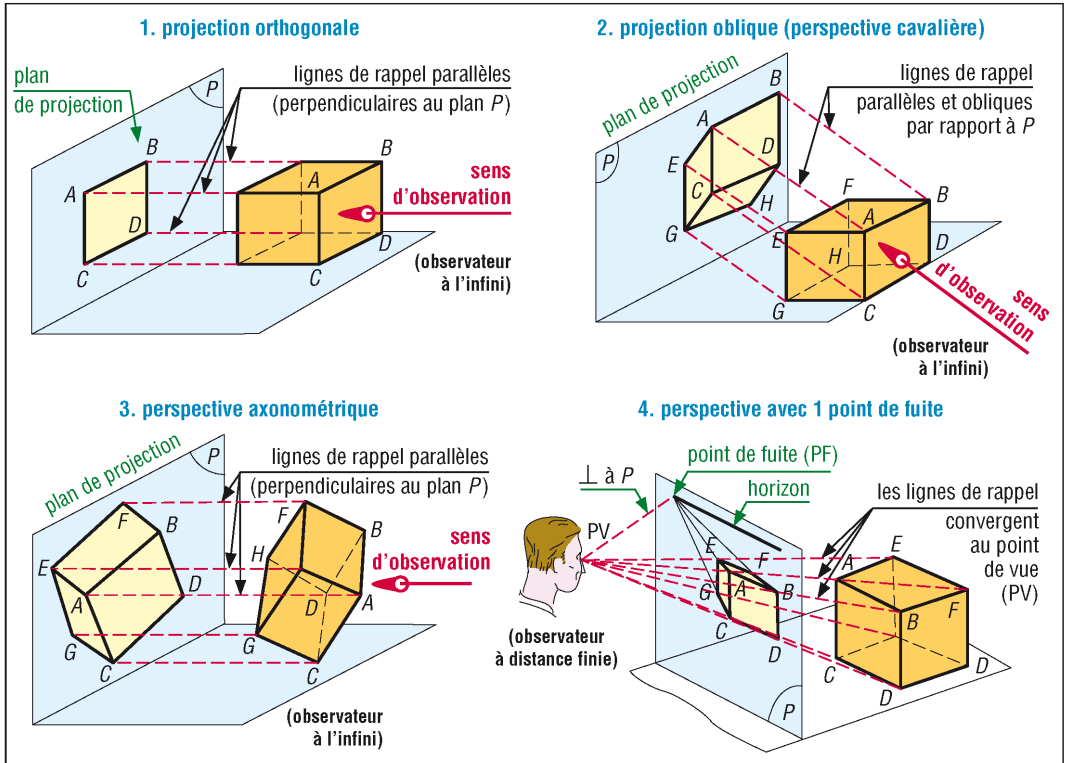
Applications : publicité, illustrations de catalogues (ventes, pièces détachées...), vues complémentaires à des projections orthogonales, implantations d'usines, « images » de présentation pour juger des objets en cours de création, etc.

I – Principaux systèmes de projection

En dessin industriel, la représentation des objets repose sur le système des projections. Les contours et les arêtes d'un objet vus par un observateur sont projetés et dessinés dans un plan appelé plan de projection (P). Ce plan peut être matérialisé par une feuille de dessin ou par la surface d'un écran.

Principaux types de projection

- Projection orthogonale (sert de base à la représentation par vues multiples et ne donne pas de vue en perspective).
- Projection oblique (cavalière...).
- Projections axonométriques (isométrique...).
- Projections avec point de fuite.



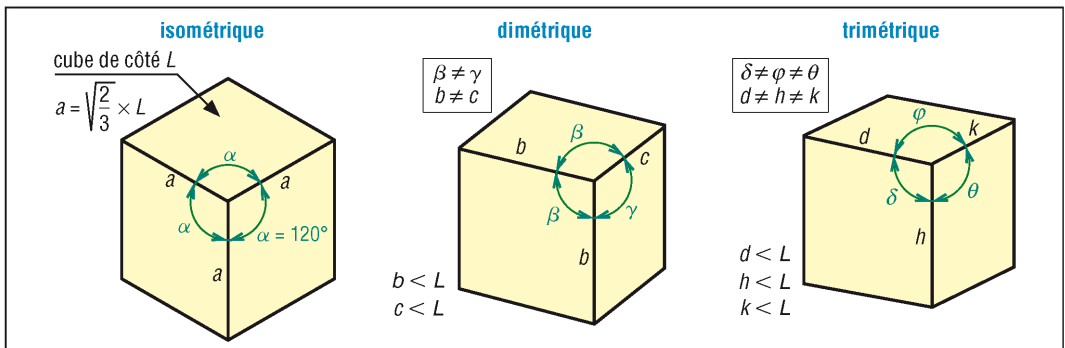
1. Les quatre types de projection.

Remarques :

- Les projections 2, 3 et 4 donnent des vues en perspective montrant en même temps plusieurs faces du même objet. En général, les faces ne se projettent pas en vraie grandeur et les angles entre arêtes peuvent devenir plus petits ou plus grands (que la réalité) selon la position de l'observateur.
- Dans les cas 1, 2 et 3 l'observateur est supposé situé à l'infini, suffisamment loin pour que toutes les lignes de rappel soient parallèles entre elles. Les lignes de rappel des cas 1 et 3 sont perpendiculaires au plan de projection (P).
- Dans le cas 4 avec point de fuite (PF), l'observateur est à distance finie. Les lignes de rappel convergent toutes vers un même point, l'œil de l'observateur, encore appelé point de vue (PV). Le segment PV-PF est perpendiculaire au plan de projection.

II - Perspectives axonométriques

Elles se divisent en trois cas : les perspectives isométriques, les perspectives dimétriques et les perspectives trimétriques.



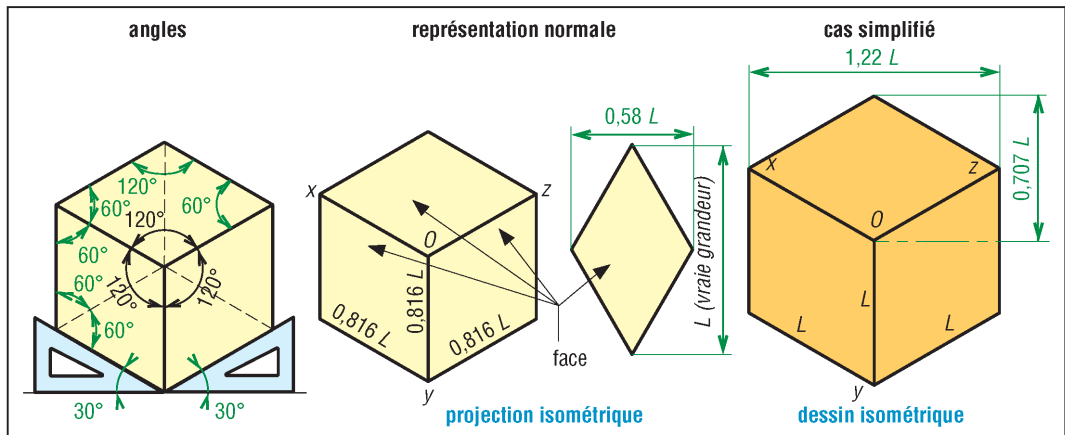
2. Différents cas de perspectives axonométriques (d'un cube de côté L).

1. Perspectives isométriques

Des trois, elles sont les plus faciles à mettre en œuvre. De ce fait, elles sont assez souvent utilisées. Les applications sont multiples et variées. De nombreux logiciels CAO/DAO possèdent des commandes spécifiques à ce type de perspectives.

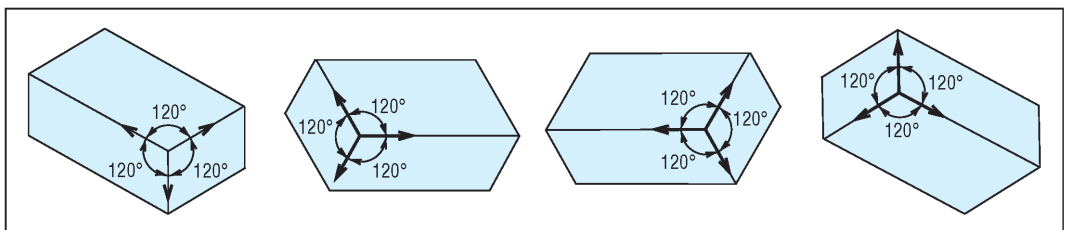
a) Caractéristiques

Conséquence de la projection, toutes les dimensions parallèles aux axes isométriques $[Ox, Oy, Oz]$ sont multipliées par $0,82 \approx 80\%$ de la dimension initiale L . En pratique trois échelles $[0,82 ; 0,58 ; 1]$ sont nécessaires pour exécuter tous les tracés (angles et dimensions).



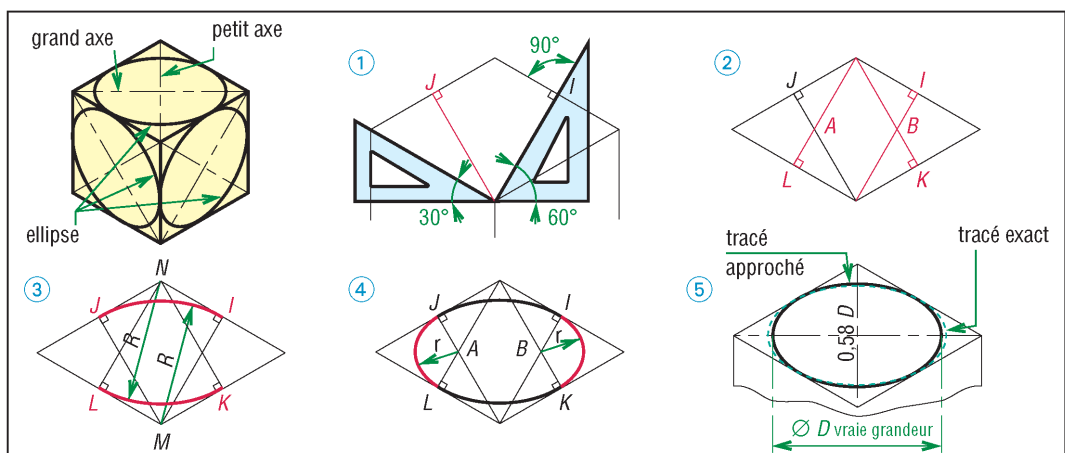
3. Caractéristiques des perspectives isométriques (L = longueur réelle de l'arête).

Les axes isométriques sont à 120° les uns des autres. L'orientation de départ devra être choisie au mieux pour décrire l'objet dans sa position naturelle. Pour certains objets de grande longueur, l'un des axes peut être choisi horizontal.



4. Positions possibles des axes isométriques.

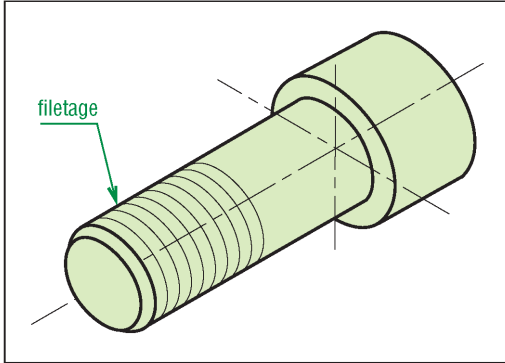
Les cercles (trous et cylindres) apparaissent en projection suivant des ellipses. Leurs propriétés sont décrites au paragraphe 5.



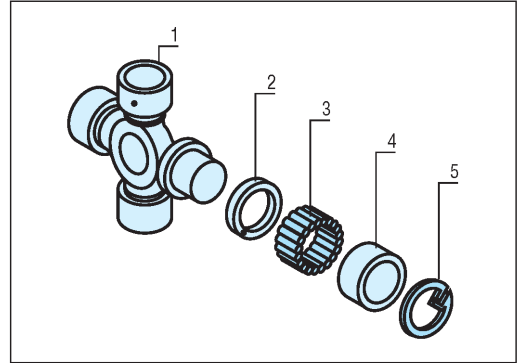
5. Ellipses isométriques : tracé approché.

b) Remarques et suggestions

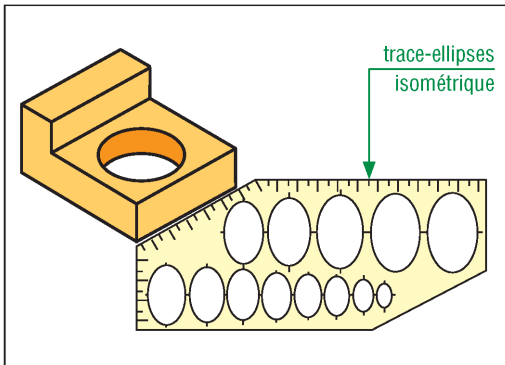
- Les traits interrompus courts sont utilisables pour décrire les parties cachées.
- Les filetages peuvent être représentés par des arcs d'ellipses en traits fins.
- Les coupes et demi-coupes sont possibles pour faire apparaître l'intérieur des objets.
- Pour plus de clarté en cotation, on trace de préférence les lignes cotes et écritures suivant les directions isométriques.
- Les canevas préimprimés permettent de faire plus rapidement les tracés en dessin manuel.



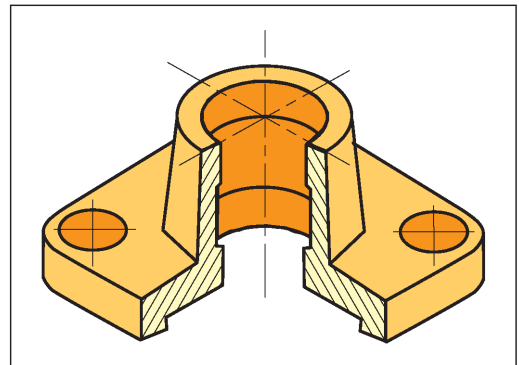
6. Exemple avec filetage en trait fin.



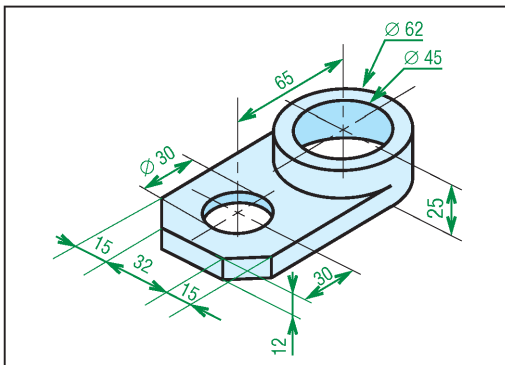
7. Assemblage explosé isométrique.



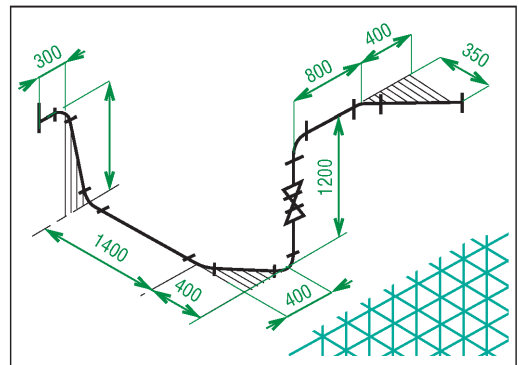
8. Trace-ellipses isométriques : 35° 16'.



9. Exemple avec quart coupé.



10. Exemple de cotation (parallèles aux axes).



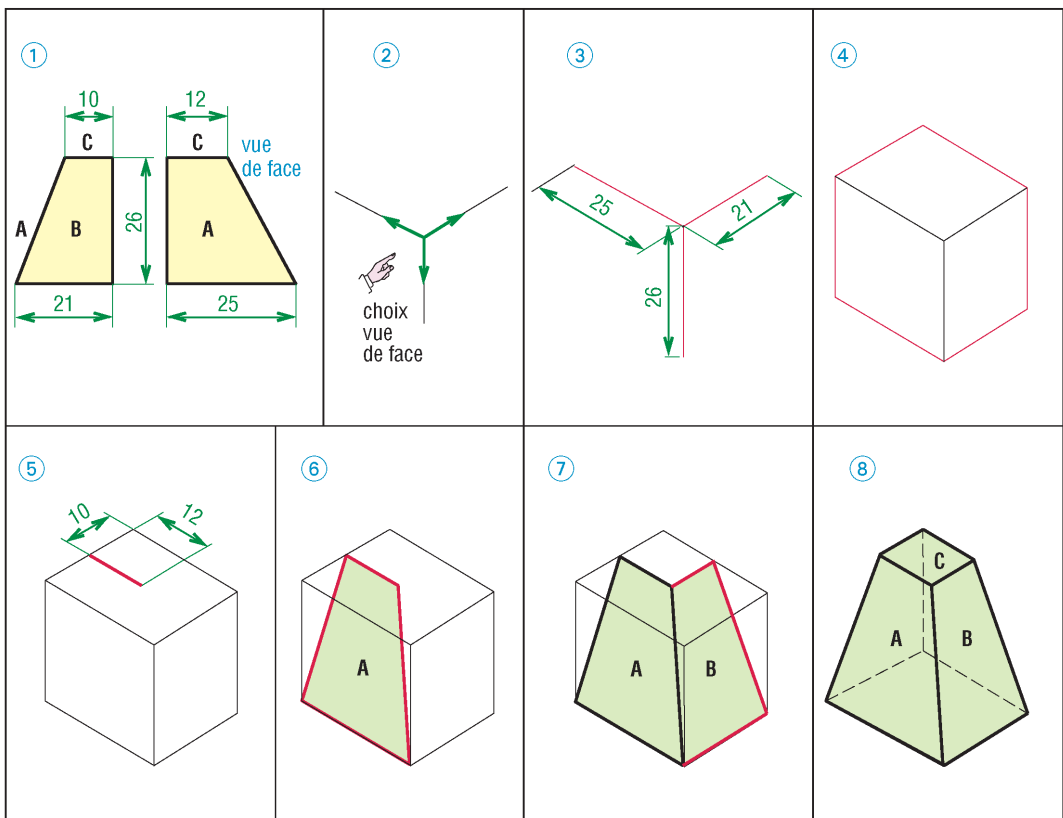
11. Tuyauterie sur canevas isométrique préimprimé.

2. Dessins isométriques

Dans le but de simplifier les tracés il est fréquent de ne pas utiliser les échelles précédentes [0,82 ; 0,58 ; 1]. Les tracés sont réalisés à partir des échelles [1 ; 0,707 ; 1,22] et les arêtes de l'objet (tracés les plus fréquents), parallèles aux axes, sont dessinées en vraie grandeur (x 1).

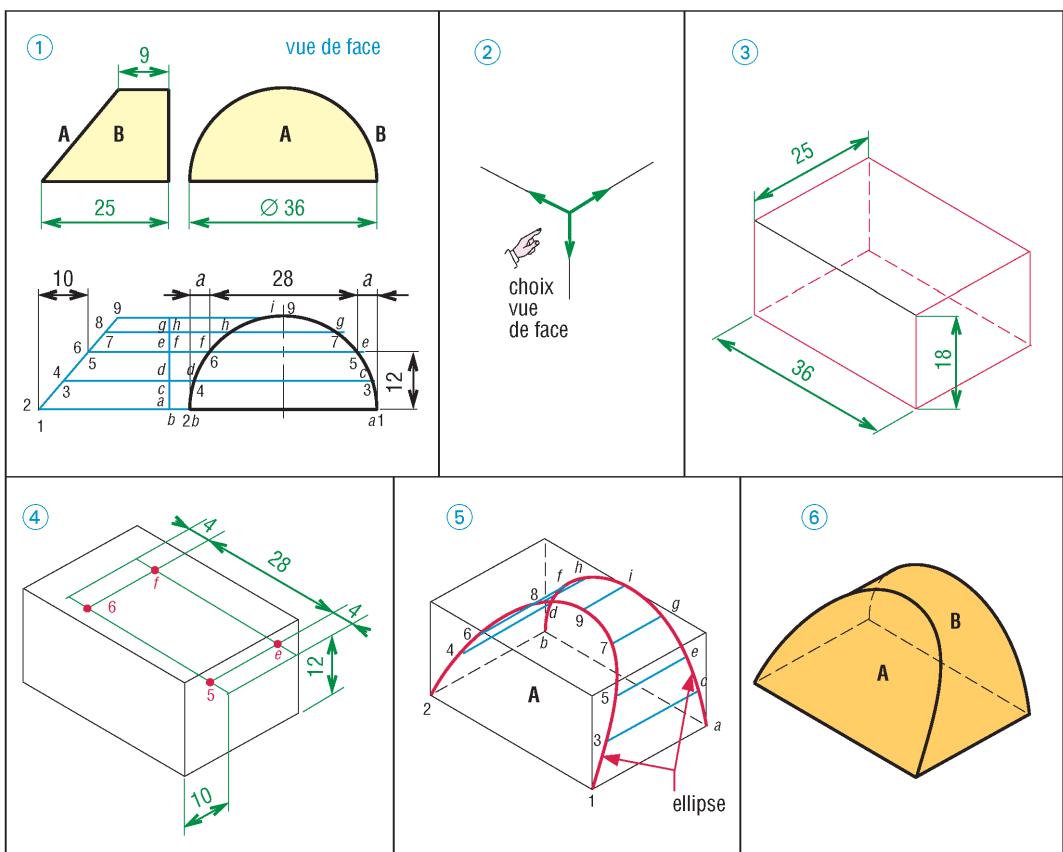
Le dessin isométrique obtenu est identique à la perspective isométrique mais environ 25 % plus grand. Les propriétés et remarques précédentes sont conservées.

a) Exemple 1



12. Étapes de construction du dessin isométrique d'un objet prismatique.

b) Exemple 2



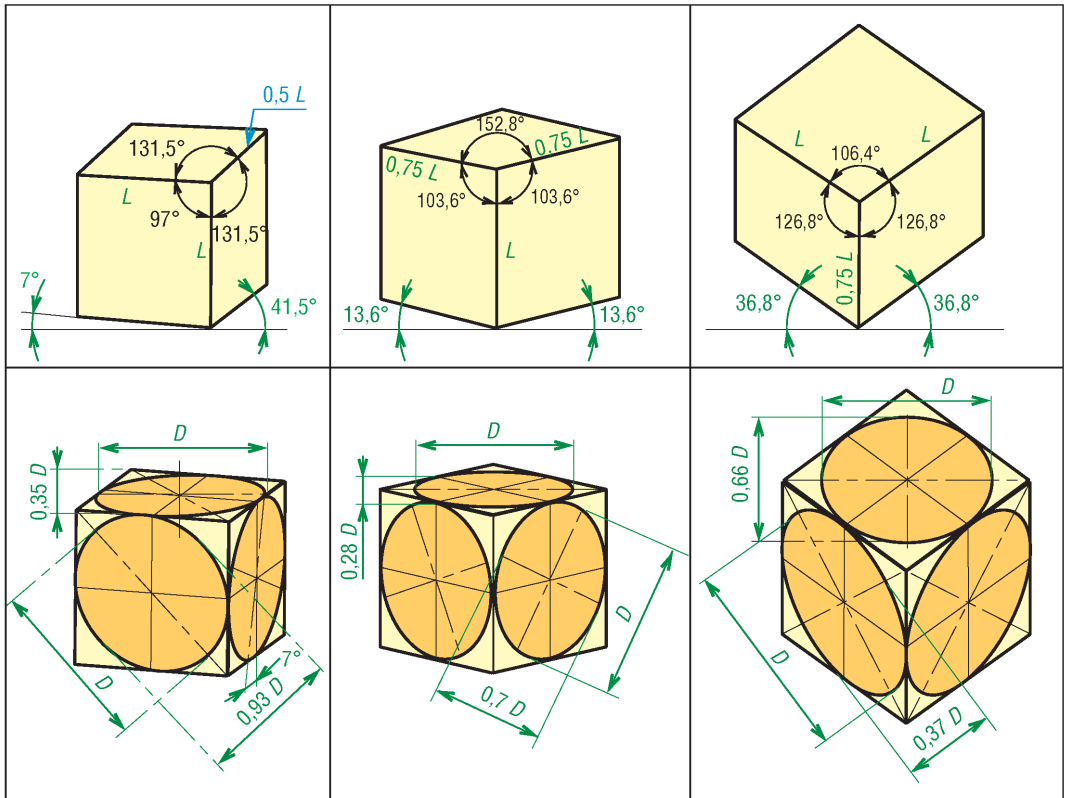
13. Étapes de construction du dessin isométrique d'un objet cylindrique.

3. Perspectives dimétriques

Elles sont intéressantes lorsque l'on souhaite mettre en valeur l'une des faces de l'objet mais elles demandent plus de travail que les précédentes.

a) Principe

Les axes dimétriques possèdent deux angles égaux parmi les trois qui les positionnent : en général deux grands angles plus un petit. De nombreuses combinaisons sont possibles. Pour les plus usuelles, il existe des canevas et des trace-ellipses standards. Le plus souvent l'un des axes est placé verticalement.



14. Perspectives dimétriques : cas usuels. Celle avec 7° et $41,5^\circ$ (ou 42°) est recommandée par l'ISO.

Remarque : la projection des arêtes, parallèles aux axes, exige deux échelles différentes ; une échelle est commune à deux des trois axes. Les cercles se projettent aussi suivant deux types d'ellipses. En pratique six échelles sont nécessaires pour exécuter tous les tracés.

b) Dessin dimétrique

Les tracés sont simplifiés si on utilise un dessin dimétrique plutôt qu'une projection dimétrique. Nous retrouvons la même démarche qu'entre dessin isométrique et perspective isométrique. Les dimensions sont reportées en vraies grandeurs sur deux des axes, le troisième ayant une échelle particulière.

4. Perspectives trimétriques

Les axes trimétriques se positionnent entre eux par trois angles différents. De nombreuses combinaisons et un nombre infini de positions sont possibles. La projection des seules arêtes exige trois échelles différentes (une par axe). En pratique neuf échelles sont nécessaires pour exécuter tous les tracés.

Si les angles et les échelles ne sont pas trop difficiles à déterminer, par contre la grande variété des ellipses possibles est un facteur dissuasif en exécution manuelle. Ce type de perspective est plus facile à envisager en CAO/DAO 3D.

5. Tracés des ellipses

Pour toutes les perspectives précédentes, les cercles (cylindres ou trous) non observés en vraie grandeur apparaissent en projection sous forme d'ellipses.

a) Propriétés

Le grand axe de l'ellipse est toujours perpendiculaire à l'axe de révolution du cylindre ou trou. Sa longueur est égale au diamètre réel « $\varnothing D$ » du trou.

Le petit axe de l'ellipse est toujours perpendiculaire au grand axe et de ce fait coïncide avec l'axe du trou.

b) Tracés

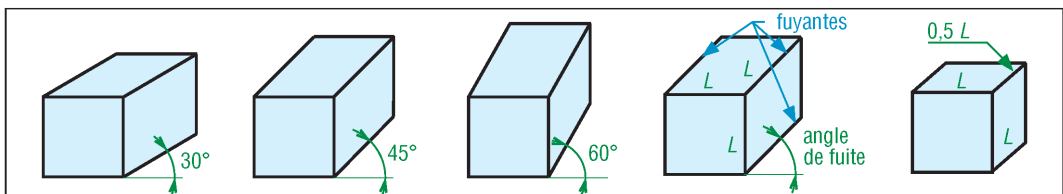
À la main, le tracé des ellipses peut être réalisé point par point (voir chapitre 1 : dessin manuel, généralités.) ou par une méthode approchée (paragraphe II. 1) ou encore avec un trace-ellipses standard adapté (le plus facile). En CAO/DAO les logiciels possèdent des commandes spécifiques (Ellipse...).

III - Projection oblique et perspective cavalière

1. Principe

La face principale de l'objet, parallèle au plan de projection, est projetée en vraie grandeur, les autres faces sont déformées. Les lignes de projection, parallèles entre elles, sont inclinées ou obliques par rapport au plan de projection (P).

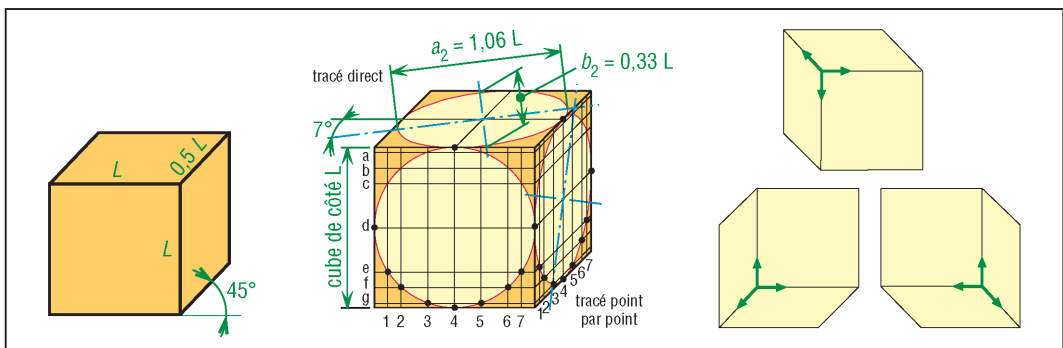
Suivant le point d'observation choisi, l'angle de fuite et la longueur des fuyantes (arêtes perpendiculaires au plan de projection) sont variables).



15. Principe de la projection oblique.

2. Perspective cavalière

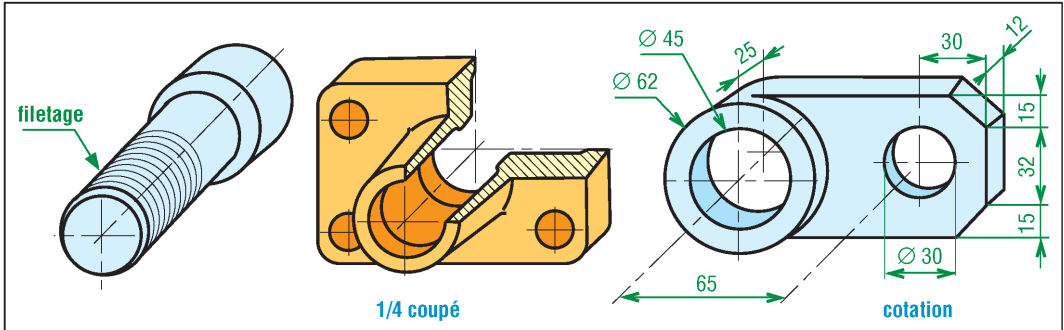
Datant de l'époque médiévale, elle est la plus ancienne de toutes les perspectives et la plus facile à mettre en œuvre. Avec un angle de fuite à 45° et des fuyantes en demi-grandeur ($0,5 L$), c'est la projection oblique qui donne le meilleur effet de perspective.



16. Perspective cavalière. b_2 (petit axe ellipse) est perpendiculaire à a_2 (grand axe).

Remarques :

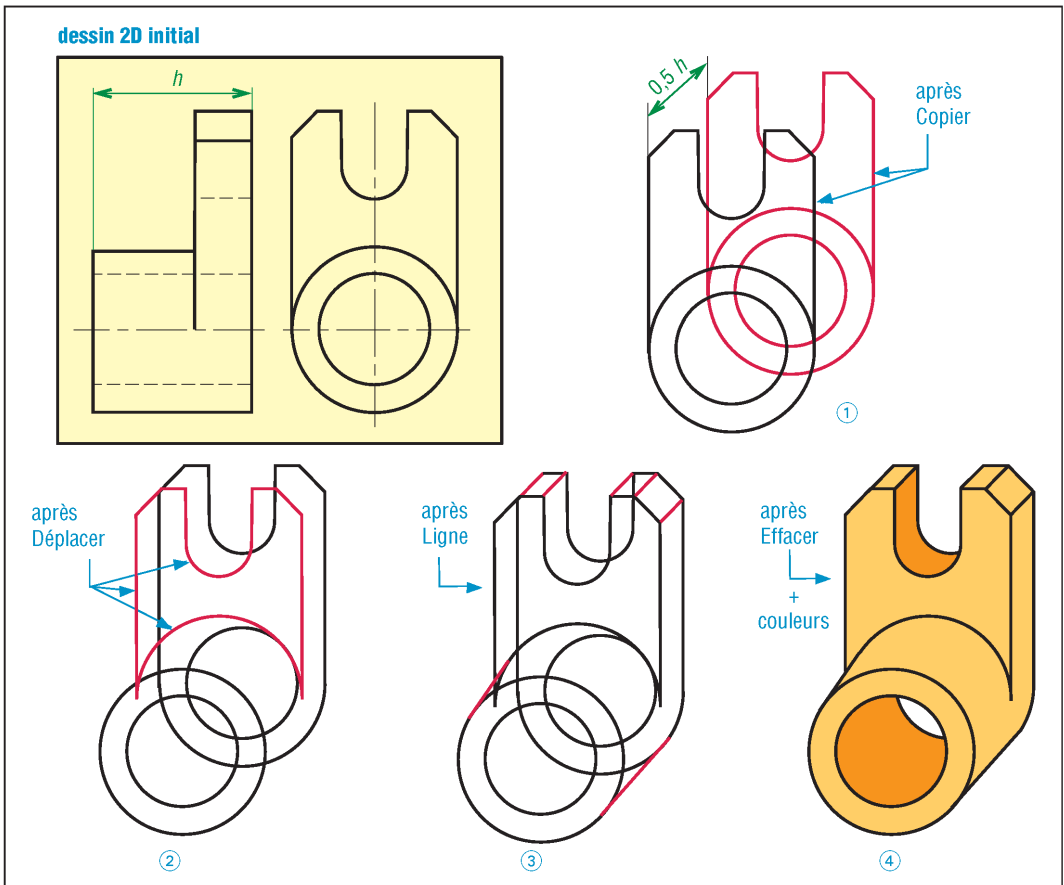
- Afin de simplifier les tracés, il faut placer les faces les plus complexes de l'objet (formes cylindriques...) parallèles au plan de projection (dessin en vraie grandeur plus facile, pas de déformation, pas d'ellipses...).
- Si le tracé des ellipses est inévitable, plusieurs méthodes sont utilisables : construction point par point (quadrillage...), trace-ellipses...
- Les coupes et demi-coupes sont possibles. Les filetages peuvent être dessinés par des cercles (ellipses) en traits fins. En cas de cotation placer de préférence les lignes-cotes et les écritures dans la même direction que les axes principaux (fuyantes...) de la perspective.



17. Exemple de filetage, 1/4 coupé et cotation en perspective cavalière.

3. Perspective cavalière et CAO/DAO 2D

En CAO/DAO, une perspective cavalière peut facilement être construite à partir d'une vue 2D connue en utilisant les commandes du type Copier, Déplacer, Effacer, Lignes...



18. Construction d'une perspective cavalière à partir d'un dessin 2D en CAO/DAO.

6

LOGICIELS CAO/DAO - 3D

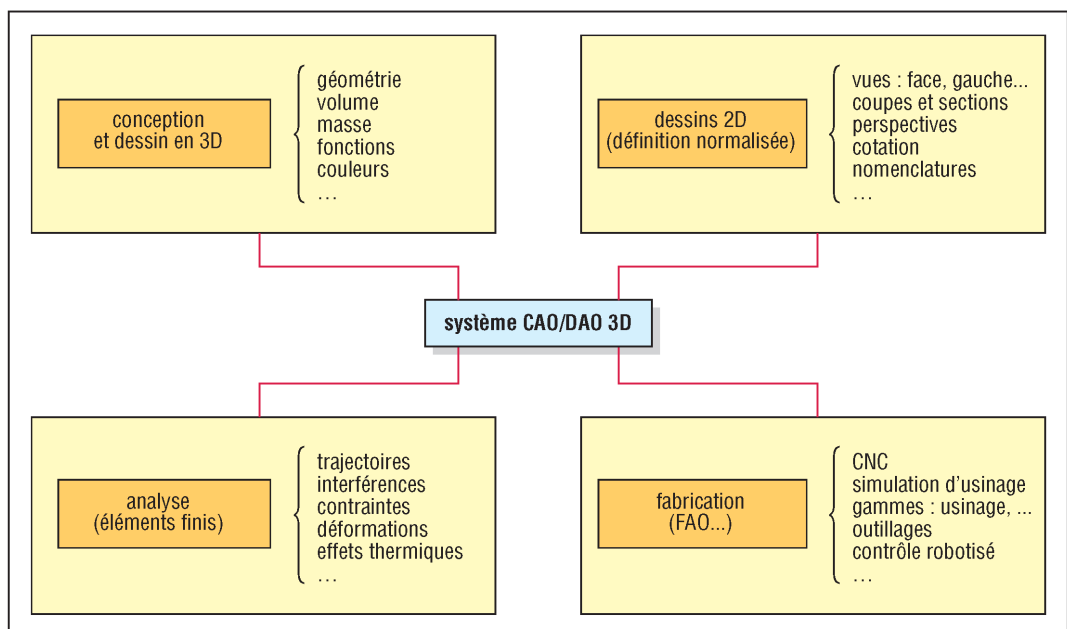
OBJECTIFS

- Comparer la CAO/DAO 2D et la CAO/DAO 3D.
- Décrire les possibilités d'affichage des logiciels 3D.
- Développer les modes de création des objets 3D : esquisse, arbre de création, fonctions de création, mode assemblage...
- Donner des éléments sur la fonction « Mise en page ».

En CAO/DAO -3D un objet est défini et mémorisé (banque de données) dans les trois dimensions de l'espace (x, y, z) et peut, selon le choix de l'utilisateur, apparaître à l'écran en perspective ou en vue plane (projection orthogonale).

Le 3D est avantageux pour concevoir des objets ou des implantations complexes (architecture, usines, etc.). Il permet de prévoir des jeux et des interférences entre composants, faire des simulations de mouvements, de fonctionnement, faire des calculs, faire des tests de résistance, de déformation, thermique par exemple, des images de synthèse...

Remarque : il existe de nombreux logiciels CAO/DAO 3D de complexité variable. La plupart sont orientés conception et simulation. Un grand nombre de commandes décrites dans la suite de ce chapitre, communes à de nombreux logiciels, sont extraites de « Solidworks ».



1. Principales applications de la CAO/DAO -3D.

I - Comparaison entre CAO/DAO -3D et CAO/DAO -2D

1. CAO/DAO -2D

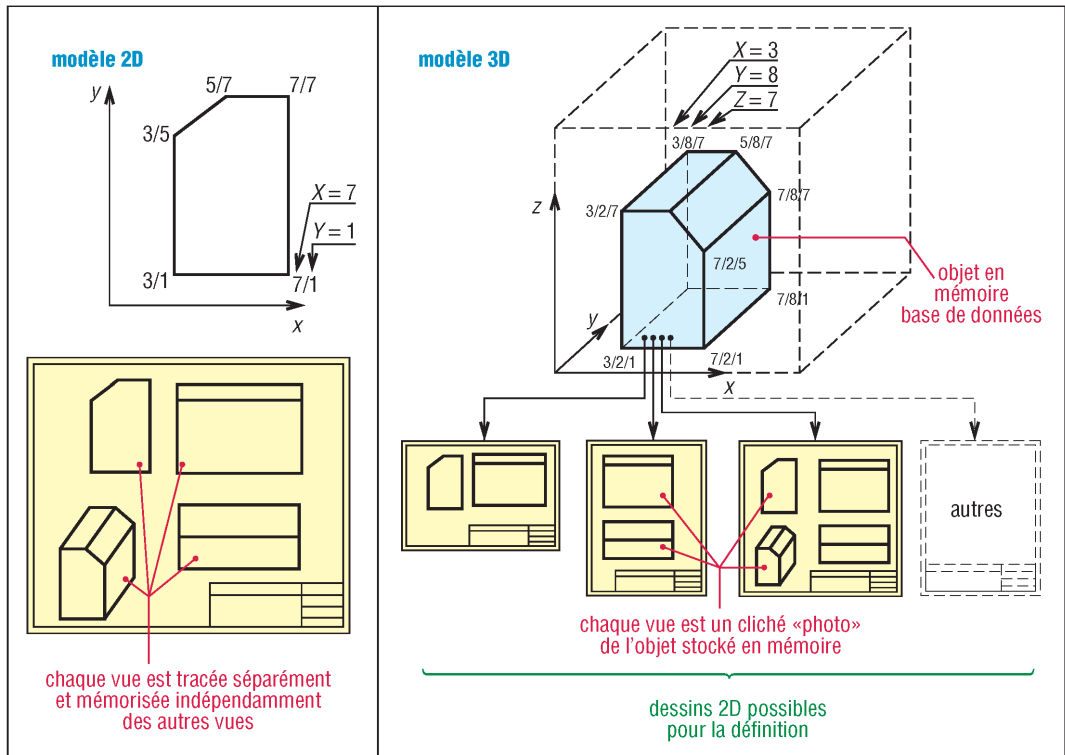
Contrairement aux 3D, les logiciels 2D ne peuvent pas construire ou générer automatiquement une vue supplémentaire à celles déjà affichées à l'écran. Chaque vue doit être créée individuellement et le système n'établit aucune relation ou lien entre les différentes vues tracées. Les systèmes 2D ne reconnaissent uniquement que des formes définies par des points, lignes et courbes contenues dans un même plan.

Remarque : plus faciles à mettre en œuvre, les 2D sont plus orientés dessin pur avec création de vues ou images planes diverses (vues ISO, schémas, BD...) souvent destinées à l'impression papier. Ils suffisent à de nombreuses applications graphiques usuelles.

2. CAO/DAO -3D

Une fois un objet 3D mis en mémoire (base de données), celui-ci peut être manipulé, tourné, translaté, agrandi, modifié. Toute vue dessinée à l'écran doit être considérée comme une image choisie parmi beaucoup d'autres possibles. Cette vue n'est pas figée comme en 2D et il est possible de la changer à tout moment.

Les 3D, plus difficiles à mettre en œuvre, sont plutôt orientés conception/simulation que dessin. Leur usage est plus informatique et «écran», avec notamment les animations.



2. Comparaison entre 2D et 3D.

De nombreux logiciels CAO/DAO contiennent à la fois un module 2D et un module 3D, les deux y étant complémentaires.

Le 2D permet, grâce à de nombreuses commandes «dessin», de tracer plus facilement les esquisses planes aux formes complexes. Les contours ou profils définis sont ensuite appelés par le 3D pour construire ou générer les volumes (extrusion, révolution...).

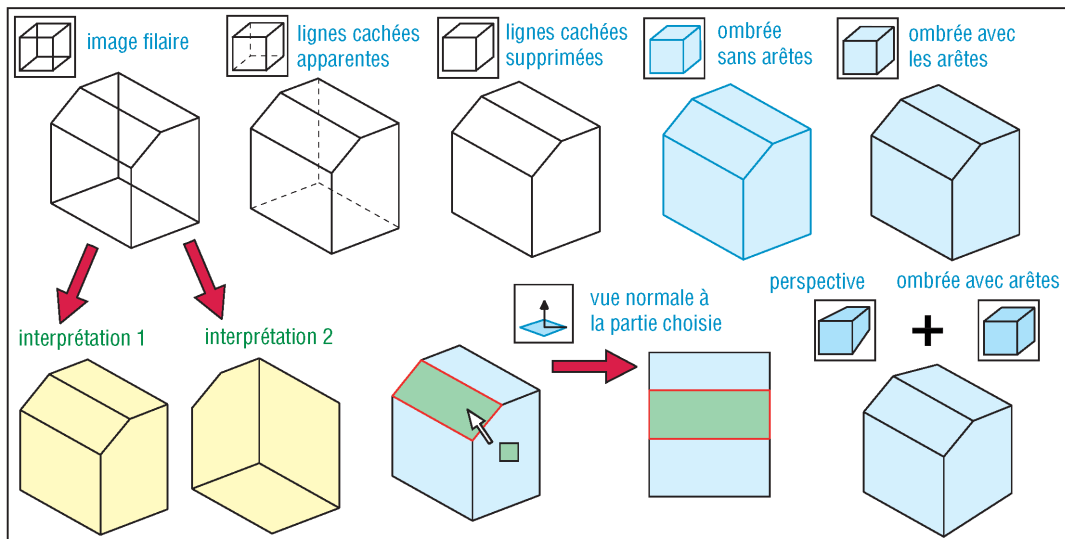
II - Affichage, visualisation à l'écran

1. Principales commandes

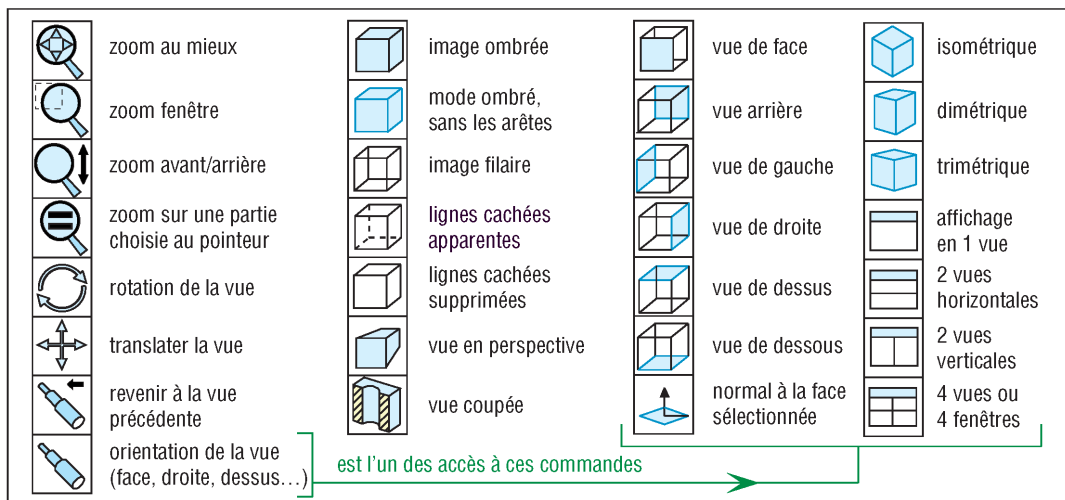
Les commandes d'affichages des logiciels 2D sont essentiellement liées à la fonction Zoom (fenêtre, total...). Les 3D proposent deux autres familles pour visualiser les objets.

L'utilisateur dispose d'abord d'une série de commandes permettant de modifier facilement le point de vue de l'objet, soit par rotation autour d'un point central, soit par choix direct d'une vue particulière (face, droite, dessus, isométrique...).

Une fois le point d'observation choisi, l'utilisateur dispose en plus d'une série de commandes pouvant modifier le rendu ou l'aspect de l'objet observé (mode filaire, ombré...).



3. Exemples usuels de commandes de modes d'affichages en 3D.



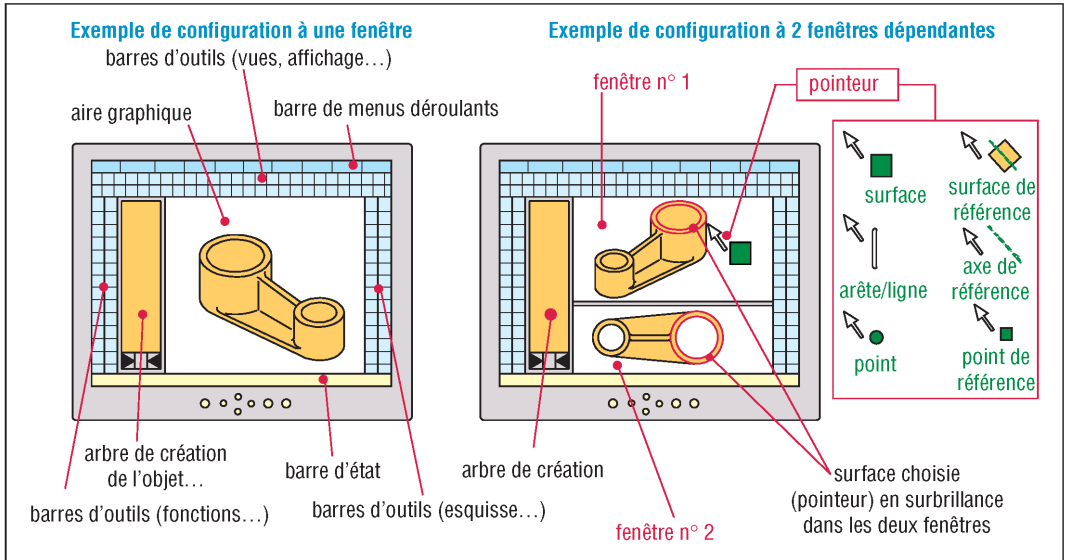
4. Exemples de commandes d'affichage ou de visualisation typiques en 3D.

2. Multi-fenêtrage

La zone graphique à l'écran peut être divisée en plusieurs fenêtres de travail dont le nombre, la position (cascade, mosaïque) et les dimensions sont modifiables à tout instant.

Dans chaque fenêtre, on peut faire apparaître une vue différente du même objet pour simplifier le travail de création en travaillant en même temps dans plusieurs fenêtres.

Chaque fenêtre peut aussi recevoir un composant différent ou divers sous-ensembles de pièces afin de réaliser des assemblages ou des ensembles complexes.



5. Exemples de configurations d'écran en 3D et affichage du pointeur.

III - Création ou obtention des objets 3D

Cas usuels pour construire et définir les objets 3D :

- extrusion : à partir d'un contour ou profil 2D on donne de l'épaisseur à l'objet.
- révolution : à partir d'un contour ou profil 2D que l'on fait tourner autour d'un axe.
- utilisation de volumes élémentaires : cône, sphère, parallélépipède, tore...
- assemblage de volumes primitifs (opérations booléennes : union, soustraction, intersection).

1. Mode esquisse

En 3D, ce mode utilise un ensemble de commandes 2D (dessin) pour tracer les contours et profils nécessaires à la création des volumes ou surfaces (extrusion, révolution...).

Une esquisse est un dessin tracé dans un plan ou sur une face choisie de l'objet en construction. La géométrie peut être contrainte par des cotes et des relations géométriques (coaxialité...), qui sont des paramètres modifiables après construction (« éditer l'esquisse »).

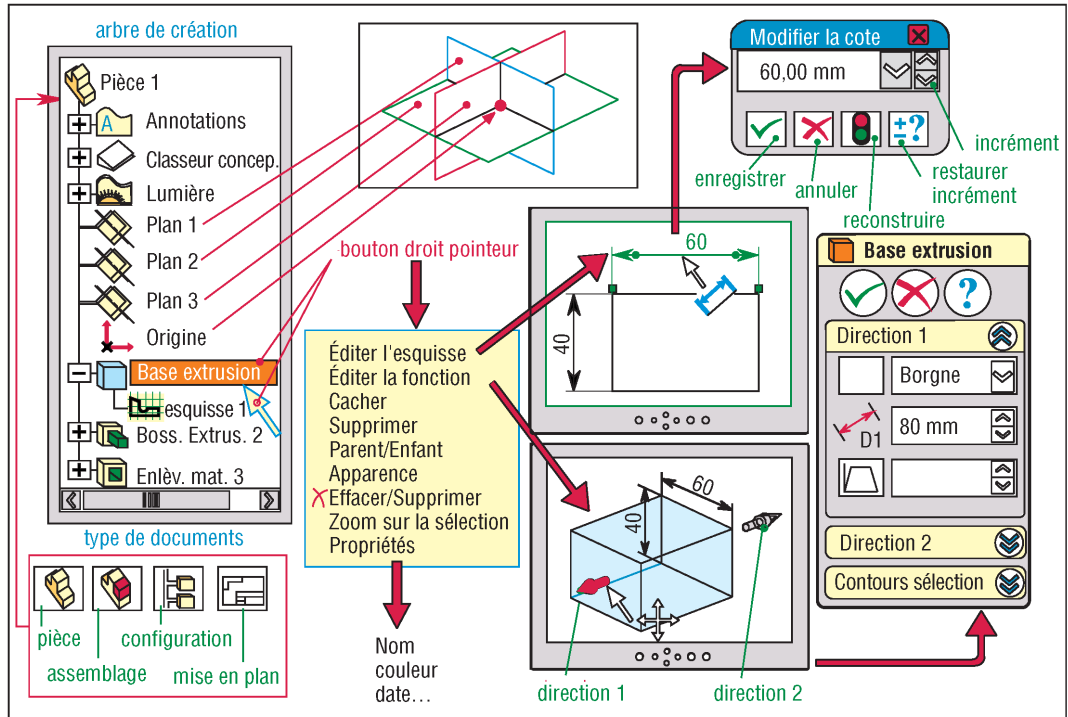
| | | | | | | | |
|--|------------------------------------|--|------------------|--|-----------------------|--|--------------------|
| | sélectionner un objet | | ligne | | parabole | | couper |
| | grille / aimanté | | arc par centre | | point | | prolonger |
| | créer / éditer une esquisse | | arc par 3 points | | ligne de construction | | couper |
| | créer / éditer esquisse 3D | | arc tangent | | congé | | déplacer entités |
| | déplacement sans résolution | | rectangle | | chanfrein | | pivoter entités |
| | met à l'échelle, translate, pivote | | parallélogramme | | décaler | | copier entités |
| | ajouter des relations | | cercle | | symétrie | | mettre à l'échelle |
| | afficher / supprimer des relations | | ellipse | | courbe d'intersection | | convertir entités |
| | introduire une cote (contrainte) | | polygone | | réseau rectangulaire | | convertir entités |
| | | | spline | | réseau polaire | | texte |

6. Mode esquisse et principales commandes 2D correspondantes.

2. Arbre de création

Il décrit toutes les étapes du processus d'élaboration d'une pièce ou d'un assemblage avec l'ensemble des esquisses correspondantes, fonctions de création, cotes, relations géométriques et contraintes imposées lors de la construction.

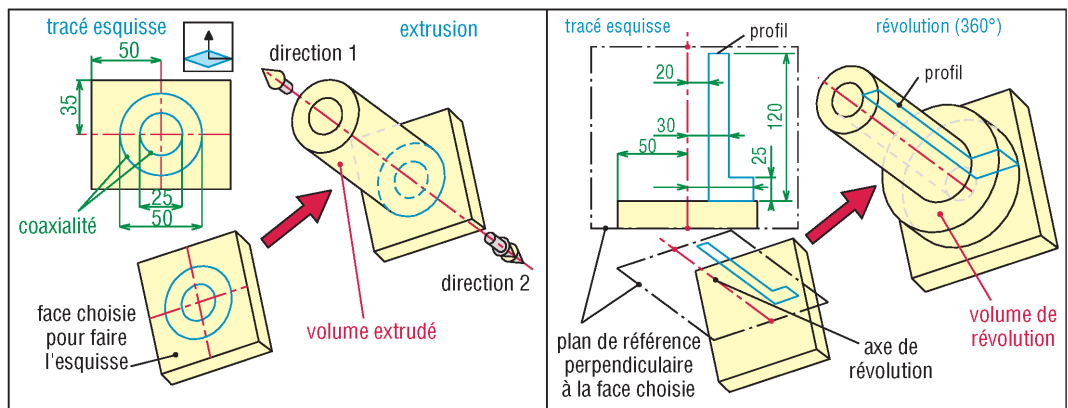
Interactif, il permet, si besoin, de modifier les paramètres précédents (Éditer l'esquisse ; Éditer la définition ; propriétés...) et reconstruire l'objet avec de nouvelles valeurs.



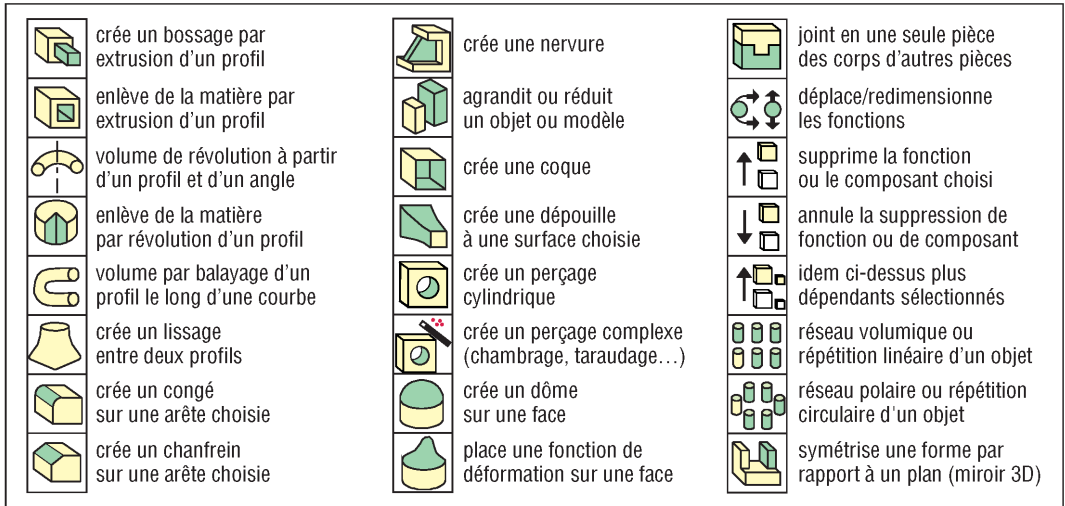
7. Exemple d'arbre de création d'un objet, pièce ou composant et modifications typiques.

3. Modelleur volumique ou modèle volumique

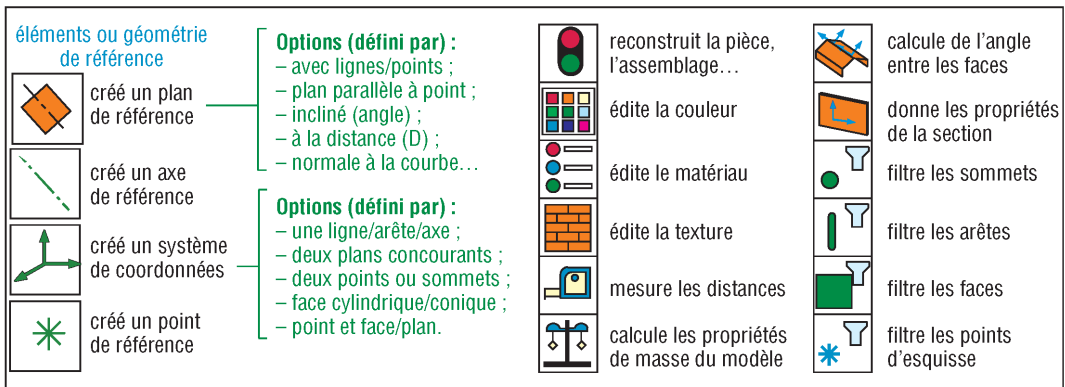
Les objets sont facilement créés par extrusion, révolution, combinaisons des primitives volumiques de base (cône, sphère...) et utilisation des opérateurs booléens (union, soustraction ou différence, intersection). Le modèle volumique définit complètement le volume de l'objet, différencie l'extérieur et l'intérieur, enlève automatiquement les parties cachées, distingue les faces, fait des ombrages, propose un grand choix de couleur... Il peut réaliser un grand nombre de calculs (masse, volume, centre de gravité, moments d'inertie...), d'analyses (contraintes...), de simulations (mécanismes en mouvement, trajectoires d'outils, interférences...), de tests et d'interfaçages divers (FAO...).



8. Principes des créations par extrusion et révolution.



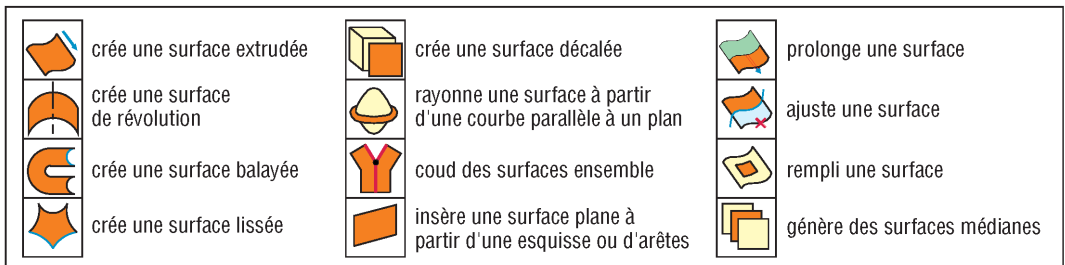
9. Principales fonctions de création de volumes.



10. Commandes utilisées pour définir les éléments de référence et outils divers.

4. Modeleur surfacique ou modèle surfacique

- **Surface maillée** : surface construite ou générée à partir de deux familles de courbes (tous types sans restriction) pas nécessairement parallèles et qui se croisent orthogonalement ou non.
- **Surface réglée** : surface construite ou générée par une ligne droite (sorte de règle) qui se déplace de façon donnée en prenant appui sur deux courbes choisies à préciser.
- **Surface extrudée** : basée sur le principe de l'extrusion, c'est une surface construite à partir d'un profil de départ et d'une génératrice (vecteur de direction) qui précise l'épaisseur.
- **Surface de révolution** : surface obtenue en faisant tourner un profil choisi autour d'un axe. L'angle de rotation peut être choisi entre 0 et 360°.
- **Surface de Bézier** : surface reliant quatre courbes successives de l'espace données. La surface est délimitée par les quatre courbes et les quatre coins correspondants. Des surfaces plus complexes peuvent être construites à partir de plusieurs surfaces de Bézier tangentes entre elles.
- **Surface développable** : surface que l'on peut développer sous forme plane (chaudronnerie...).



11. Exemples de commandes utilisées pour l'élaboration des surfaces.

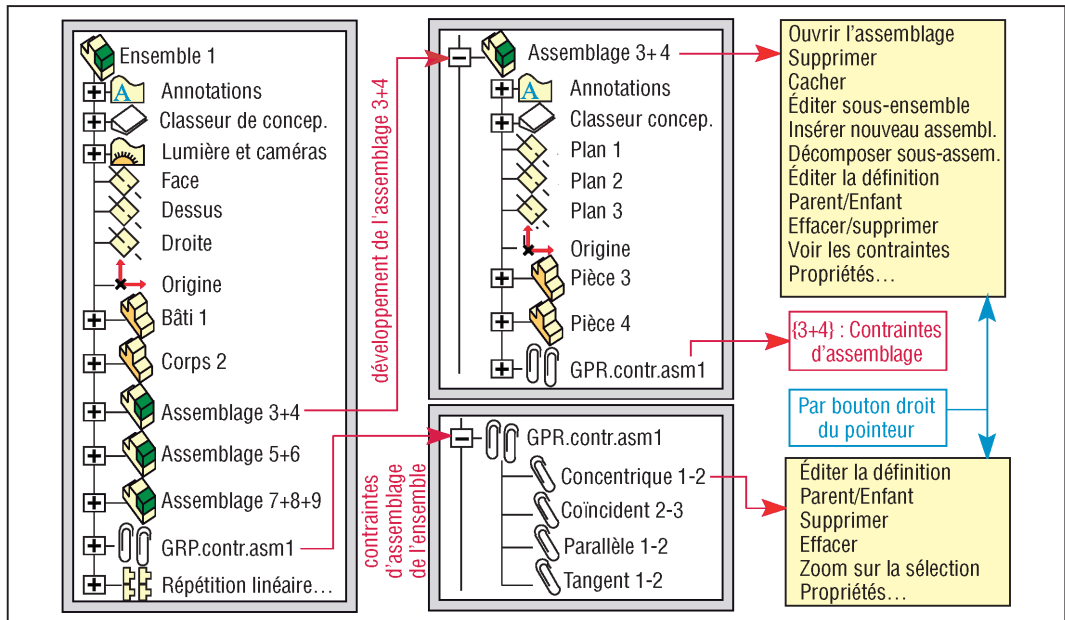
IV - Assemblages

Après avoir créé individuellement chacun des composants d'un assemblage, la première opération consiste à les rassembler dans un même document (fichier) spécial « assemblage ».

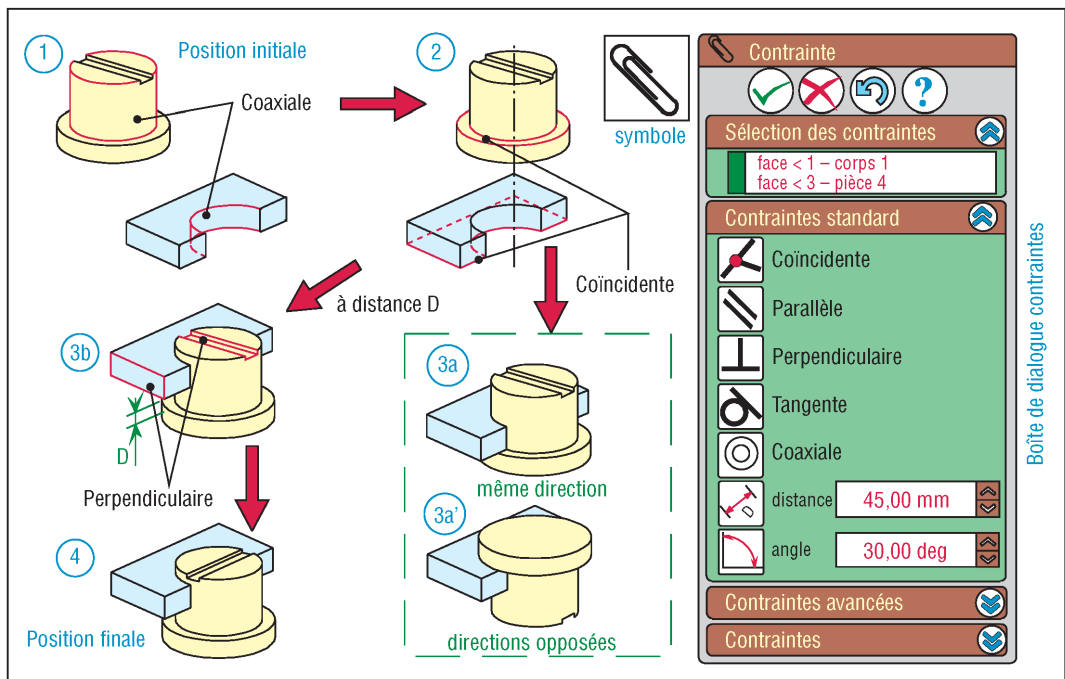
Une fois réunis, les composants sont ensuite assemblés les uns aux autres par l'intermédiaire de contraintes d'assemblage (fig. 13) : concentricité des surfaces de liaison, coïncidence, etc.

Une fois assemblées, les pièces peuvent être « fixées » en position (tout déplacement relatif devient interdit), ou, au besoin « libérées » s'il faut à nouveau les déplacer.

L'arbre de création d'un assemblage regroupe les arbres de création de chaque composant et les contraintes utilisées lors des assemblages. Il permet toujours de revenir en arrière (éditer) afin de modifier composants ou contraintes tout en veillant à la validité des transformations.



12. Exemple d'arbre de création d'un assemblage de composants ou pièces.



13. Exemples de contraintes utilisées pour positionner les éléments d'un assemblage ou d'une esquisse.



14. Exemples de commandes utilisées pour mettre en place les assemblages.

V - Mise en plan

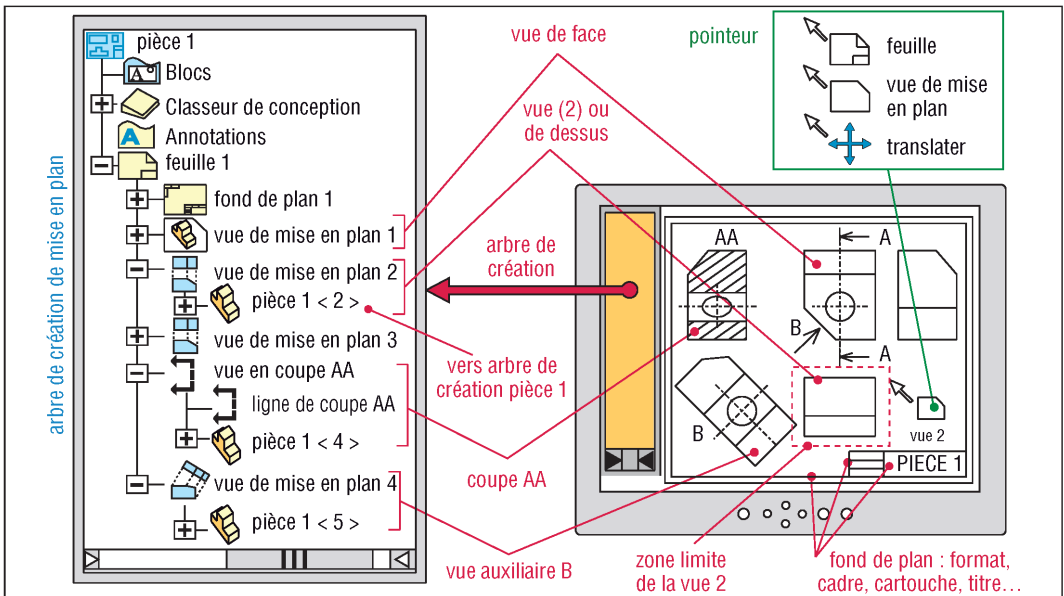
Après avoir créé un composant (pièce) ou un assemblage, il est souvent nécessaire d'en faire une mise en plan (une copie 2D) suivant les règles normalisées en vigueur : AFNOR, ISO... À cette fin, les logiciels CAO/DAO 3D proposent de nombreuses commandes pour choisir et positionner les vues, faire des coupes et sections de toutes natures, des vues auxiliaires, ajouter une cotation, des symboles normalisés (tolérances, surface...), etc.

La première opération consiste à créer un document (fichier) spécial « mise en plan » au nom de l'objet à dessiner. Il faut ensuite préparer le document (modèle avec format, style de textes, de flèches, cartouches, titre, date...) pour qu'il puisse recevoir les vues choisies.

Le fichier 3D « Pièce », ouvert à côté de son fichier « Mise en plan », l'introduction des vues standards est réalisée automatiquement par les commandes du logiciel (fig. 15) et par les opérations usuelles de manipulation de vues au pointeur (translation...).



15. Principales commandes utilisées pour la mise en plan des composants ou assemblages.



16. Arbre de création et mise en plan des objets.

7

COTATION PRINCIPES GÉNÉRAUX (Normes GPS)

OBJECTIFS

- Indiquer les principes généraux d'inscription et de disposition pour coter des formes usuelles.
- Préciser la normalisation.
- Donner les règles et des suggestions pour réussir une bonne cotation.
- Définir la notion de cotation suffisante et de cotation surabondante.
- Indiquer les automatismes apportés par la CAO/DAO.

Pour qu'un objet soit réalisable à partir d'un dessin il faut à la fois une description graphique complète et précise des formes et contours — c'est le rôle des vues normalisées — et une description détaillée et chiffrée des dimensions essentielles ; c'est le rôle de la cotation.

Les divers intervenants à la réalisation de l'objet doivent trouver sur le document tous les renseignements dont ils ont besoin.

Si les principes de cotation sont partout les mêmes, par contre les inscriptions (ligne de cote, position du texte, symbole) peuvent parfois varier sensiblement d'un pays à l'autre.

Les normes sont très proches les unes des autres et le passage de l'une à l'autre se fait sans difficultés. Les logiciels CAO/DAO permettent une cotation semi-automatique simplifiant les tracés : cotation continue, flèches diverses, symboles normalisés, etc.

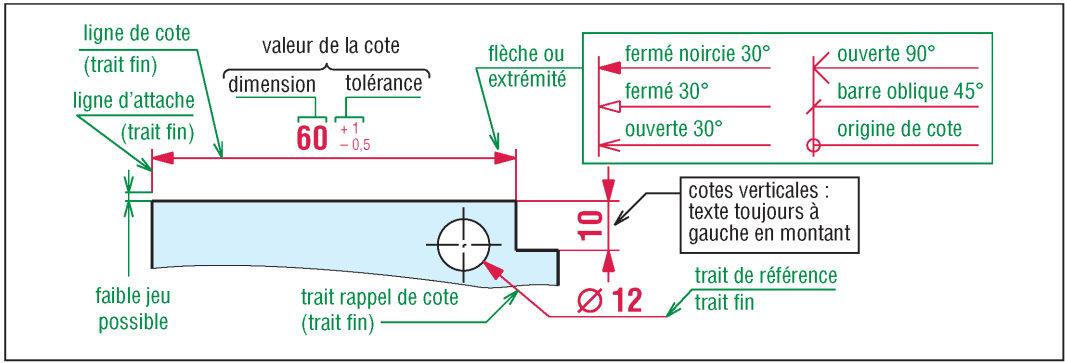
Remarque : les éléments et principes abordés ici sont en partie extraits de la norme NFE 04-521 en concordance avec NF ISO 129-1 faisant partie des normes GPS, caractéristique « taille » (voir pages 600-601).

I - Généralités

1. Cote

La plupart des dimensions (longueurs, largeurs, hauteurs, angles, etc.) sont indiquées sous forme de cotes. Une cote se compose des quatre éléments principaux suivants :

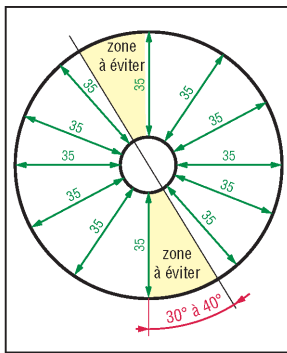
- une ligne de cote, en trait fin ;
- deux lignes de rappel, d'attache ou d'extension, en trait continu fin. Un trait d'axe, ou mixte fin, peut aussi être utilisé ;
- deux flèches ou extrémités précisant les limites de la ligne de cote ;
- la valeur de la cote (dimension chiffrée de la cote plus tolérance éventuelle plus...) au milieu et au-dessus de la ligne de cote pour les cotes horizontales. Au milieu, sur le côté gauche et de bas en haut pour les cotes verticales.



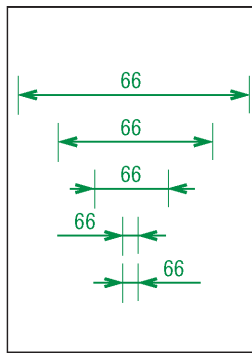
1. Principaux éléments d'une cote et extrémités possibles (la dimension indiquée est la dimension réelle de l'objet).

Remarque : si on manque de place, la ligne de cote peut être prolongée, les flèches inversées et le texte écrit en dehors des lignes de rappel.

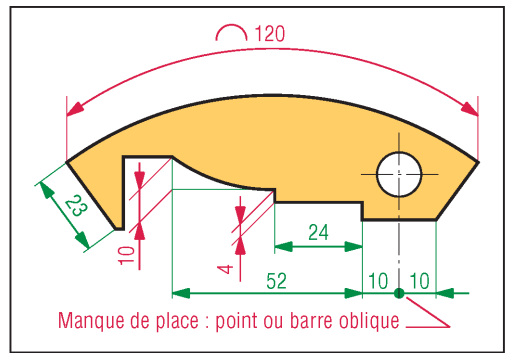
En cas de difficultés, les lignes de rappel peuvent être tracées obliques, tout en restant parallèles entre elles.



2. Dispositions à préférer.



3. Dispositions des écritures.

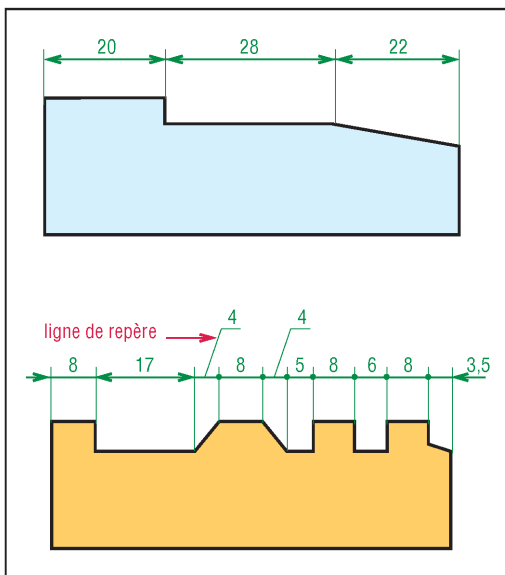


4. Cote circulaire et lignes de rappel obliques.

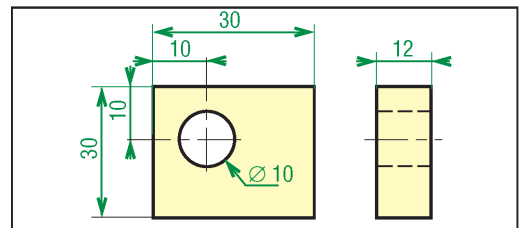
2. Cotation multiple

Elle peut être réalisée à partir d'une ligne commune, avec un espacement régulier entre chaque cote, ou suivant une ligne continue.

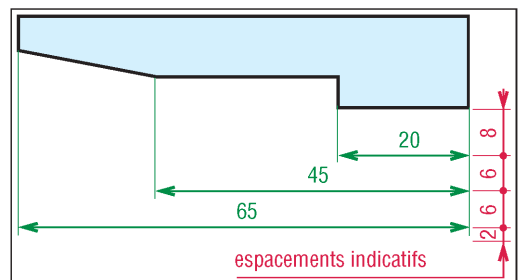
Si une cotation en continue est trop serrée, les flèches intermédiaires peuvent être remplacées par des points et les textes inscrits sur une ligne de repère.



5. Cotation suivant une ligne continue (ou en série).



6. Exemple d'agencement de cotes.



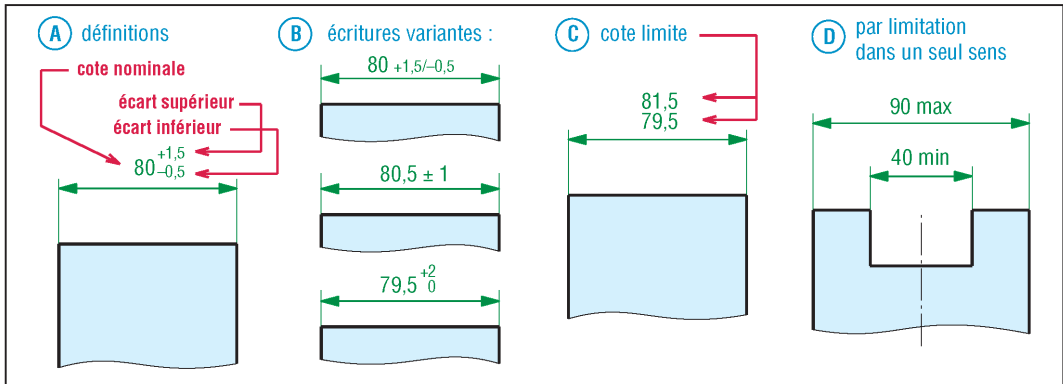
7. Cotation à partir d'une ligne commune (ou en parallèle).

3. Écriture des tolérances

Elles doivent être inscrites sous forme chiffrées à la suite de la dimension nominale. Deux valeurs sont nécessaires, l'une doit donner la valeur maximale de la cote et l'autre la valeur minimale.

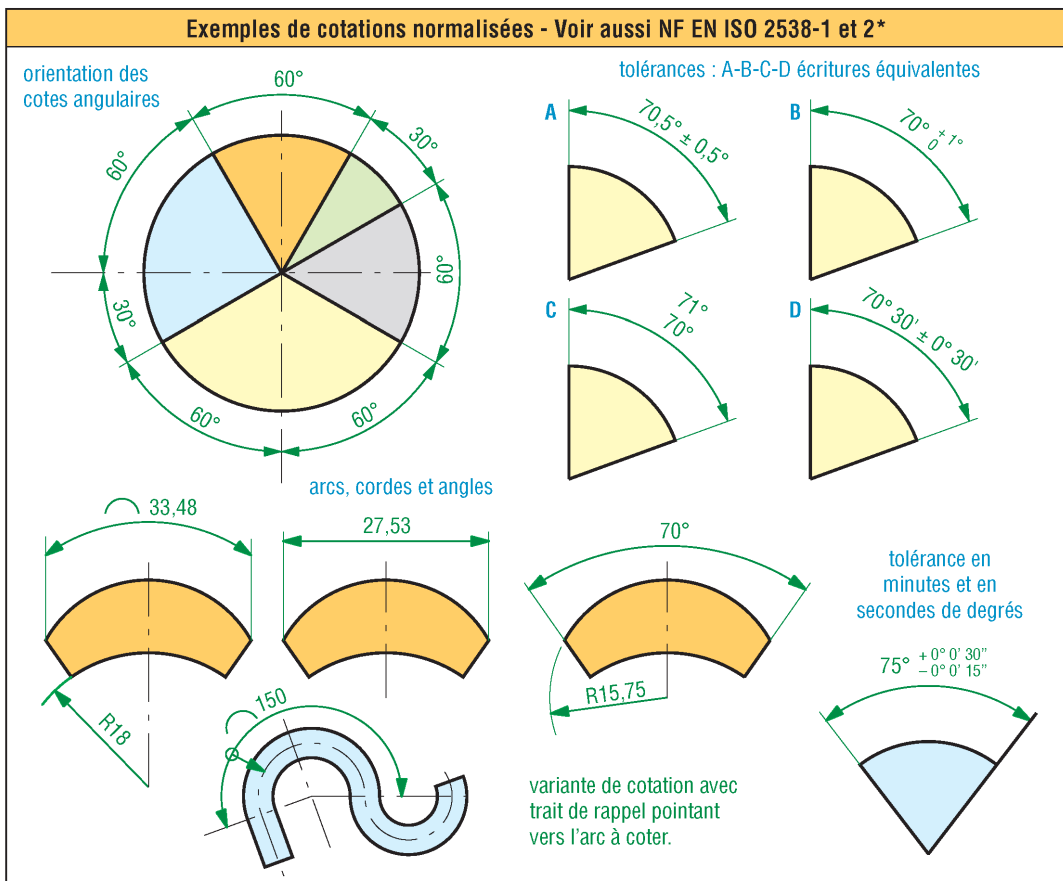
L'écriture est souvent réalisée à partir d'un écart supérieur et d'un écart inférieur (plusieurs variantes). L'utilisation des cotes limites est aussi possible (**fig. 8**).

Si une seule limite est imposée, il est possible d'utiliser les indications mini (pour minimum) et max (pour maximum).



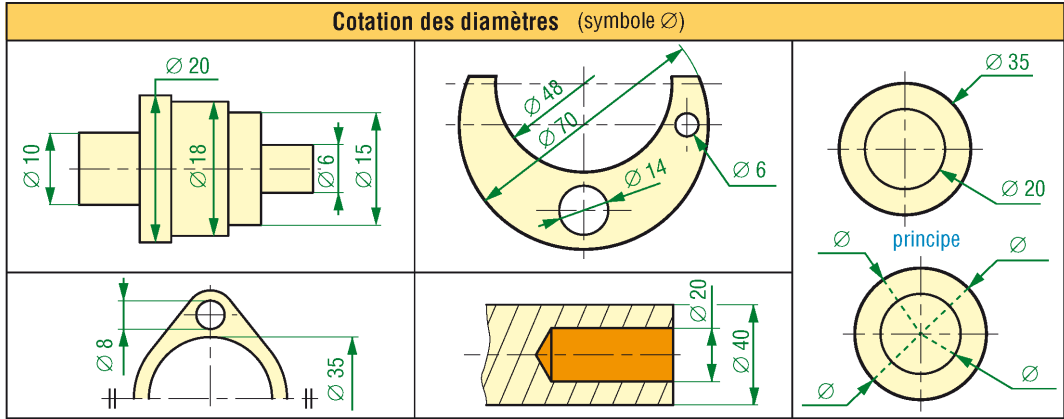
8. Méthodes d'inscription des tolérances (les cinq écritures en A, B et C sont équivalentes).

II - Cotation des angles



9. Cotation normalisée des angles, tolérances, arcs et cordes. * Série d'angles et d'inclinaisons : NF EN ISO 1119

III - Cotation des diamètres



10. Exemples de cotations normalisées (symbole à utiliser Ø).

IV - Cotation des rayons, des sphères et des surplats de carrés

| Élément | Arc | Rayon | Sphère | Carré | Épaisseur |
|----------|---------------------|-------|---|-------|-----------|
| symbole | | R | $S\varnothing$ et SR | | $t =$ |
| exemples | Voir figures 4 et 9 | | $S\varnothing$: diamètre SR : rayon | | |

11. Cotations et symboles normalisé pour rayons, arcs, sphères, carrés et épaisseurs de pièces.

V - Cotation tabulaire

La cotation tabulaire permet de présenter des éléments ou variables d'une pièce ou d'un assemblage sous forme de tableau.

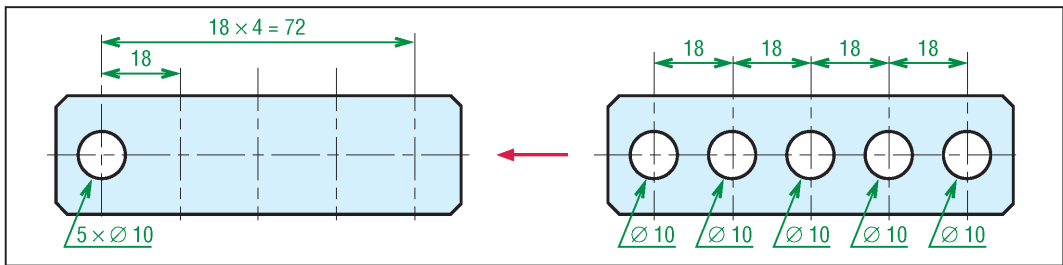
| n° | a | b | c | Ø d | L | (R) |
|----|----|----|---|------|-----|-------|
| 1 | 50 | 32 | 4 | Ø 10 | 100 | (R16) |
| 2 | 64 | 40 | 6 | Ø 16 | 120 | (R20) |
| 3 | 78 | 48 | 8 | Ø 20 | 140 | (R24) |

(R) : cote auxiliaire
(R = b/2)

12. Exemple de cotation tabulaire d'une pièce.

VI - Éléments équidistants et répétitifs

En cas de trous multiples il faut utiliser les dispositions normalisées représentées ci-dessous.



13. Cotation à préférer pour éviter les répétitions.

Cotation des éléments équidistants et répétitifs

A

point origine

cotation à cotes superposées

B

cotation par indication du nombre d'éléments

5 x Ø 12

symbole de symétrie

C

lettres repères

A = Ø 15

B = Ø 10

note explicative

D

| | A | B | C |
|---|----|----|----|
| Ø | 28 | 50 | 35 |

lettres repères A-B-C et tableau explicatif

E cotation en coordonnées

tableau explicatif

| | X | Y | Z | Ø d |
|----|----|----|----|-----|
| A1 | 20 | 20 | 20 | 16 |
| A2 | 20 | 50 | 20 | 16 |
| B1 | 40 | 30 | 20 | 8 |
| B2 | 60 | 30 | 20 | 8 |
| B3 | 40 | 10 | 20 | 8 |
| B4 | 60 | 10 | 20 | 8 |
| C | 60 | 50 | 5 | 6 |

C : trou borgne

14. Exemples de cotations normalisées (NF ISO 129-1) pour éléments répétitifs et équidistants

1

| Position | X | Y | Ø d |
|----------|----|----|-----|
| 1 | 20 | 20 | - |
| 2 | 20 | 40 | - |
| 3 | 40 | 60 | - |
| 4 | 60 | 60 | - |
| 5 | 60 | 20 | - |
| 6 | 40 | 40 | 15 |

2

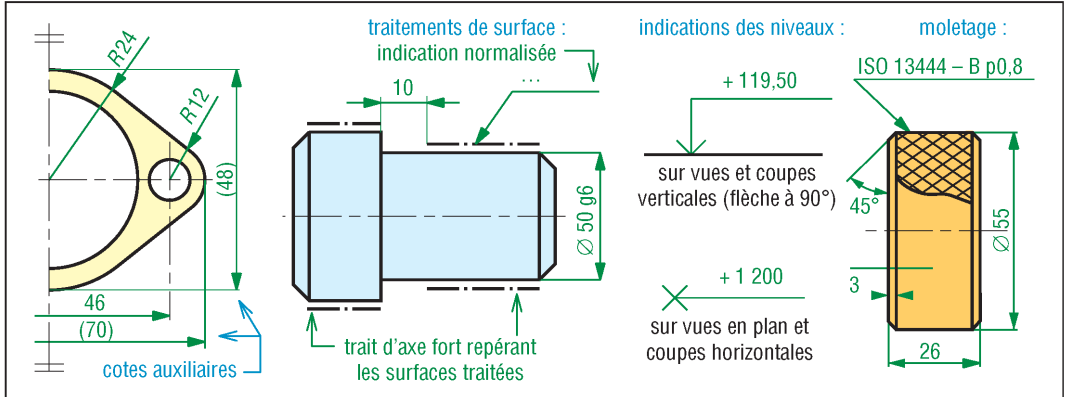
| Rep. | Pos. | X1, X2 | Y1, Y2 | Ø d |
|------|------|--------|--------|-----|
| 1 | 1 | 0 | 0 | - |
| 1 | 1,1 | 20 | 20 | - |
| 1 | 1,2 | 20 | 80 | - |
| 1 | 1,3 | 80 | 80 | - |
| 1 | 1,4 | 80 | 20 | - |
| 1 | 2 | 40 | 40 | Ø10 |
| 2 | 2,1 | 20 | 10 | Ø8 |
| 2 | 2,2 | 20 | 30 | Ø8 |

15. Cotation en coordonnées : exemples de variantes normalisées avec un et deux repères.

VII - Cas divers

Cote auxiliaire : jamais tolérancée, elle est indiquée à titre d'information et est toujours entre parenthèses (**fig. 12, 16 et 23**).

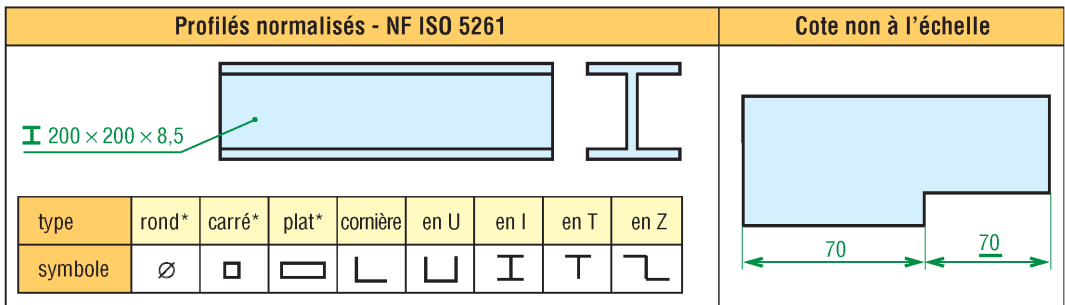
Les cotations de traitements de surface localisé (voir aussi NF ISO 15787) et les indications de niveau exigent des dispositions particulières (**fig. 16**).



16. Cotes auxiliaires. Cotations des traitements de surface. Indication des niveaux. Cotation des moletages NF ISO 13444.

Si une cote n'est pas tracée à l'échelle du dessin, elle doit être soulignée d'un trait continu fort (**fig. 17**).

Pour coter les profils standards (I, U...), utiliser les symboles normalisés correspondants.

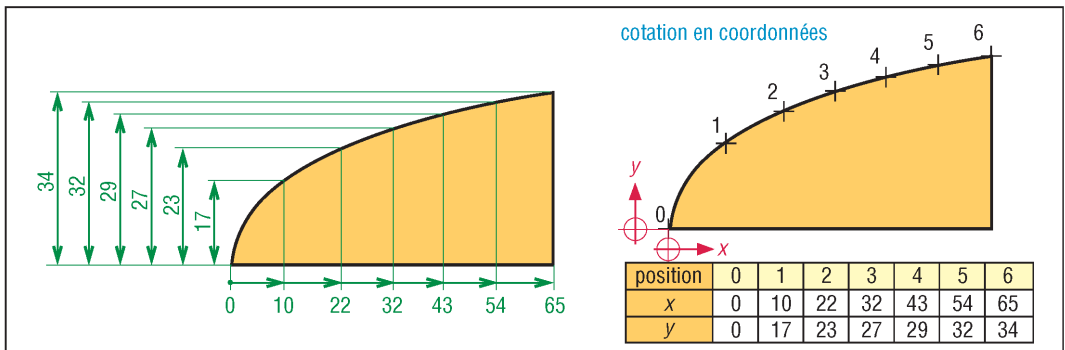


17. Cas des profils normalisés et des cotes non dessinées à l'échelle.

* pour profils pleins ou creux.

VIII - Cotation des profils courbes complexes

La cotation peut être réalisée point par point en utilisant les dispositions suivantes :



18. Profils courbes complexes.

IX - Règles usuelles et suggestions pour réussir une bonne cotation

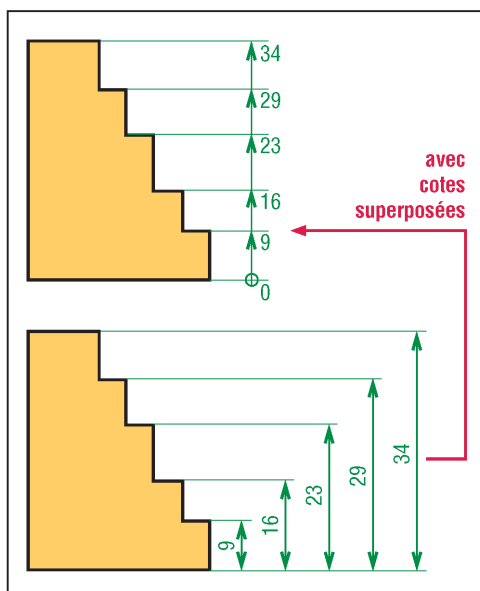
Une bonne organisation générale et le respect des règles normalisées facilitent la lecture, la compréhension et évitent les erreurs d'interprétation des différents intervenants.

1. Règles d'organisation générale

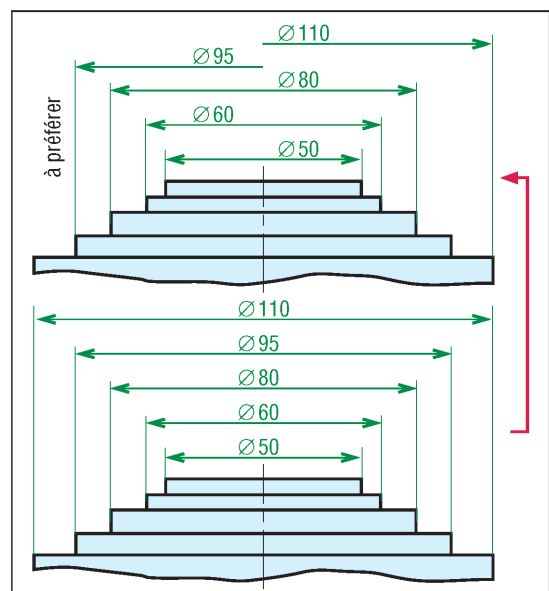
- L'échelle du dessin est la première indication à inscrire.
- N'indiquer que les cotes et dimensions nécessaires ; éviter la surabondance.
- Toutes les dimensions, cotes et tolérances, doivent être écrites à partir de la même unité. En construction mécanique, les unités normalisées sont le millimètre (mm) et le degré.
- Une même cote ne doit apparaître qu'une seule fois dans tout le dessin ; éviter de répéter la même cote dans des vues différentes.
- Agencer et organiser la disposition de l'ensemble des cotes ; mettre les unes près des autres les dimensions relatives à une même forme, élément ou objet (trou...).
- Pour les trous ou cylindres, coter le diamètre plutôt que le rayon, le rayon étant plutôt réservé aux arcs.

2. Règles de tracés

- Les lignes d'attache ou de rappel ne doivent pas couper (à éviter) les lignes de cotes mais peuvent se couper entre elles.
- Placer de préférence les cotes en dehors des vues.
- Faire démarrer les lignes de rappel à partir des traits continus forts, ou des traits d'axe. Éviter de coter à partir des contours cachés, ou traits interrompus courts.
- Si l'espace entre deux lignes de rappel est insuffisant, prolonger la ligne de cote, inverser les flèches et placer le texte sur le côté.
- Si plusieurs cotes se succèdent en série, les mettre en continu sur une même direction ; faire une cotation continue.
- Si plusieurs cotes se superposent, les placer à intervalles réguliers. Si les cotes sont nombreuses, utiliser les dispositions suivantes :

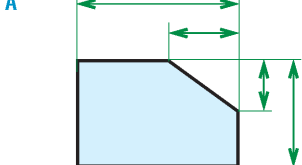
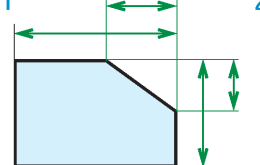
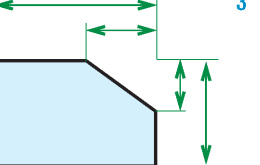
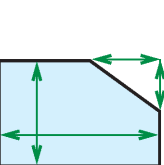
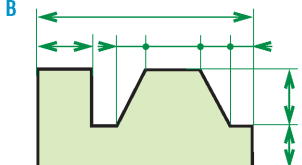
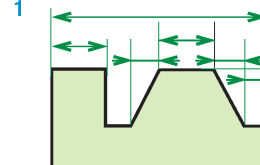
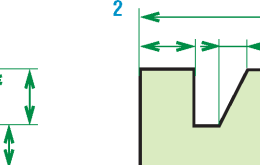
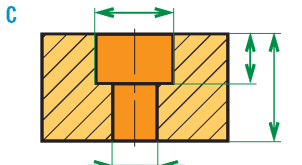
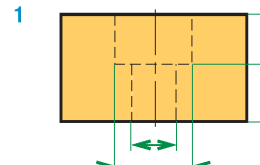
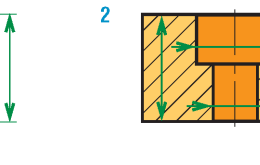
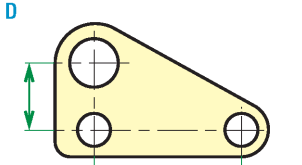
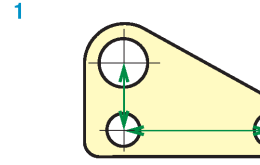
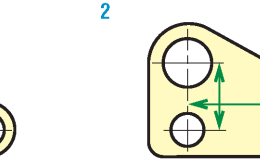
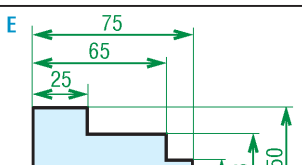
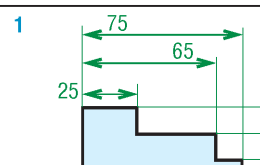
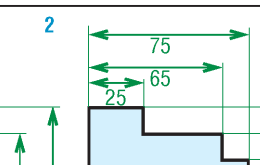
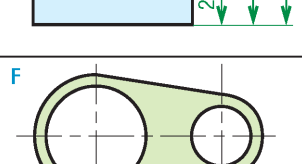
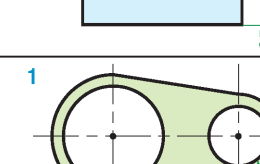
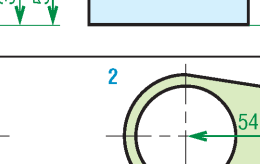
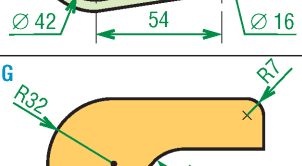
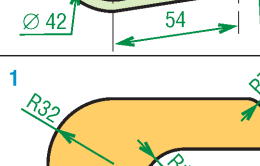
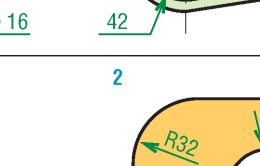
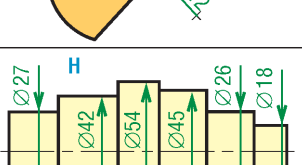
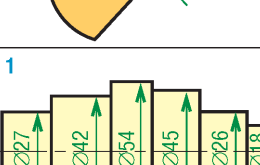
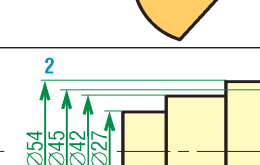


19. Cotation recommandée (cotes superposées).



20. Cotation recommandée (diamètres superposés).

- Sauf cas particulier, le texte de la cote doit être correctement centré entre les deux flèches et écrit au-dessus de la ligne de cote ; à gauche pour une cote verticale.
- Pour coter les rayons et diamètres, la direction des lignes de rappel utilisées doit passer par le centre du cercle ou de l'arc. Le texte de la cote doit être impérativement précédé du symbole \varnothing pour diamètre, R pour rayon, SR ou $S\varnothing$ pour sphères....

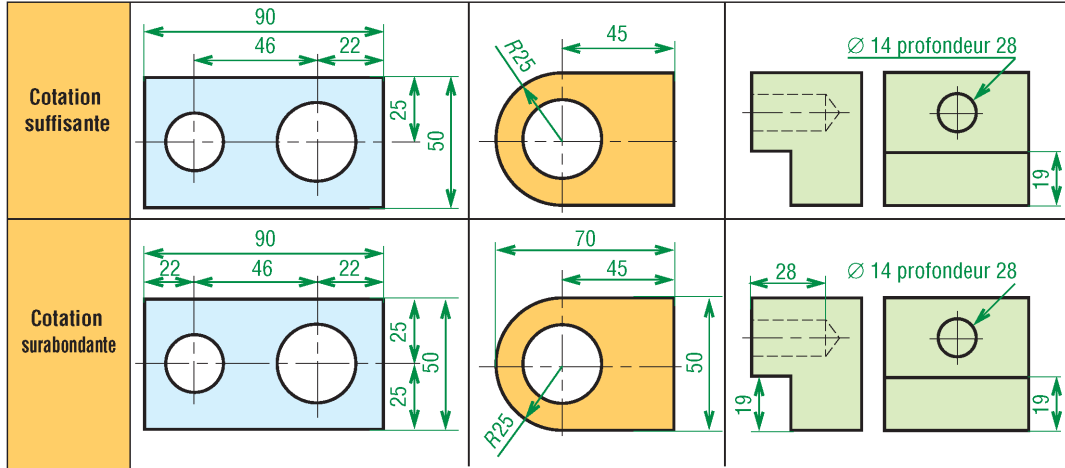
| Tracés corrects | Tracés incorrects ou à éviter | |
|---|---|--|
| <p>A</p>  | <p>1</p>  | <p>2</p>  <p>3</p>  |
| <p>B</p>  | <p>1</p>  | <p>2</p>  |
| <p>C</p>  | <p>1</p>  | <p>2</p>  |
| <p>D</p>  | <p>1</p>  | <p>2</p>  |
| <p>E</p>  | <p>1</p>  | <p>2</p>  |
| <p>F</p>  | <p>1</p>  | <p>2</p>  |
| <p>G</p>  | <p>1</p>  | <p>2</p>  |
| <p>H</p>  | <p>1</p>  | <p>2</p>  |

21. Exemples de cotations correctes et incorrectes.

3. Faire une cotation suffisante, éviter toute cotation surabondante

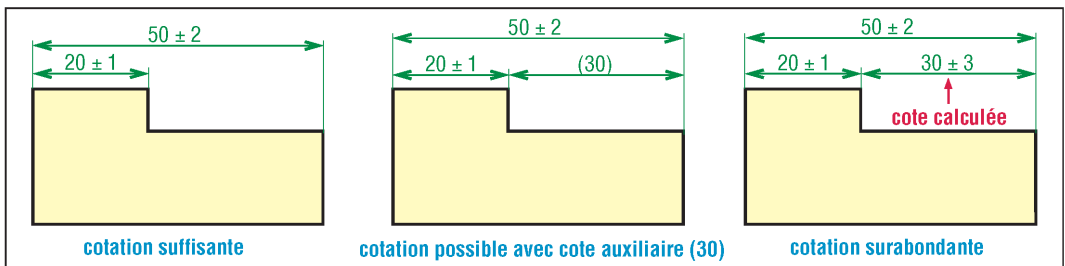
Une cotation surabondante provoque des choix et des priorités qui ne sont pas nécessairement les meilleurs. Il faut éviter qu'au moment de la fabrication il y ait, pour une même forme, à choisir entre deux dimensions possibles.

Le choix d'une cotation suffisante est l'étape la plus difficile et la plus longue. Elle exige une bonne connaissance des procédés de fabrication, une analyse complète des conditions de fonctionnement et d'interchangeabilité.



22. Exemples de cotations suffisantes et de cotations surabondantes.

Il faut éviter l'inscription de chaînes de cotes dans lesquelles l'une des dimensions est la somme, ou la différence, de plusieurs autres. Dans le cas d'une même chaîne et si les cotes sont tolérancées, les tolérances de toutes les cotes se combinent, dépendent les unes des autres et compliquent inutilement la cotation.



23. Exemple de chaîne de cotes pouvant entraîner une surabondance.

X - Cotation simplifiée des trous

| Dessin complet | Dessin complet Cotation simplifiée | Dessin simplifié Cotation simplifiée | Dessin complet | Dessin complet Cotation simplifiée | Dessin simplifié Cotation simplifiée |
|----------------|---------------------------------------|---|----------------|---------------------------------------|---|
| | | | | | |
| | | | | | |

24. Cotation simplifiée des trous. Exemples extraits de ISO 15786

XI - Assemblages collés, repliés, clinchés

| NF EN ISO 15785 | Assemblages collés | | Assemblages repliés | Assemblages clinchés |
|-----------------------------|--|--------------|---|--|
| Symbole | de surfaces = | oblique ≡ | | |
| Désignation | | | | |
| Représentation | | | | |
| Observations | Assemblage de deux pièces ou deux parties au moyen d'un adhésif ou colle. L'adhésif ne doit pas être représenté. | | Assemblage par déformation et emboîtement assurant le maintien. | Assemblage par déformations simultanées des pièces au moyen d'un outil. voir aussi page 219. |
| Indications sur les dessins | <p>côtes de la section de l'assemblage symbole de l'assemblage autres caractéristiques : type de colle... adhésif n° ... adhésif non visible sur les arêtes exigences supplémentaires... cotation valable pour la périphérie de la pièce</p> | | | |

25. Représentation normalisée (NF EN ISO 15785) des assemblages collés, repliés et clinchés.

XII - Normalisation des dimensions nominales

Lorsque pour un objet il est possible, ou nécessaire, de choisir l'une des dimensions, utiliser de préférence les valeurs des séries normalisées ci-dessous. Ces dimensions permettent de réduire les frais d'outillage, de contrôle, etc.

| Extrait des dimensions linéaires nominales recommandées : norme NF E 01-001 (utiliser dans l'ordre le choix 1, le choix 2 puis le choix 3) | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-----|-----|
| Choix n°1 | 1,00 | 1,25 | 1,60 | 2,00 | 2,50 | 3,15 | 4,00 | 5,00 | 6,30 | 8,00 | 10,00 | | |
| | 12,5 | 16,0 | 20,0 | 25,0 | 31,5 | 40,0 | 50,0 | 63,0 | 80,0 | 100,0 | 125 | | |
| | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | | | | | | | |
| Choix n°2 | 1,12 | 1,40 | 1,80 | 2,24 | 2,80 | 3,55 | 4,50 | 5,60 | 7,10 | 9,00 | 11,2 | | |
| | 14,0 | 18,0 | 22,4 | 28,0 | 35,5 | 45,0 | 56,0 | 71,0 | 90,0 | 112 | 140 | | |
| | 180 | 224 | 280 | 355 | 450 | | | | | | | | |
| Choix n°3 | 1,1 | 1,2 | 2,2 | 3 | 3,5 | 5,5 | 7 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 24 |
| | 26 | 30 | 34 | 38 | 42 | 48 | 53 | 60 | 67 | 75 | 85 | 95 | 105 |
| | 120 | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 | 240 | 260 | 300 | 340 | 380 | 420 | 480 |

8

COTATION TOLÉRANCÉE ET AJUSTEMENTS (Normes GPS)

OBJECTIFS

- Définir les notions d'interchangeabilité, de cotation tolérancée et d'ajustements.
- Donner la normalisation des ajustements (désignation, inscription et principales familles) et les critères de choix.
- Décrire le système de l'alésage normal H et de l'arbre normal h.

Compte tenu du processus de fabrication choisi et des machines utilisées, une cote réelle mesurant l'une des dimensions d'un objet ne peut être exactement la même que celle (cote nominale) indiquée sur le dessin correspondant.

S'il faut fabriquer une série d'objets identiques, il est impossible à une même forme d'avoir toujours exactement la même dimension d'un objet à l'autre.

Une cote imposée sera plus facile à réaliser si elle peut varier entre deux valeurs limites : une cote maximale et une cote minimale. La différence entre les deux s'appelle la tolérance, ou intervalle de tolérance. Plus la précision exigée est grande, plus l'intervalle de tolérance doit être petit.

L'indication des tolérances est indispensable pour les dimensions ou cotes fonctionnelles, c'est-à-dire pour l'ensemble des dimensions définissant les formes nécessaires au fonctionnement ou à l'assemblage.

La norme ISO/AFNOR prévoit des catégories de dimensions tolérancées particulières pour les assemblages de deux pièces (cylindriques ou prismatiques). Ce sont les ajustements.

Principales normes GPS utilisées (caractéristiques taille et distance) : NF ISO 406 ; NF EN ISO 286-1 et 2 (ISO 286-1 et 2) ; ISO 2768-1.

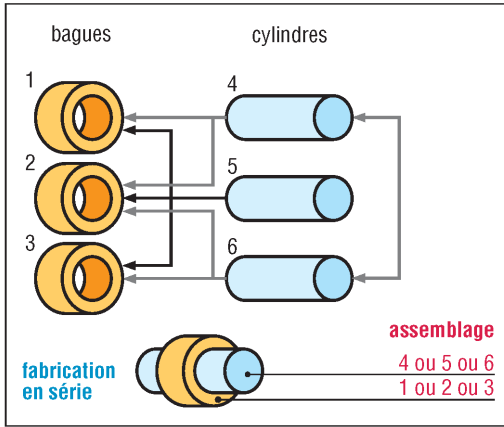
I - Interchangeabilité

L'interchangeabilité des objets ou composants est à la base de tous les produits manufacturés construits en série.

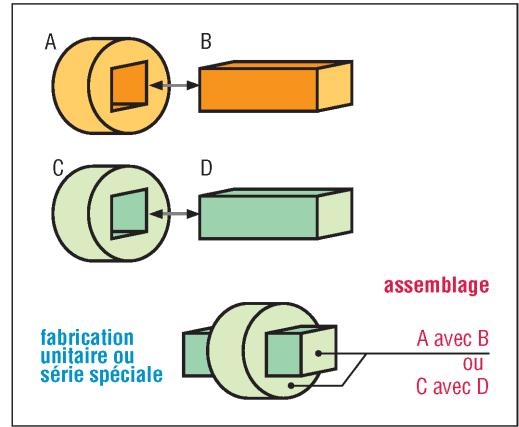
N'importe quel composant interchangeable d'une automobile peut être démonté et remonté sur n'importe quelle autre automobile du même type et rendre le même service : une roue peut être montée à l'avant, à l'arrière, à gauche, à droite et cela sur n'importe quel modèle de la série.

Exemple (fig. 1) :

N'importe quelle bague (1, 2 ou 3) peut être assemblée avec n'importe quel cylindre (4, 5 ou 6), toutes les combinaisons sont possibles. La propriété d'interchangeabilité est obtenue grâce à une cotation tolérancée (ajustements...) des formes à assembler.



1. Principe de l'interchangeabilité.



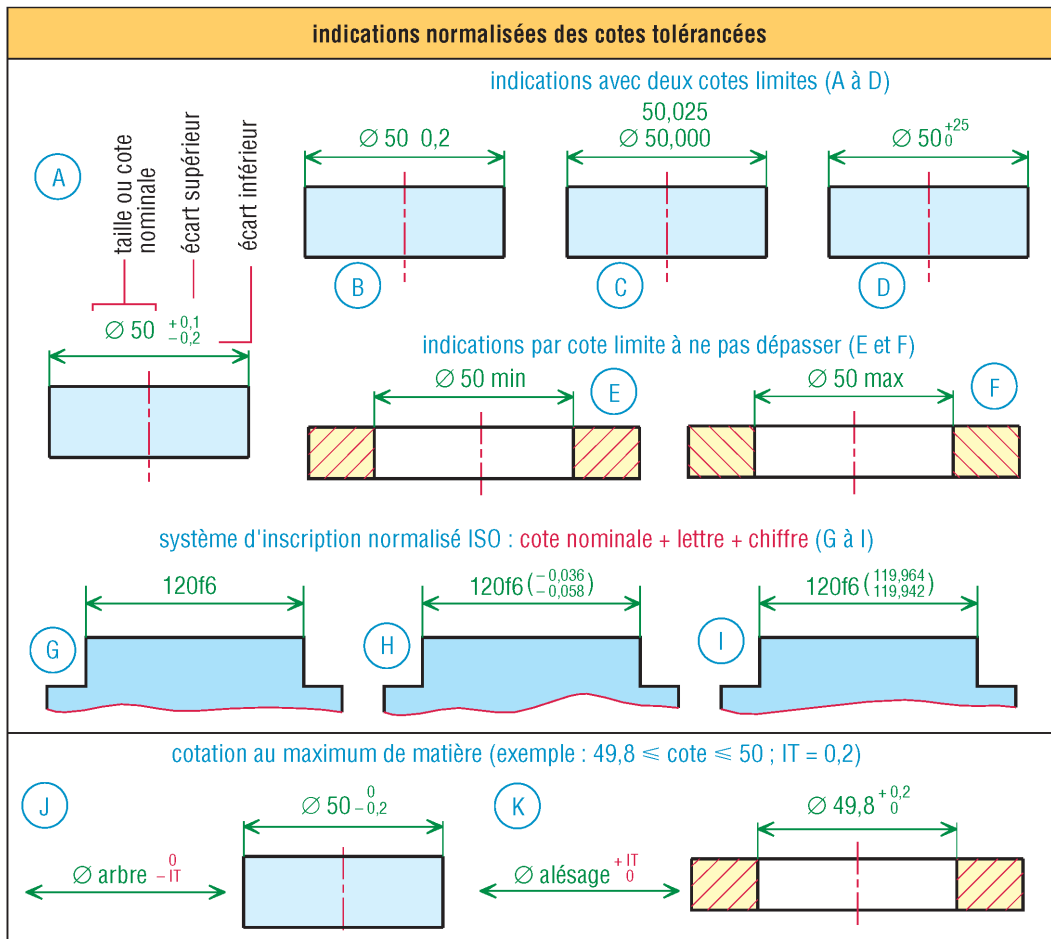
2. Cas des pièces appariées.

Pièces appariées, ou appairées : les pièces sont non interchangeables et doivent être impérativement montées ensemble, par paire. Les dimensions de l'une sont exécutées « sur mesure » à partir des dimensions de l'autre ou choisies « statistiquement ».

Exemple (fig. 2) : Bien que semblables, A ne peut être assemblée qu'avec B et C qu'avec D.

II - Cotation tolérancée

Seules sont abordées ici les spécifications GPS de base, voir compléments (modificateurs de spécification et symboles) dans NF EN ISO 14405-1.



3. Principaux cas d'inscription des cotes tolérancées.

1. Inscriptions normalisées

Une cote tolérancée peut être inscrite de plusieurs manières : à partir de deux cotes limites ; une cote limite à ne pas dépasser, ou avec le système d'inscription normalisé ISO (fig. 3).

Cas particulier : inscription au maximum de matière, voir fig. 3-J-K et pages 111 et 112.

2. Définitions normalisées ISO

Alésage : terme utilisé conventionnellement pour désigner tout élément intérieur d'une pièce, même non cylindrique (dimensions définies par deux plans parallèles opposés).

Arbre : terme utilisé conventionnellement pour désigner tout élément extérieur d'une pièce, même non cylindrique (dimensions définies par deux plans parallèles opposés).

Taille ou cote nominale : c'est la dimension (40...) qui sert de référence pour définir les cotes limites (longueur ou angle) après application des écarts inférieur et supérieur.

Écart supérieur (alésage **ES** ; arbre **es**) : c'est la différence algébrique (> 0 ou < 0) entre la dimension maximale (ULS) et la dimension ou cote nominale correspondante.

Écart inférieur (alésage **EI** ; arbres **ei**) : différence algébrique (> 0 ou < 0) entre la cote minimale (LLS) et la dimension ou cote nominale correspondante.

Ligne zéro : ligne droite représentant graphiquement la dimension nominale à partir de laquelle sont représentés et positionnés les écarts.

Zone de tolérance : graphiquement, zone comprise entre les deux lignes représentant les dimensions ou cotes maximale et minimale.

Tolérance (IT) : différence entre la dimension maximale et la dimension minimale ou entre l'écart supérieur et l'écart inférieur (valeur absolue sans signe).

3. Cotation tolérancée au maximum de matière

Dans ce mode d'inscription (fig. 3), la cote nominale retenue, pour l'écriture, est celle qui laisse le maximum de matière aux pièces en supposant que l'usinage soit réalisée exactement à la valeur de la dimension nominale ; voir compléments pages 111 et 112.

| Cotation tolérancée par l'ISO (ISO 286-2 ou NF EN ISO 286-2) | |
|---|---|
| cotation ISO des arbres | cotation ISO des alésages |
| <p>écarts k à zc</p> <p>exemple : $50m6 = 50^{+25}_{+9}$</p> <p>$es \geq 0$ $ei \geq 0$</p> <p>IT 0,016</p> <p>zone de tolérance</p> <p>50,000 cote nominale</p> <p>ligne zéro</p> | <p>écarts A à H</p> <p>exemple : $70E9 = 70^{+134}_{+60}$</p> <p>$ES \geq 0$ $EI \geq 0$</p> <p>IT 0,074</p> <p>70,000 cote nominale</p> |
| <p>écarts js et j</p> <p>exemple : $90j7 = 90^{+20}_{-15}$</p> <p>$es \geq 0$ $ei \leq 0$</p> <p>IT 0,035</p> <p>90,000 cote nominale</p> | <p>écarts JS, J et K</p> <p>exemple : $80J8 = 80^{+28}_{-18}$</p> <p>$ES \geq 0$ $EI \leq 0$</p> <p>IT 0,046</p> <p>80,000 cote nominale</p> |
| <p>écarts a à h</p> <p>exemple : $60f8 = 60^{-30}_{-76}$</p> <p>$es \leq 0$ $ei \leq 0$</p> <p>IT 0,046</p> <p>60,000 cote nominale</p> | <p>écarts M à ZC</p> <p>exemple : $100P9 = 100^{-37}_{-124}$</p> <p>$ES \leq 0$ $EI \leq 0$</p> <p>IT 0,087</p> <p>100,000 cote nominale</p> |

III - Ajustements normalisés ISO/AFNOR

Les ajustements sont des catégories de dimensions tolérancées normalisées utilisées pour les assemblages de deux pièces cylindriques ou prismatiques. On trouve :

– Les ajustements avec jeu.

Exemple : $\varnothing 50 H8/f7$

– Les ajustements avec jeu incertain (jeu ou serrage).

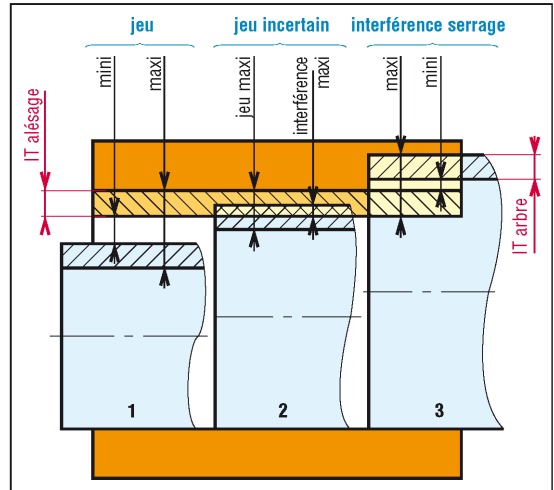
Exemple : $\varnothing 65 H7/k6$

– Les ajustements avec serrage ou interférence.

Exemple : $\varnothing 80 H7/p6$

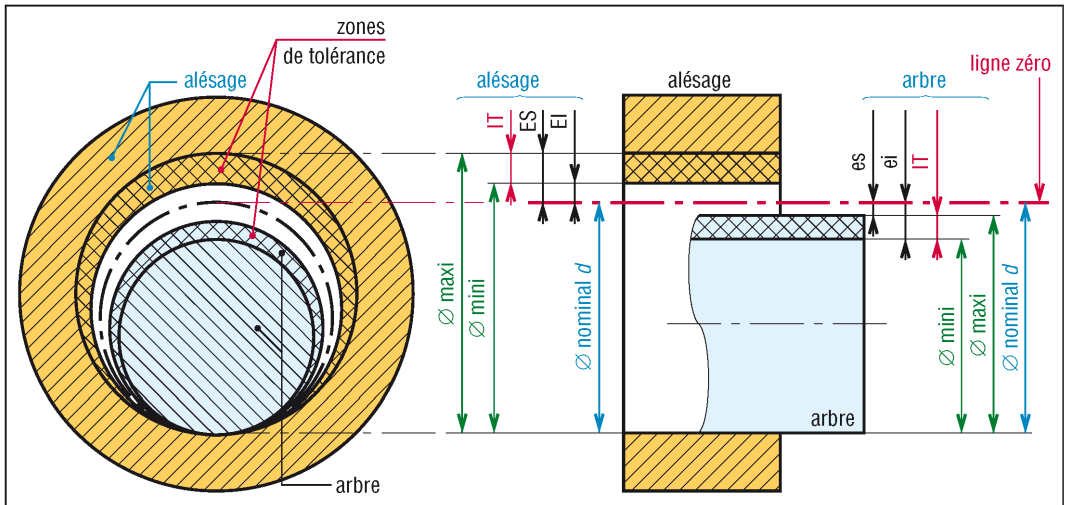
Remarques :

Dans le cas de l'ajustement $50H8/f7$, le diamètre nominal est de 50 mm, et les valeurs définies par la normalisation sont :



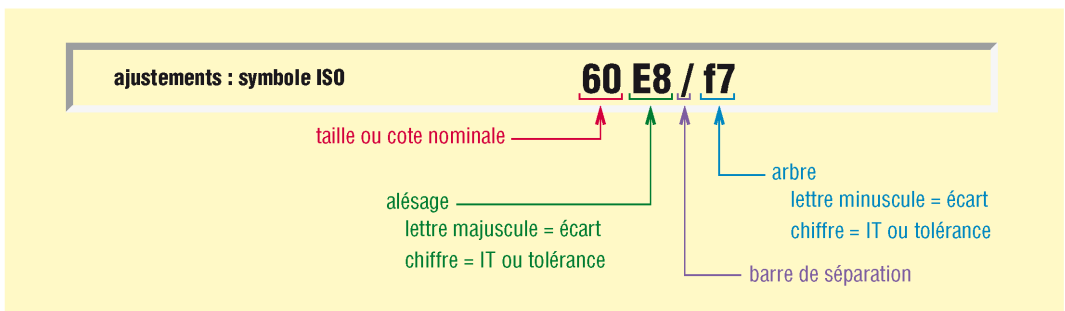
5. Jeu, jeu incertain, serrage ou interférence.

| Pour l'assemblage | Pour l'alésage 50H8 | Pour l'arbre 50f7 |
|---|--|---|
| $\text{jeu maxi} = 0,089 = 50,039 - 49,950$ $\text{jeu mini} = 0,025 = 50,000 - 49,975$ $\text{jeu moyen} = 0,057$ $ITJ = J_{\text{maxi}} - J_{\text{mini}} = 0,064 = \Sigma IT$ | $\varnothing_{\text{maxi}} = 50,039$ $\varnothing_{\text{mini}} = 50,000$ $IT = 0,039$ $ES = +0,039 EI = 0,000$ | $\varnothing_{\text{maxi}} = 49,975$ $\varnothing_{\text{mini}} = 49,950$ $IT = 0,025$ $es = -0,025 ei = -0,050$ |



6. Principe des ajustements normalisés ISO.

1. Désignation normalisée NF EN ISO 286-1 (ISO 286-1)



7. Symboles normalisés ISO.

Diamètre ou cote nominale (ajustement) : il sert de référence (ligne zéro) pour positionner les intervalles de tolérance (IT) et les écarts supérieur et inférieur à la fois pour l'arbre (ei, es) et l'alésage (EI, ES).

Écart fondamental ISO (lettres) : il définit l'écart entre le diamètre nominal et l'intervalle de tolérance utilisé (ou la position de l'IT par rapport à la ligne zéro). Il est repéré par une lettre majuscule pour les alésages (A à Z) et minuscule pour les arbres (a à z).

Remarque : les écarts H et h sont nuls ; l'IT démarre directement sur le diamètre nominal.

Degré de tolérance ISO (chiffres) : ensemble des tolérances correspondant à un même degré de précision pour toutes les dimensions nominales, table page 86. **Exemple** : IT7 ou « 7 ».

Classe de tolérance ISO : c'est l'ensemble d'un écart fondamental et d'un degré de tolérance.

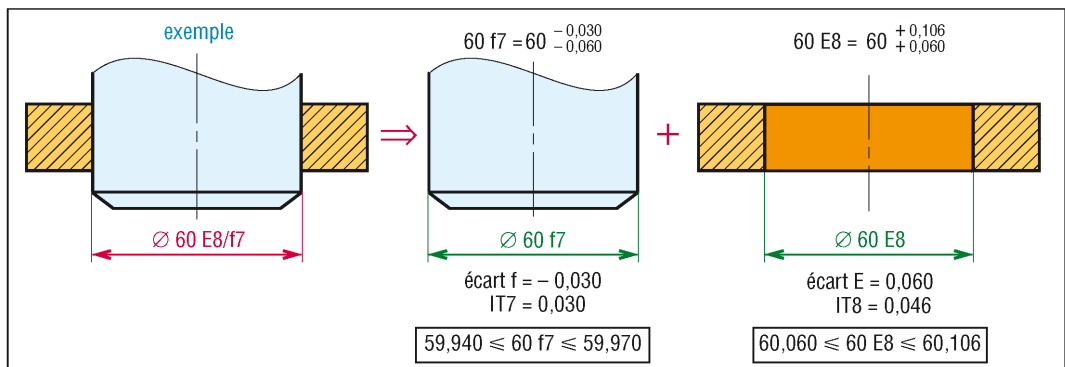
Exemples : H7, P6... (pour les alésages) ; g6, h9... (arbres).

2. Inscriptions normalisées (NF ISO 406 et 129-1)

a) Inscription sur les dessins d'ensemble

L'inscription à indiquer est celle de la cote d'ajustement ou de la cote d'assemblage. Soit dans l'ordre :

- Cote ou diamètre nominal.
- Écart et tolérance de l'alésage : lettre majuscule plus un chiffre ; barre de séparation (/).
- Écart et tolérance de l'arbre : lettre minuscule plus un chiffre.

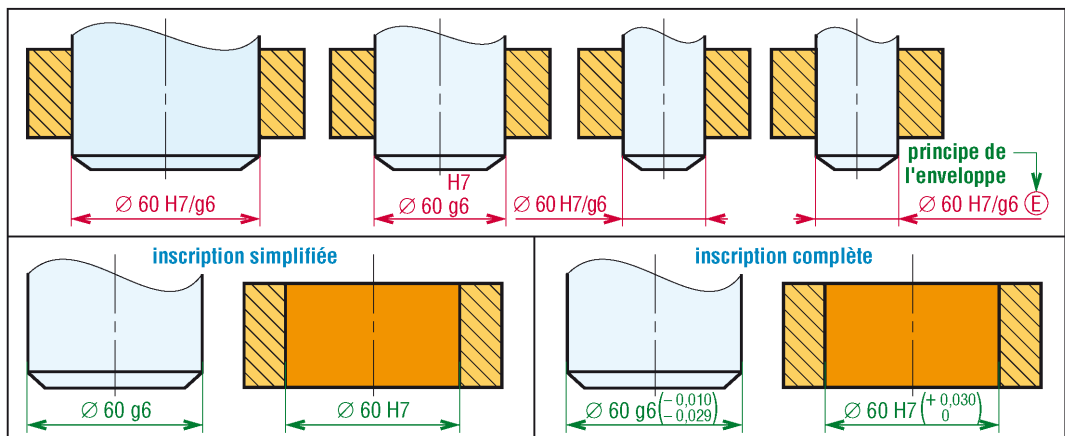


8. Exemple d'inscription et signification correspondante.

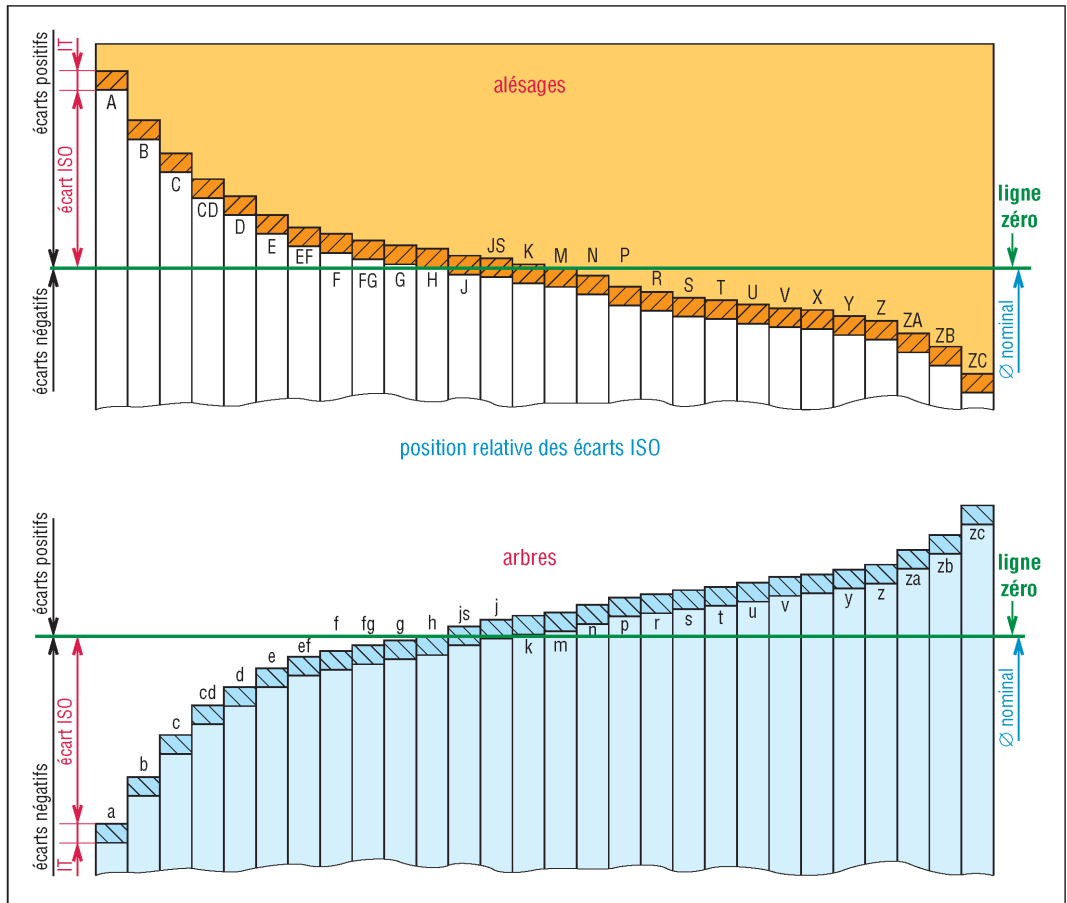
b) Inscriptions sur les dessins de définition ou de détail

Inscrire la cote tolérancée (cote nominale + lettre + chiffre) de la forme de l'objet dessiné. Au besoin, les écarts peuvent être indiqués à droite de la cote tolérancée ou dans un tableau récapitulatif.

Remarque : s'il est nécessaire d'avoir une forme parfaite obéissant à l'exigence de l'enveloppe, la désignation doit être suivie du symbole E entouré.



9. Inscriptions normalisées à utiliser en cotation d'ajustements.



10. Positions relatives des écarts ISO.

3. Degrés ou intervalles de tolérances normalisés

Il existe vingt degrés de tolérances ou de qualités normalisées par l'ISO. Ces degrés sont repérés par les chiffres [01, 0, 1, ..., 18] ou par [IT01, IT0, IT1, ..., IT18].

Les valeurs usuelles sont : IT5 à IT13.

Le degré de précision va en diminuant au fur et à mesure que le chiffre de la qualité augmente. Pour une même qualité (ou chiffre) l'intervalle de tolérance (IT) augmente avec les dimensions.

| Principaux degrés de tolérances (IT) ISO - NF EN ISO 286-1 | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| (IT en micromètre : 1 µm = 0,001 mm) | | | | | | | | | | | | | |
| dimensions nominales en mm | | | | | | | | | | | | | |
| au-delà de → | — | 3 | 6 | 10 | 18 | 30 | 50 | 80 | 120 | 180 | 250 | 315 | 400 |
| à (inclus) → | 3 | 6 | 10 | 18 | 30 | 50 | 80 | 120 | 180 | 250 | 315 | 400 | 500 |
| IT5 | 4 | 5 | 6 | 8 | 9 | 11 | 13 | 15 | 18 | 20 | 23 | 25 | 27 |
| IT6 | 6 | 8 | 9 | 11 | 13 | 16 | 19 | 22 | 25 | 29 | 32 | 36 | 40 |
| IT7 | 10 | 12 | 15 | 18 | 21 | 25 | 30 | 35 | 40 | 46 | 52 | 57 | 63 |
| IT8 | 14 | 18 | 22 | 27 | 33 | 39 | 46 | 54 | 63 | 72 | 81 | 89 | 97 |
| IT9 | 25 | 30 | 36 | 43 | 52 | 62 | 74 | 87 | 100 | 115 | 130 | 140 | 155 |
| IT10 | 40 | 48 | 58 | 70 | 84 | 100 | 120 | 140 | 160 | 185 | 210 | 230 | 250 |
| IT11 | 60 | 75 | 90 | 110 | 130 | 160 | 190 | 220 | 250 | 290 | 320 | 360 | 400 |
| IT12 | 100 | 120 | 150 | 180 | 210 | 250 | 300 | 350 | 400 | 460 | 520 | 570 | 630 |
| IT13 | 140 | 180 | 220 | 270 | 330 | 390 | 460 | 540 | 630 | 720 | 810 | 890 | 970 |

4. Propriétés

L'association écart (lettre) plus degré (chiffre) constitue une classe de tolérance et permet d'obtenir un grand nombre de cotes tolérancées possibles : $30g5$, $\varnothing 50f6$, $50 H7$, $\varnothing 60M6$

La combinaison de ces cotes tolérancées permet d'écrire un grand nombre de cotes d'ajustement possibles pour définir les jeux ou serrages des assemblages ($\varnothing 50H7/f6$, $60 H8/p7$...).

a) Jeu mini des ajustements

Il dépend uniquement des lettres (écarts) choisis et est indépendant des chiffres (qualité).

Exemple : tous les ajustements construits à partir de H/f ($30H9/f9$, $30H7/f6$, $30H6/f6$...) ont le même jeu mini ($20 \mu\text{m}$ pour la cote de 30) (voir fig. 11).

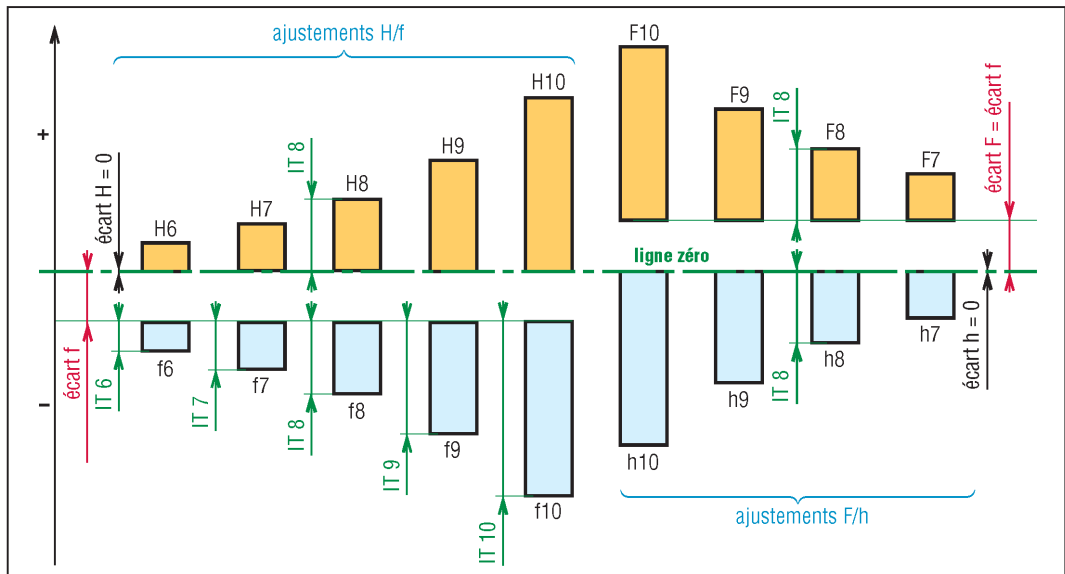
b) Jeu maxi des ajustements

Il dépend à la fois des lettres (écarts) et des chiffres (qualités) choisis, avec les mêmes lettres le jeu maxi augmente avec le chiffre de la qualité.

Exemples :

| Ajustement | 30H7/f6 | 30H7/f7 | 30H8/f7 | 30H8/f8 | 30H9/f8 |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| jeu mini (μm) | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| jeu maxi (μm) | 54 | 62 | 74 | 88 | 105 |

Remarque : à qualité (chiffre) égale, le jeu peut être augmenté en augmentant l'un des écarts de base. Exemple : remplacer H/f par H/e ou E/f...



11. Exemples d'associations entre tolérances et écarts fondamentaux.

IV - Choix des ajustements

Le choix des ajustements est une étape importante dans la conception des machines. Les performances et la qualité en dépendent.

Les spécifications retenues doivent être suffisantes mais non surabondantes. Une trop grande précision est inutile et coûteuse.

Le choix dépend de la liaison à réaliser et de la précision exigée pour le guidage. Y a-t-il jeu ou serrage ? Les pièces sont-elles mobiles ou immobiles ? S'agit-il d'un positionnement ou d'un centrage ? La liaison doit elle transmettre des efforts ? Quels sont les coûts ? Les moyens ?...

1. Critères de choix

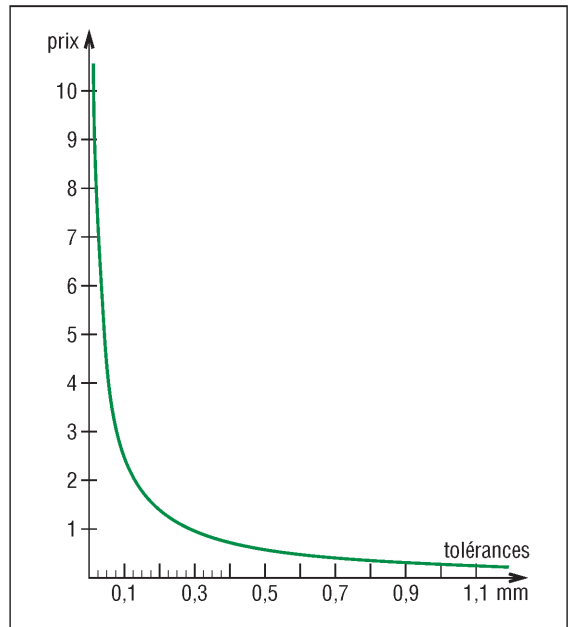
Les coûts augmentent avec le degré de précision exigé. Schématiquement, au-dessous de l'intervalle de tolérance 0,1 à 0,05 mm les coûts augmentent très rapidement (voir fig. 12).

Le tableau ci-dessous donne des indications sur les qualités que l'on peut attendre (en moyenne) des principaux procédés d'usinage.

Pour un ajustement, on associe le plus souvent un alésage de qualité donnée avec un arbre de la qualité voisine immédiatement inférieure (sensiblement mêmes difficultés d'obtention et mêmes coûts).

Exemples : H7/f6, H6/g5, D10/h9...

Utiliser en priorité le système de l'alésage H ou éventuellement celui de l'arbre h.



12. En production : coûts comparés indicatifs en fonction de la tolérance.

| Qualités usuelles indicatives des principaux procédés d'usinage | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| IT (qualité) | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| oxycoupage | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| sciage | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| rabotage | | | ■ | | | | | | | | | | | | | |
| perçage | | | ■ | | | ■ | | | | | | | | | | |
| fraisage | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | |
| perçage + alésoir | | | | ■ | | | ■ | | | | | | | | | |
| alésage | | | ■ | | | ■ | | | | | | | | | | |
| brochage | | | ■ | | | ■ | | | | ■ | | | | | | |
| tournage | | | ■ | | | ■ | | | | ■ | | | | | | |
| rectification | | | | | | | | | ■ | | | ■ | | | | |
| rodage | | | | | | | | | | | ■ | | ■ | | | |
| superfinition | | | | | | | | | | | | | | ■ | | ■ |

2. Système de l'alésage normal H

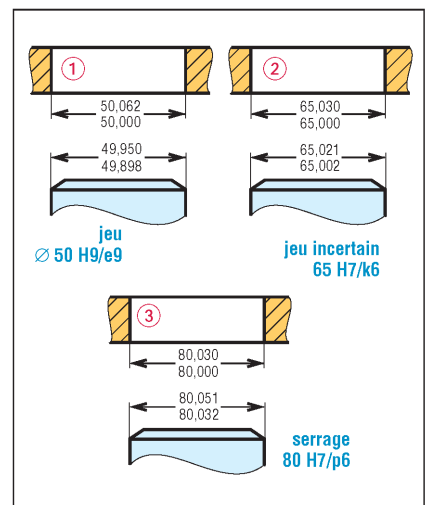
C'est le système le plus utilisé et le plus facile à mettre en œuvre (à choisir en priorité).

Dans ce système l'alésage H (« la lettre H ») est toujours pris comme base. Seule la dimension de l'arbre (lettre + chiffre) est à choisir.

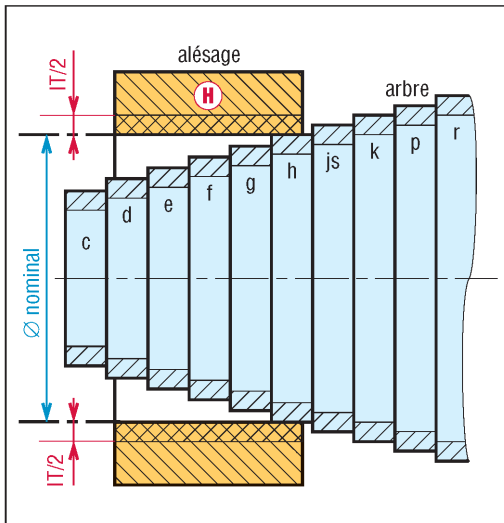
Propriétés : les ajustements avec lettres minuscules à partir de h et au-dessous (H/h, H/g, H/f...) présentent toujours un jeu croissant en allant de h à a. À partir de p et au-dessus (H/p, H/r...) ils sont toujours serrés ; serrage croissant en allant de p à z. Ils sont incertains (jeu ou serrage) dans les autres cas (entre h et p).

Remarque : l'alésage H est caractérisé par un écart inférieur (EI) nul. Autrement dit :

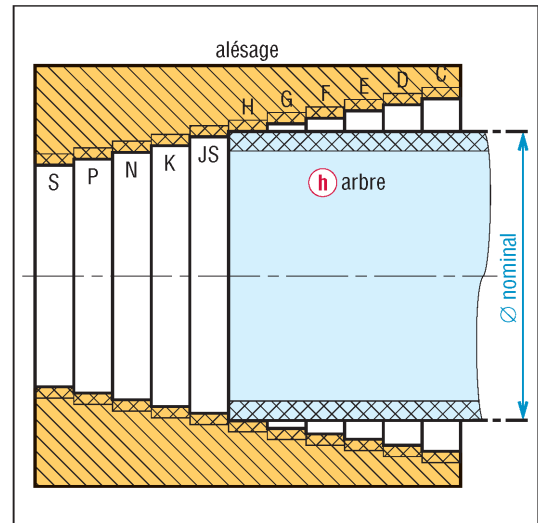
$EI = 0$: cote mini alésage = cote nominale
 $ES = IT$: cote maxi alésage = cote nominale + IT



13. Exemples d'ajustements (alésage normal H).



14. Système de l'alésage normal H.



15. Système de l'arbre normal h.

3. Système de l'arbre normal h

Dans ce système, l'arbre h (« lettre h ») est toujours pris comme base. Seule la dimension de l'alésage est à choisir.

Les ajustements avec lettres majuscules à partir de H et au-dessous (H/h, G/h, F/h...) présentent toujours un jeu. À partir de P et au-dessus (P/h, R/h...) les ajustements sont toujours serrés. Ils sont incertains dans les autres cas.

Remarque : l'arbre h est caractérisé par un écart supérieur (e_s) nul. Autrement dit :

$e_s = 0$: cote maxi arbre = cote nominale

$e_i = IT$: cote mini arbre = cote nominale + IT

4. Correspondance entre les deux systèmes H et h

Les ajustements homologues des deux systèmes précédents présentent les mêmes jeux ou serrages (interférences).

Exemples : l'ajustement H10/f10 a même jeu que l'ajustement F10/h10. L'ajustement H7/r6 présente le même serrage que l'ajustement R7/h6...

| Exemples d'assemblages typiques recommandés (NF EN ISO 286-1) | | | |
|---|------------------------|----------------------|--|
| cas | système de l'alésage H | système de l'arbre h | observations |
| Ajustement avec jeu | H11/b11 | B11/h9 | jeu assez élevé (longues portées...) cas usuel de guidage tournant avec jeu (bon graissage assuré) guidage assez précis centrage, positionnement avec jeu |
| | H11/c11 | D10/h9 | |
| | H9/e8 | F8/h9 | |
| | H8/e8 | E9/h9 | |
| | H8/f7 | F8/h7 | |
| | H8/h7 | H8/h7 | |
| | H7/g6 | G7/h6 | |
| Ajustement avec jeu incertain | H7/js6 | JS7/h6 | centrage avec jeu incertain |
| | H7/k6 | K7/h6 | |
| | H7/n6 | N7/h6 | |
| Ajustement avec serrage | H7/p6 | P7/h6 | serrage moyen (assemblage à la presse) serrage élevé fort serré |
| | H7/r6 | R7/h6 | |
| | H7/s6 | S7/h6 | |

| Ajustements usuels – alésage H | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------|---------|----|----|----|-----|-----|--------------|---|--|--|-----------------------------|---------------------------------------|
| type | arbre | alésage | | | | | | observations | | | | | |
| | | H6 | H7 | H8 | H9 | H10 | H11 | | | | | | |
| pièces mobiles | jeu élevé | c11 | | | | | | | | cas usuels de longues portées, mauvais alignements, dilatations... | | | |
| | | c10 | | | | | | | | | | | |
| | | c9 | | | | | | | | | | | |
| | | d10 | | | | | | | | | | | |
| | jeu moyen | d9 | | | | | | | | cas usuels pour guidage tournant ou glissant avec jeu (bon graissage assuré) | | | |
| | | d8 | | | | | | | | | | | |
| | | e9 | | | | | | | | | | | |
| | | e8 | | | | | | | | | | | |
| | | e7 | | | | | | | | | | | |
| | | f8 | | | | | | | | | | | |
| | | f7 | | | | | | | | | | | |
| | jeu faible | g6 | | | | | | | | pour guidage précis | | | |
| g5 | | | | | | | | | | | | | |
| pièces immobiles | ajusté | h9 | | | | | | | assemblage possible à la main | pour centrage et positionnement ne peut pas transmettre des efforts | pas de détérioration des pièces au démontage | | |
| | | h7 | | | | | | | | | | | |
| | | h6 | | | | | | | | | | | |
| | | h5 | | | | | | | | | | | |
| | très ajusté | js7 | | | | | | | assemblage au maillet | | | | |
| | | js6 | | | | | | | | | | | |
| | | js5 | | | | | | | | | | | |
| | peu serré | k6 | | | | | | | assemblage à la presse | | | | |
| | | k5 | | | | | | | | | | | |
| | | m7 | | | | | | | | | | | |
| | | m6 | | | | | | | | | | | |
| | serré | n6 | | | | | | | assemblage à la presse lourde ou par dilatation (fretage) | | | pour transmission d'efforts | détérioration des pièces au démontage |
| | | p6 | | | | | | | | | | | |
| | | r6 | | | | | | | | | | | |
| s7 | | | | | | | | | | | | | |
| s6 | | | | | | | | | | | | | |
| t6 | | | | | | | | | | | | | |
| fort serré | u6 | | | | | | | | | | | | |
| | x6 | | | | | | | | | | | | |

cas les plus utilisés

| Cotation tolérancée : tolérances générales pour dimensions sans indications individuelles (ISO 2768-1) | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|----------------------------|--------|---------|-----------|------------|--------------|--------------------|--------|-----------|------------------------------------|----------|-----------|------------|-------------|
| classe de tolérance | au-delà de à (inclus) | dimensions linéaires en mm | | | | | | rayons / chanfrein | | | angles : sur le côté le plus court | | | | |
| | | 0,5 3 | 3 6 | 6 30 | 30 120 | 120 400 | 400 1 000 | 0,5 3 | 3 6 | > 6 mm | ≥ 0 10 | 10 50 | 50 120 | 120 400 | > 400 mm |
| f | fine | ± 0,05 | ± 0,05 | ± 0,1 | ± 0,15 | ± 0,2 | ± 0,3 | ± 0,2 | ± 0,5 | ± 1 | ± 1° | ± 0°30' | ± 0°20' | ± 0°10' | ± 0°5' |
| m | moyenne | ± 0,1 | ± 0,1 | ± 0,2 | ± 0,3 | ± 0,5 | ± 0,8 | ± 0,2 | ± 0,5 | ± 1 | ± 1° | ± 0°30' | ± 0°20' | ± 0°10' | ± 0°5' |
| c | grossière | ± 0,2 | ± 0,3 | ± 0,5 | ± 0,8 | ± 1,2 | ± 2 | ± 0,4 | ± 1 | ± 2 | ± 1°30' | ± 1° | ± 0°30' | ± 0°15' | ± 0°10' |
| V | très grossière | — | ± 0,5 | ± 1 | ± 1,5 | ± 2,5 | ± 4 | ± 0,4 | ± 1 | ± 2 | ± 3° | ± 2° | ± 1° | ± 0°30' | ± 0°20' |

Exemple d'indication sur les dessins (près ou dans le cartouche) : « ISO 2768 - m »

| Extraits de tolérances ISO pour arbres (en microns : 1µm = 0,001 mm) | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| dimensions nominales (en mm) NF EN ISO 286-2 (ISO 286-2) | | | | | | | | | | | | | | |
| au-delà de | | 3 | 6 | 10 | 18 | 30 | 50 | 80 | 120 | 180 | 250 | 315 | 400 | |
| à (inclus) | - | 3 | 6 | 10 | 18 | 30 | 50 | 80 | 120 | 180 | 250 | 315 | 400 | |
| d9 | es | -20 | -30 | -40 | -50 | -65 | -80 | -100 | -120 | -145 | -170 | -190 | -210 | -230 |
| | ei | -45 | -60 | -76 | -93 | -117 | -142 | -174 | -207 | -245 | -285 | -320 | -350 | -385 |
| d10 | es | -20 | -30 | -40 | -50 | -65 | -80 | -100 | -120 | -145 | -170 | -190 | -210 | -230 |
| | ei | -60 | -78 | -98 | -120 | -149 | -180 | -220 | -260 | -305 | -355 | -400 | -440 | -480 |
| d11 | es | -20 | -30 | -40 | -50 | -65 | -80 | -100 | -120 | -145 | -170 | -190 | -210 | -230 |
| | ei | -80 | -105 | -130 | -160 | -195 | -240 | -290 | -340 | -395 | -460 | -510 | -570 | -630 |
| e7 | es | -14 | -20 | -25 | -32 | -40 | -50 | -60 | -72 | -85 | -100 | -110 | -125 | -135 |
| | ei | -24 | -32 | -40 | -50 | -61 | -75 | -90 | -107 | -125 | -146 | -162 | -182 | -198 |
| e8 | es | -14 | -20 | -25 | -32 | -40 | -50 | -60 | -72 | -85 | -100 | -110 | -125 | -135 |
| | ei | -28 | -38 | -47 | -59 | -73 | -89 | -106 | -126 | -148 | -172 | -191 | -214 | -232 |
| e9 | es | -14 | -20 | -25 | -32 | -40 | -50 | -60 | -72 | -85 | -100 | -110 | -125 | -135 |
| | ei | -39 | -50 | -61 | -75 | -92 | -112 | -134 | -159 | -185 | -215 | -240 | -265 | -290 |
| f6 | es | -6 | -10 | -13 | -16 | -20 | -25 | -30 | -36 | -43 | -50 | -56 | -62 | -68 |
| | ei | -12 | -18 | -22 | -27 | -33 | -41 | -49 | -58 | -68 | -79 | -88 | -98 | -108 |
| f7 | es | -6 | -10 | -13 | -16 | -20 | -25 | -30 | -36 | -43 | -50 | -56 | -62 | -68 |
| | ei | -16 | -22 | -28 | -34 | -41 | -50 | -60 | -71 | -83 | -96 | -108 | -119 | -131 |
| f8 | es | -6 | -10 | -13 | -16 | -20 | -25 | -30 | -36 | -43 | -50 | -56 | -62 | -68 |
| | ei | -20 | -28 | -35 | -43 | -53 | -64 | -76 | -90 | -106 | -122 | -137 | -151 | -165 |
| g5 | es | -2 | -4 | -5 | -6 | -7 | -9 | -10 | -12 | -14 | -15 | -17 | -18 | -20 |
| | ei | -6 | -9 | -11 | -14 | -16 | -20 | -23 | -27 | -32 | -35 | -40 | -43 | -47 |
| g6 | es | -2 | -4 | -5 | -6 | -7 | -9 | -10 | -12 | -14 | -15 | -17 | -18 | -20 |
| | ei | -8 | -12 | -14 | -17 | -20 | -25 | -29 | -34 | -39 | -44 | -49 | -54 | -60 |
| h5 | es | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ei | -4 | -5 | -6 | -8 | -9 | -11 | -13 | -15 | -18 | -20 | -23 | -25 | -27 |
| h6 | es | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ei | -6 | -8 | -9 | -11 | -13 | -16 | -19 | -22 | -25 | -29 | -32 | -36 | -40 |
| h7 | es | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ei | -10 | -12 | -15 | -18 | -21 | -25 | -30 | -35 | -40 | -46 | -52 | -57 | -63 |
| h8 | es | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ei | -14 | -18 | -22 | -27 | -33 | -39 | -46 | -54 | -63 | -72 | -81 | -89 | -97 |
| h9 | es | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ei | -25 | -30 | -36 | -43 | -52 | -62 | -74 | -87 | -100 | -115 | -130 | -140 | -155 |
| h10 | es | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ei | -40 | -48 | -58 | -70 | -84 | -100 | -120 | -140 | -160 | -185 | -210 | -230 | -250 |
| h11 | es | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ei | -60 | -75 | -90 | -110 | -130 | -160 | -190 | -220 | -250 | -290 | -320 | -360 | -400 |
| h13 | es | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ei | -140 | -180 | -220 | -270 | -330 | -390 | -460 | -540 | -630 | -720 | -810 | -890 | -970 |
| j6 | es | +4 | +6 | +7 | +8 | +9 | +11 | +12 | +13 | +14 | +16 | +16 | +18 | +20 |
| | ei | -2 | -2 | -2 | -3 | -4 | -5 | -7 | -9 | -11 | -13 | -16 | -18 | -20 |
| j7 | es | +6 | +8 | +10 | +12 | +13 | +15 | +18 | +20 | +22 | +25 | +26 | +29 | +31 |
| | ei | -4 | -4 | -5 | -6 | -8 | -10 | -12 | -15 | -18 | -21 | -26 | -28 | -32 |
| js5 | | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 4,5 | 5,5 | 6,5 | 7,5 | 9 | 10 | 11,5 | 12,5 | 13,5 |
| js6 | | 3 | 4 | 4,5 | 5,5 | 6,5 | 8 | 9,5 | 11 | 12,5 | 14,5 | 16 | 18 | 20 |
| js7 | | 5 | 6 | 7,5 | 9 | 10,5 | 12,5 | 15 | 17,5 | 20 | 23 | 26 | 28,5 | 31,5 |
| js9 | | 12,5 | 15 | 18 | 21,5 | 26 | 31 | 37 | 43,5 | 50 | 57,5 | 65 | 70 | 77,5 |
| js11 | | 30 | 37,5 | 45 | 55 | 65 | 80 | 95 | 110 | 125 | 145 | 160 | 180 | 200 |
| js13 | | 70 | 90 | 110 | 135 | 165 | 195 | 230 | 270 | 315 | 360 | 405 | 445 | 485 |
| k5 | es | +4 | +6 | +7 | +9 | +11 | +13 | +15 | +18 | +21 | +24 | +27 | +29 | +32 |
| | ei | 0 | +1 | +1 | +1 | +2 | +2 | +2 | +3 | +3 | +4 | +4 | +4 | +5 |
| k6 | es | +6 | +9 | +10 | +12 | +15 | +18 | +21 | +25 | +28 | +33 | +36 | +40 | +45 |
| | ei | 0 | +1 | +1 | +1 | +2 | +2 | +2 | +3 | +3 | +4 | +4 | +4 | +5 |
| m6 | es | +8 | +12 | +15 | +18 | +21 | +25 | +30 | +35 | +40 | +46 | +52 | +57 | +63 |
| | ei | +2 | +4 | +6 | +7 | +8 | +9 | +11 | +13 | +15 | +17 | +20 | +21 | +23 |
| m7 | es | +12 | +16 | +21 | +25 | +29 | +34 | +41 | +48 | +55 | +63 | +72 | +78 | +86 |
| | ei | +2 | +4 | +6 | +7 | +8 | +9 | +11 | +13 | +15 | +17 | +20 | +21 | +23 |
| n5 | es | +8 | +13 | +16 | +20 | +24 | +28 | +33 | +38 | +45 | +51 | +57 | +62 | +67 |
| | ei | +4 | +8 | +10 | +12 | +15 | +17 | +20 | +23 | +27 | +31 | +34 | +37 | +40 |
| n6 | es | 10 | +16 | +19 | +23 | +28 | +33 | +39 | +45 | +52 | +60 | +66 | +73 | +80 |
| | ei | +4 | +8 | +10 | +12 | +15 | +17 | +20 | +23 | +27 | +31 | +34 | +37 | +40 |
| p6 | es | +12 | +20 | +24 | +29 | +35 | +42 | +51 | +59 | +68 | +79 | +88 | +98 | +108 |
| | ei | +6 | +12 | +15 | +18 | +22 | +26 | +32 | +37 | +43 | +50 | +56 | +62 | +68 |

| Extraits de tolérances ISO pour alésage (en microns : 1 µm = 0,001 mm) | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| dimensions nominales (en mm) NF EN ISO 286-2 | | | | | | | | | | | | | | |
| au-delà de à (inclus) | | 3 | 6 | 10 | 18 | 30 | 50 | 80 | 120 | 180 | 250 | 315 | 400 | |
| | 3 | 6 | 10 | 18 | 30 | 50 | 80 | 120 | 180 | 250 | 315 | 400 | 500 | |
| D10 | ES | +60 | +78 | +98 | +120 | +149 | +180 | +220 | +260 | +305 | +355 | +400 | +440 | +480 |
| | EI | +20 | +30 | +40 | +50 | +65 | +80 | +100 | +120 | +145 | +170 | +190 | +210 | +230 |
| E9 | ES | +39 | +50 | +61 | +75 | +92 | +112 | +134 | +159 | +185 | +215 | +240 | +265 | +290 |
| | EI | +14 | +20 | +25 | +32 | +40 | +50 | +60 | +72 | +85 | +100 | +110 | +125 | +135 |
| F8 | ES | +20 | +28 | +35 | +43 | +53 | +64 | +76 | +90 | +106 | +122 | +137 | +151 | +165 |
| | EI | +6 | +10 | +13 | +16 | +20 | +25 | +30 | +36 | +43 | +50 | +56 | +62 | +68 |
| G7 | ES | +12 | +16 | +20 | +24 | +28 | +34 | +40 | +47 | +54 | +61 | +69 | +75 | +83 |
| | EI | +2 | +4 | +5 | +6 | +7 | +9 | +10 | +12 | +14 | +15 | +17 | +18 | +20 |
| H6 | ES | +6 | +8 | +9 | +11 | +13 | +16 | +19 | +22 | +25 | +29 | +32 | +36 | +40 |
| | EI | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H7 | ES | +10 | +12 | +15 | +18 | +21 | +25 | +30 | +35 | +40 | +46 | +52 | +57 | +63 |
| | EI | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H8 | ES | +14 | +18 | +22 | +27 | +33 | +39 | +46 | +54 | +63 | +72 | +81 | +89 | +97 |
| | EI | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H9 | ES | +25 | +30 | +36 | +43 | +52 | +62 | +74 | +87 | +100 | +115 | +130 | +140 | +155 |
| | EI | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H10 | ES | +40 | +48 | +58 | +70 | +84 | +100 | +120 | +140 | +160 | +185 | +210 | +230 | +250 |
| | EI | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H11 | ES | +60 | +75 | +90 | +110 | +130 | +160 | +190 | +220 | +250 | +290 | +320 | +360 | +400 |
| | EI | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H12 | ES | 100 | +120 | +150 | +180 | +210 | +250 | +300 | +350 | +400 | +460 | +520 | +570 | +630 |
| | EI | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H13 | ES | 140 | +180 | +220 | +270 | +330 | +390 | +460 | +540 | +630 | +720 | +810 | +890 | +970 |
| | EI | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| J7 | ES | +4 | +6 | +8 | +10 | +12 | +14 | +18 | +22 | +26 | +30 | +36 | +39 | +43 |
| | EI | -6 | -6 | -7 | -8 | -9 | -11 | -12 | -13 | -14 | -16 | -16 | -18 | -20 |
| JS13 | ±E | ±70 | ±90 | ±110 | ±135 | ±165 | ±195 | ±230 | ±270 | ±315 | ±360 | ±405 | ±445 | ±485 |
| K6 | ES | +0 | +2 | +2 | +2 | +2 | +3 | +4 | +4 | +4 | +5 | +5 | +7 | +8 |
| | EI | -6 | -6 | -7 | -9 | -11 | -13 | -15 | -18 | -21 | -24 | -27 | -29 | -32 |
| K7 | ES | 0 | +3 | +5 | +6 | +6 | +7 | +9 | +10 | +12 | +13 | +16 | +17 | +18 |
| | EI | -10 | -9 | -10 | -12 | -15 | -18 | -21 | -25 | -28 | -33 | -36 | -40 | -45 |
| M7 | ES | -2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | EI | -12 | -12 | -15 | -18 | -21 | -25 | -30 | -35 | -40 | -46 | -52 | -57 | -63 |
| N7 | ES | -4 | -4 | -4 | -5 | -7 | -8 | -9 | -10 | -12 | -14 | -14 | -16 | -17 |
| | EI | -14 | -16 | -19 | -23 | -28 | -33 | -39 | -45 | -52 | -60 | -66 | -73 | -80 |
| P7 | ES | -6 | -8 | -9 | -11 | -14 | -17 | -21 | -24 | -28 | -33 | -36 | -41 | -45 |
| | EI | -16 | -20 | -24 | -29 | -35 | -42 | -51 | -59 | -68 | -79 | -88 | -98 | -108 |

| Tolérances ISO pour arbres et alésages | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| dimensions nominales (en mm) | | | | | | | | | | | | | |
| au-delà de à (inclus) | | 1 | 3 | 6 | 10 | 18 | 24 | 30 | 40 | 50 | 65 | 80 | 100 |
| | 3 | 6 | 10 | 18 | 24 | 30 | 40 | 50 | 65 | 80 | 100 | 120 | |
| c11 | es | -60 | -70 | -80 | -95 | -110 | -110 | -120 | -130 | -140 | -150 | -170 | -180 |
| | ei | -120 | -145 | -170 | -205 | -240 | -240 | -280 | -290 | -330 | -340 | -390 | -400 |
| r6 | es | +16 | +23 | +28 | +34 | +41 | +41 | +50 | +50 | +60 | +62 | +73 | +76 |
| | ei | +10 | +15 | +19 | +23 | +28 | +28 | +34 | +34 | +41 | +43 | +51 | +54 |
| C11 | ES | +120 | +145 | +170 | +205 | +240 | +240 | +280 | +290 | +330 | +340 | +390 | +400 |
| | EI | +60 | +70 | +80 | +95 | +110 | +110 | +120 | +130 | +140 | +150 | +170 | +180 |
| S7 | ES | -14 | -15 | -17 | -21 | -27 | -27 | -34 | -34 | -42 | -48 | -58 | -66 |
| | EI | -24 | -27 | -32 | -39 | -48 | -48 | -59 | -59 | -72 | -78 | -93 | -101 |
| U7 | ES | -18 | -19 | -22 | -26 | -33 | -40 | -51 | -61 | -76 | -91 | -111 | -131 |
| | EI | -28 | -31 | -37 | -44 | -54 | -61 | -76 | -86 | -106 | -121 | -146 | -166 |
| au-delà de à (inclus) | | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 225 | 250 | 280 | 315 | 355 | 400 | 450 |
| | | 140 | 160 | 180 | 200 | 225 | 250 | 280 | 315 | 355 | 400 | 450 | 500 |
| c11 | es | -200 | -210 | -230 | -240 | -260 | -280 | -300 | -330 | -360 | -400 | -440 | -480 |
| | ei | -450 | -460 | -480 | -530 | -550 | -570 | -620 | -650 | -720 | -760 | -840 | -880 |
| r6 | es | +88 | +90 | +93 | +106 | +109 | +113 | +126 | +130 | +144 | +150 | +166 | +172 |
| | ei | +63 | +65 | +68 | +77 | +80 | +84 | +94 | +98 | +108 | +114 | +126 | +132 |
| C11 | ES | +450 | +460 | +480 | +530 | +550 | +570 | +620 | +650 | +720 | +760 | +840 | +880 |
| | EI | +200 | +210 | +230 | +240 | +260 | +280 | +300 | +330 | +360 | +400 | +440 | +480 |
| S7 | ES | -77 | -85 | -93 | -105 | -113 | -123 | -138 | -150 | -169 | -187 | -209 | -229 |
| | EI | -117 | -125 | -133 | -151 | -159 | -169 | -190 | -202 | -226 | -244 | -272 | -292 |
| U7 | ES | -155 | -175 | -195 | -219 | -241 | -267 | -295 | -330 | -369 | -414 | -467 | -517 |
| | EI | -195 | -215 | -235 | -265 | -287 | -313 | -347 | -382 | -426 | -471 | -530 | -580 |

9

ÉLÉMENTS DE COTATION FONCTIONNELLE

OBJECTIFS

- Définir les notions de cote fonctionnelle, de cote-condition et de chaîne de cotes.
- Donner une méthode de détermination des chaînes de cote et indiquer les règles de représentation vectorielle.
- Proposer des exemples et des exercices.

Les machines et les mécanismes sont constitués d'ensembles et de sous-ensembles de composants ou « pièces », assemblés et empilés les uns sur les autres. Chaque composant est fabriqué en série à partir de dimensions tolérancées. Conséquence : les tolérances successives des pièces empilées s'ajoutent, s'accumulent et font varier les jeux nécessaires à l'assemblage et au fonctionnement. La cotation fonctionnelle permet, à partir de calculs (chaînes de cotes...), de prévoir et calculer les liens qui existent entre jeux et dimensions tolérancées.

Sur les dessins d'ensemble, elle apparaît sous la forme de jeux ou serrage fonctionnels (cotes-conditions) et sur les dessins de définition ou de détail sous forme de cotes tolérancées et de tolérances géométriques. Les ajustements normalisés sont l'une des applications de la cotation fonctionnelle. L'approche statistique est abordée page 482.

I - Définitions

Cote-condition ou « jeu » : inscrite dans un dessin d'ensemble, c'est une cote tolérancée qui exprime une exigence liée au fonctionnement ou à l'assemblage d'un ensemble de pièces.

Exemple : jeu nécessaire à un montage, à une liberté de mouvement...

Cote fonctionnelle : inscrite dans un dessin de définition, une cote fonctionnelle est une cote tolérancée appartenant à une pièce et ayant une influence, dans la mesure où elle varie dans son intervalle de tolérance, sur la valeur d'une cote-condition.

Une cote fonctionnelle est délimitée, à ses extrémités, par deux surfaces d'appui ou par une surface d'appui et une surface terminale.

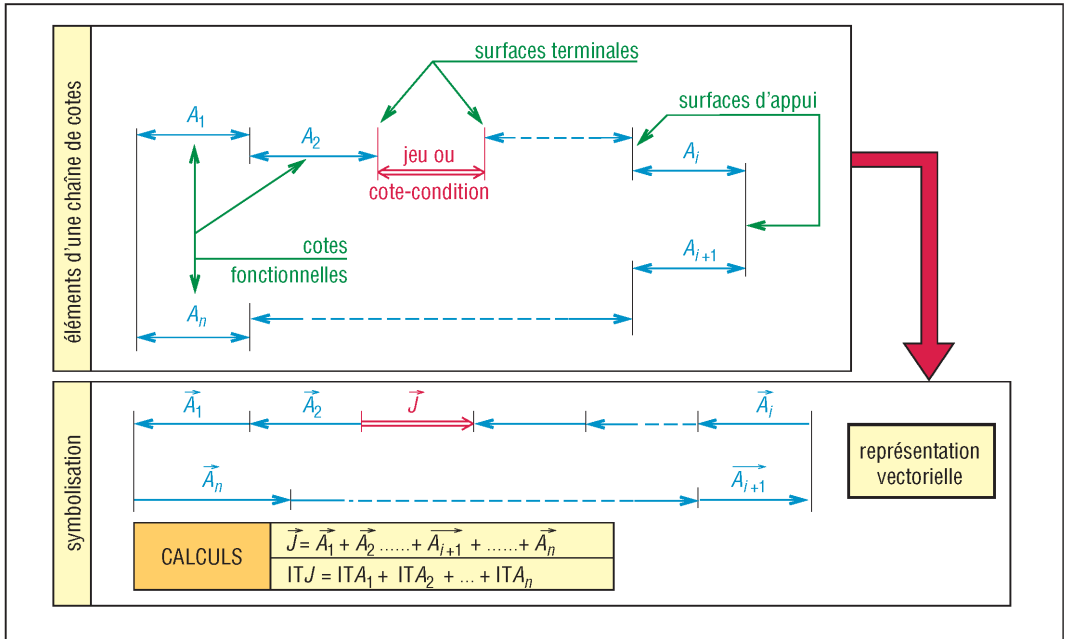
Surfaces terminales (éléments terminaux) : surfaces ou éléments (lignes...) qui précisent les deux extrémités d'une cote-condition ou jeu.

Surface d'appui : surface (ligne...) de contact entre deux pièces successives qui sert de limite, ou d'extrémité, à des cotes fonctionnelles.

Chaîne de cotes : elle rassemble toutes les cotes fonctionnelles ayant une influence sur la valeur d'une même cote condition ou jeu, et aucune autre. L'ensemble de ces dimensions, ou « maillons », disposées en série, bout à bout, forme une boucle ou un circuit fermé comme une sorte de chaîne en collier.

II - Représentation vectorielle des chaînes de cotes

Lorsque l'ensemble des cotes fonctionnelles d'une même chaîne est repéré, il est possible d'adopter, pour la description, une représentation vectorielle.



1. Exemple de chaîne de cotes et représentation vectorielle correspondante.

1. Conventions usuelles de représentation

- La cote-condition est représentée par un vecteur double trait ou « vecteur jeu J ».
- Les cotes fonctionnelles par des vecteurs simples traits.
- Le sens positif est donné par le sens du vecteur jeu J .
- Le vecteur jeu J est supposé égal à la somme de tous les vecteurs cotes fonctionnelles de la chaîne.

2. Équation de projection et calcul

Dans le cas général, les vecteurs sont tous parallèles entre eux. La projection sur un axe parallèle et de même sens que J permet d'obtenir une relation algébrique définissant le jeu (J est égal à la somme des vecteurs de sens positifs moins la somme des vecteurs de sens négatifs) :

$$J = (A_{i+1} + \dots + A_n) - (A_1 + A_2 + \dots + A_i) \quad \text{(fig. 1)}$$

a) Jeu maximal

Le jeu est maximal si les dimensions des vecteurs positifs sont maximales et si les dimensions des vecteurs négatifs sont minimales :

$$\begin{aligned} J_{\text{maxi}} &= (A_{i+1} + \dots + A_n)_{\text{maxi}} - (A_1 + A_2 + \dots + A_i)_{\text{mini}} \\ &= (A_{i+1\text{maxi}} + \dots + A_{n\text{maxi}}) - (A_{1\text{mini}} + A_{2\text{mini}} + \dots + A_{i\text{mini}}) \end{aligned} \quad \text{(fig. 1)}$$

b) Jeu minimal

Le jeu est minimal si les dimensions des vecteurs positifs sont minimales et si les dimensions des vecteurs négatifs sont maximales.

$$\begin{aligned}
 J_{\text{mini}} &= (A_{i+1} + \dots + A_n)_{\text{mini}} - (A_1 + A_2 + \dots + A_i)_{\text{maxi}} \\
 &= (A_{i+1\text{mini}} + \dots + A_{n\text{mini}}) - (A_{1\text{maxi}} + A_{2\text{maxi}} + \dots + A_{i\text{maxi}})
 \end{aligned}
 \quad (\text{fig. 1})$$

c) Intervalle de tolérance sur le jeu (ITJ)

Il est égal à la différence entre le jeu maxi et le jeu mini. C'est aussi la somme des intervalles de tolérances de toutes les cotes fonctionnelles de la chaîne.

$$ITJ = J_{\text{maxi}} - J_{\text{mini}} = (A_{1\text{maxi}} - A_{1\text{mini}}) + (A_{2\text{maxi}} - A_{2\text{mini}}) + \dots + (A_{n\text{maxi}} - A_{n\text{mini}})$$

$$ITJ = ITA_1 + ITA_2 + \dots + ITA_n$$

III - Détermination des chaînes de cotes

1. Définitions

Déterminer une chaîne de cotes : c'est découvrir et repérer toutes les cotes qui sont fonctionnelles pour un jeu J donné, c'est-à-dire toutes les cotes qui, lorsqu'elles varient dans leur intervalle de tolérance, ont une influence sur la valeur de ce jeu.

Installer une chaîne de cotes : consiste à déterminer tous les maillons, ou cotes fonctionnelles, de la chaîne et les dessiner sous forme vectorielle sur le plan d'ensemble correspondant.

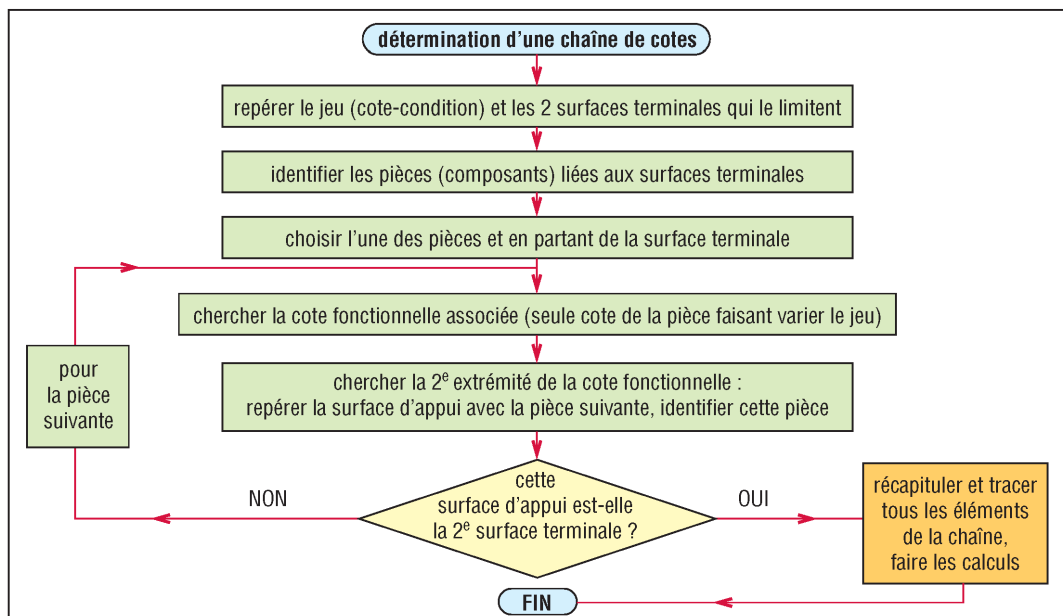
Chaîne de cotes minimale : une chaîne est dite minimale lorsqu'elle ne contient que les cotes fonctionnelles nécessaires et suffisantes à son installation et aucune autre.

2. Méthode de recherche (voir organigramme)

– Choisir judicieusement et avec méthode (partir des surfaces d'appui et des surfaces terminales connues) les cotes supposées fonctionnelles pour le jeu étudié.

– Faire varier la cote choisie dans son intervalle de tolérance. Si le jeu varie, pendant que toutes les autres cotes de l'ensemble sont maintenues constantes, alors la cote est un maillon de la chaîne cherchée.

Remarque : en cas d'échec dans une direction donnée, par exemple si la surface d'appui est difficile à identifier, continuer la recherche en exploitant la deuxième surface terminale.



2. Organigramme de détermination d'une chaîne de cotes.

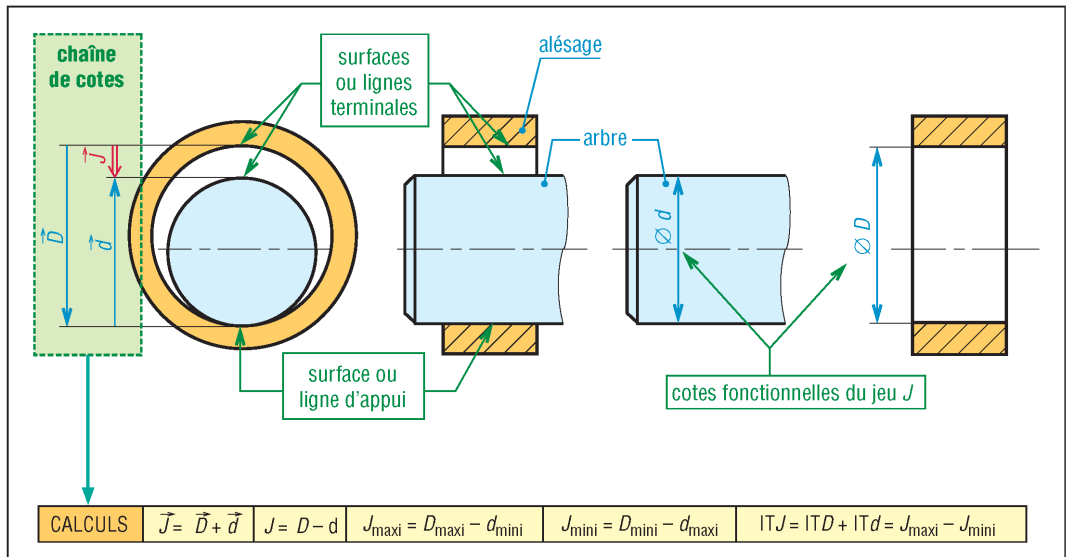
3. Règles et propriétés

- Chaque cote fonctionnelle doit appartenir à une seule et même pièce ; elle ne peut pas être une dimension mesurée entre deux pièces différentes.
- Il ne peut y avoir qu'une seule cote fonctionnelle par pièce et par chaîne.
- Une même cote peut être cote fonctionnelle pour plusieurs chaînes différentes.
- Sauf cas très particulier, il ne peut y avoir qu'une seule cote-condition ou jeu par chaîne de cotes.

IV - Exemples

1. Cas des ajustements normalisés ISO/AFNOR

Ils représentent la chaîne de cotes la plus simple avec trois maillons : le jeu plus deux cotes fonctionnelles (diamètres de l'arbre et de l'alésage). Le jeu peut être positif ou négatif si le montage est serré.



3. Exemple 1 : jeu et cotes fonctionnels des ajustements usuels.

Exemple numérique (ajustement $\varnothing 50H7/f6$) :

$d = 50 f6$ ($49,959 \leq d \leq 49,975$) (tableau page 91)

$ITd = 49,975 - 49,959 = 0,016$

$D = 50 H7$ ($50,000 \leq D \leq 50,025$) (tableau page 92)

$ITD = 50,025 - 50,000 = 0,025$

$J_{\text{maxi}} = D_{\text{maxi}} - d_{\text{mini}} = 50,025 - 49,959 = 0,066$

$J_{\text{mini}} = D_{\text{mini}} - d_{\text{maxi}} = 50,000 - 49,975 = 0,025$

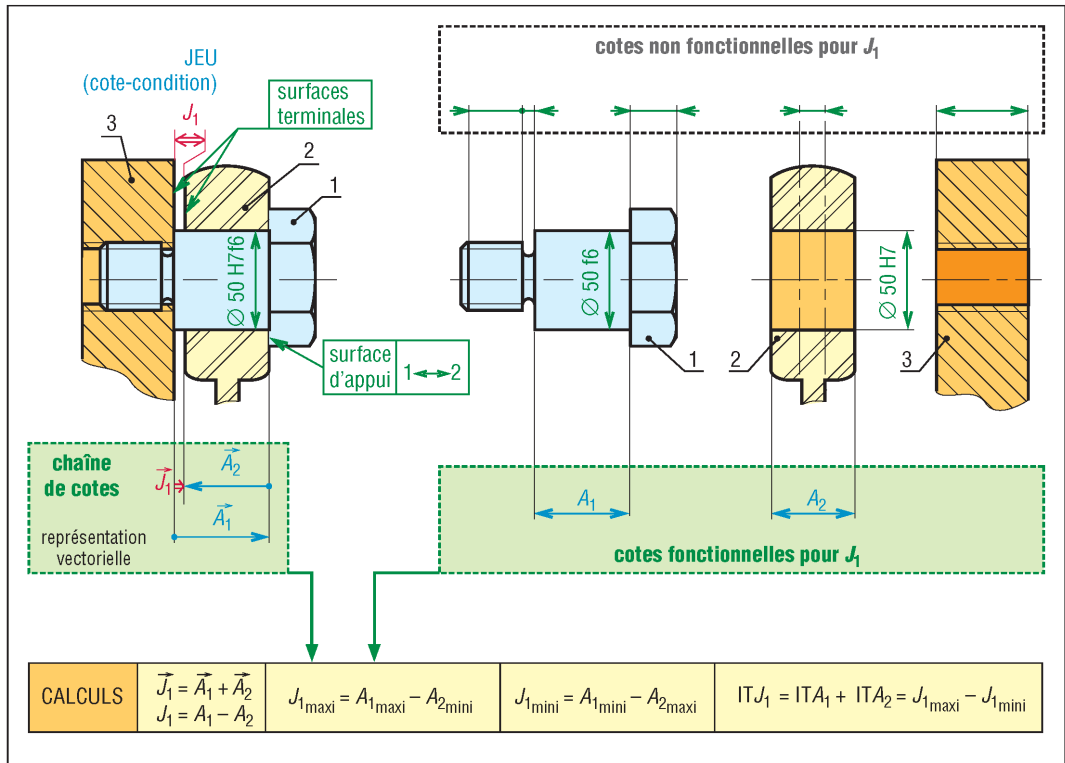
$ITJ = J_{\text{maxi}} - J_{\text{mini}} = 0,066 - 0,025 = 0,041$

$ITJ = ITd + ITD = 0,016 + 0,025 = 0,041$

2. Articulation cylindrique

Le dispositif se compose d'un bâti fixe 3, d'un axe ou pivot 1 serré et bloqué sur 3 et d'un biellette 2 pouvant tourner librement autour de 1.

Le jeu J_1 , nécessaire au fonctionnement, évite le serrage et garantit la libre rotation de la pièce 2.



4. Exemple 2 : articulation cylindrique.

a) Chaîne de cotes installant J_1

J_1 est le jeu entre 3 et 2. Il y a donc une cote de la pièce 2, et une seule, qui est cote fonctionnelle pour J_1 . De toutes les cotes possibles démarrant de la surface terminale droite du jeu, A_2 est la seule possible. Si A_2 diminue alors que toutes les autres dimensions restent constantes, J_1 augmente et inversement.

A_2 a sa deuxième extrémité sur la surface d'appui 2/1. En conséquence une cote de la pièce 1, et une seule, est cote fonctionnelle de J_1 . A_1 est la seule cote, démarrant de la surface 2/1, possible. Si A_1 diminue, toutes les autres dimensions étant maintenues constantes, J_1 diminue et inversement.

A_1 a sa deuxième extrémité sur la surface d'appui 1/3. C'est aussi la deuxième surface terminale de J_1 . La boucle est terminée, toutes les cotes fonctionnelles installant J_1 sont connues.

Remarque : aucune des cotes de la pièce 3, démarrant de la surface d'appui 1/3, peut être cote fonctionnelle de J_1 . Toutes les cotes envisageables peuvent varier, dans leur IT, sans modifier la valeur du jeu.

b) Exemple numérique

Données : $[25,0 \leq A_1 \leq 25,5]$ et $[23,6 \leq A_2 \leq 24,0]$

$$J_{1\text{maxi}} = A_{1\text{maxi}} - A_{2\text{mini}} = 25,5 - 23,6 = 1,9$$

$$J_{1\text{mini}} = A_{1\text{mini}} - A_{2\text{maxi}} = 25,0 - 24,0 = 1,0$$

$$ITJ_1 = J_{1\text{maxi}} - J_{1\text{mini}} = 1,9 - 1,0 = 0,9$$

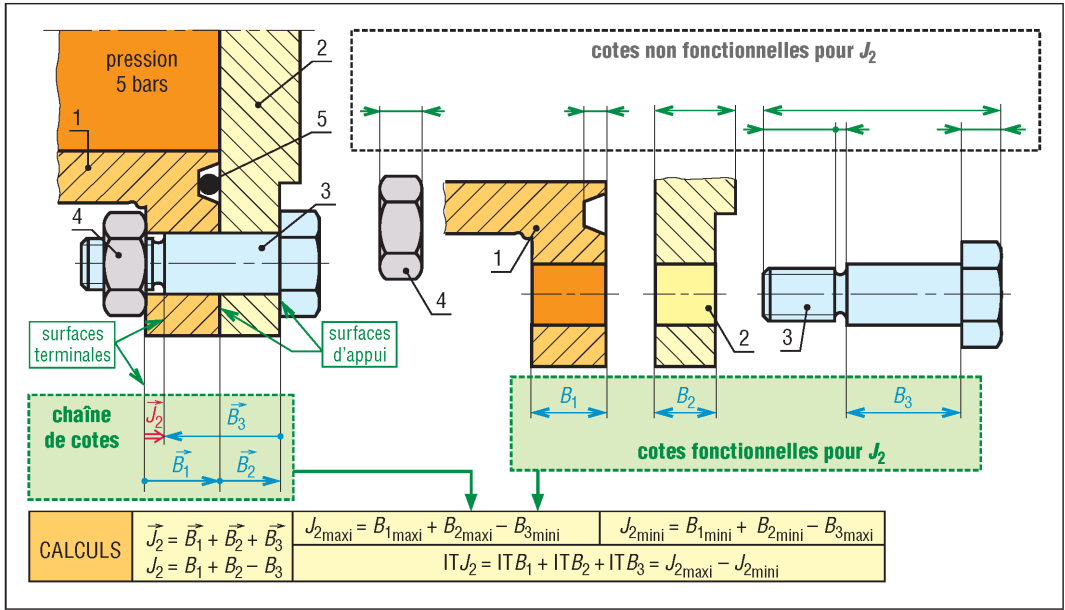
$$ITJ_1 = ITA_1 + ITA_2 = 0,5 + 0,4 = 0,9$$

autrement dit : $1,0 \leq J_1 \leq 1,9$.

3. Fond de réservoir

Le couvercle 4 ferme un réservoir contenant un fluide sous pression (5 bars). Le serrage du couvercle est réalisé par une série de boulons identiques (3 + 4) et l'étanchéité assurée par un joint torique 5.

Le jeu J_2 garantit le serrage du couvercle et l'étanchéité ; il évite l'appui de l'écrou 4 sur l'épaulement de la vis 3 et des fuites.



5. Exemple 3 : fond de réservoir.

a) Chaîne installant J_2

J_2 est un jeu entre 4 et 3. Il y a donc une cote de la pièce 3 et une seule qui peut être cote fonctionnelle de J_2 . Parmi toutes les cotes envisageables, démarrants de la surface terminale droite du jeu, B_3 est la seule possible.

B_3 a sa deuxième extrémité sur la surface d'appui 3/2. Il y a donc une cote de la pièce 2 et une seule qui peut être fonctionnelle pour J_2 . Parmi toutes les cotes (démarrant de la surface d'appui 3/2), B_2 est la seule possible.

B_2 a sa deuxième extrémité sur la surface d'appui 2/1. Il y a donc une cote de la pièce 1 et une seule qui peut être fonctionnelle pour J_2 . Parmi toutes les cotes, démarrants de la surface d'appui 2/1, B_1 est la seule possible.

B_1 a sa deuxième extrémité sur la surface d'appui 1/4. Cette surface d'appui est aussi la deuxième surface terminale de J_2 ; à noter qu'aucune cote de l'écrou 4 ne peut être cote fonctionnelle de J_2 . Toutes les cotes fonctionnelles de la chaîne sont donc connues.

b) Exemple numérique

Données : $20,0 \leq B_1 \leq 22,0$; $18,0 \leq B_2 \leq 19,2$; $39,0 \leq B_3 \leq 40,0$

$$J_{2\text{maxi}} = B_{1\text{maxi}} + B_{2\text{maxi}} - B_{3\text{mini}} = 22,0 + 19,2 - 39,0 = 41,2 - 39,0 = 2,2$$

$$J_{2\text{mini}} = B_{1\text{mini}} + B_{2\text{mini}} - B_{3\text{maxi}} = 20,0 + 18,0 - 40,0 = 38,0 - 40,0 = -2,0$$

$$ITJ_2 = ITB_1 + ITB_2 + ITB_3 = 2,0 + 1,2 + 1,0 = 4,2$$

$$ITJ_2 = J_{2\text{maxi}} - J_{2\text{mini}} = 2,2 - (-2,0) = 4,2.$$

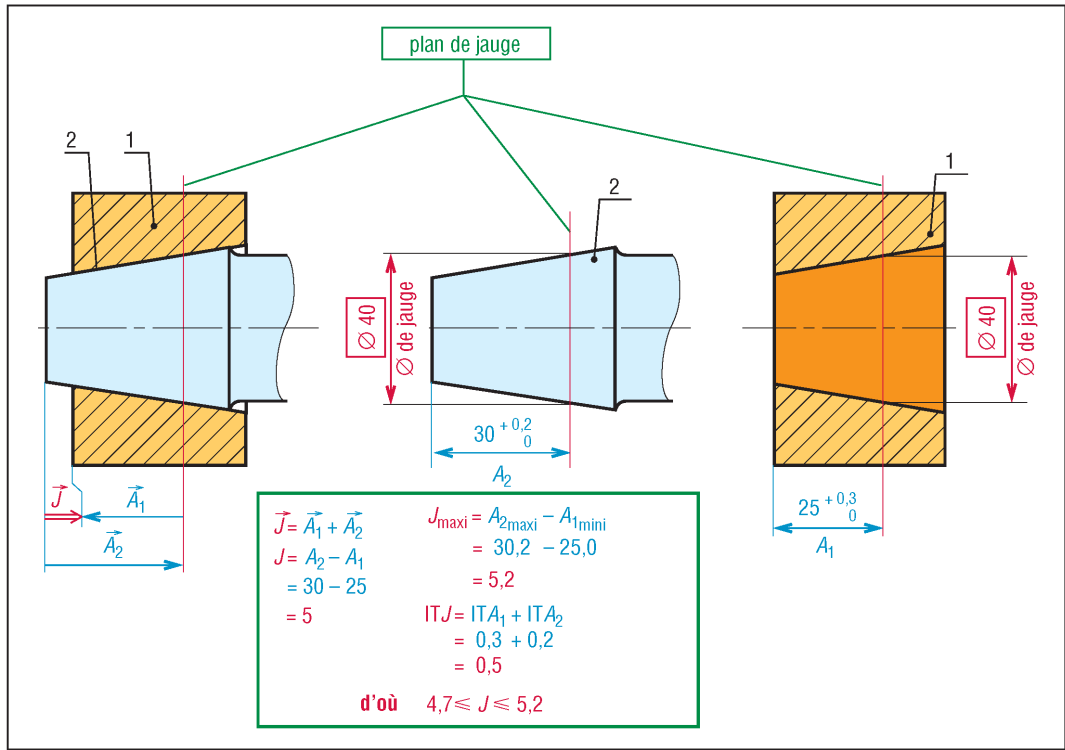
Remarque : pour les dimensions choisies, il existe de nombreux cas possibles où $B_3 > B_1 + B_2$; cela amène un jeu négatif « $J_2 < 0$ » et par là des fuites. Le serrage du couvercle n'est donc pas garanti; il ne pourra l'être que si J_2 est toujours positif.

V - Cas des formes coniques

La position axiale des formes coniques, cylindriques ou prismatiques, exige l'emploi d'un plan de jauge (plan de référence permettant la cotation). Les cotes théoriques nécessaires à la définition de ce plan doivent être encadrées.

1. Exemple 1 : arbre et douilles coniques

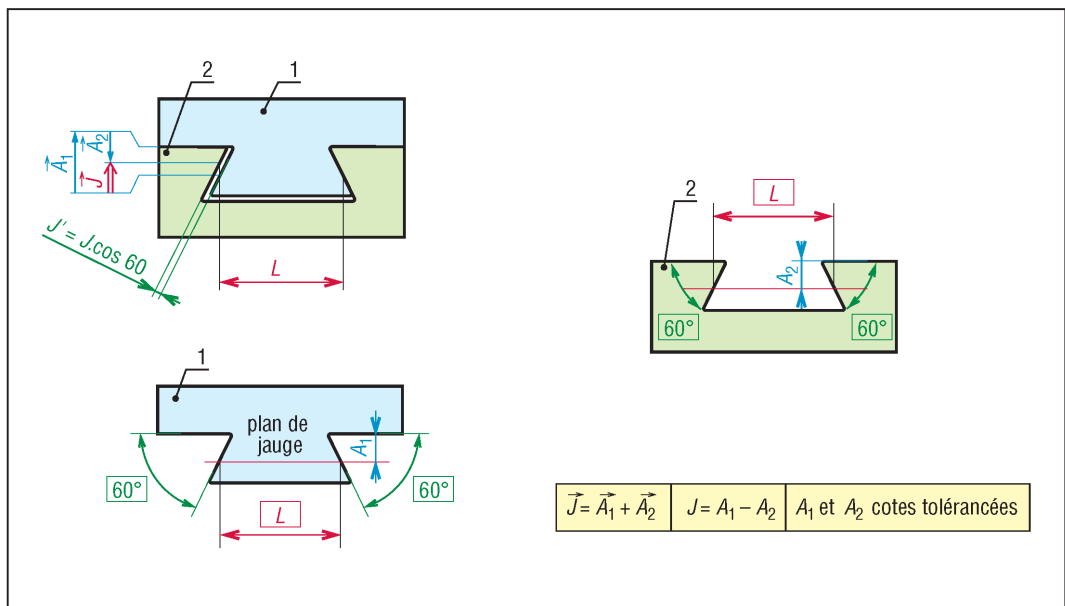
Le jeu J évite la déformation, ou bourrelet de matière, du fond de l'alésage conique 1. Les cotes A_1 et A_2 définissent les positions axiales des extrémités des deux pièces à partir du plan de jauge. Ce plan est défini par le diamètre de jauge de 40 (cote théorique encadrée).



6. Arbre et douille coniques.

2. Exemple 2 : guidage par queue d'aronde

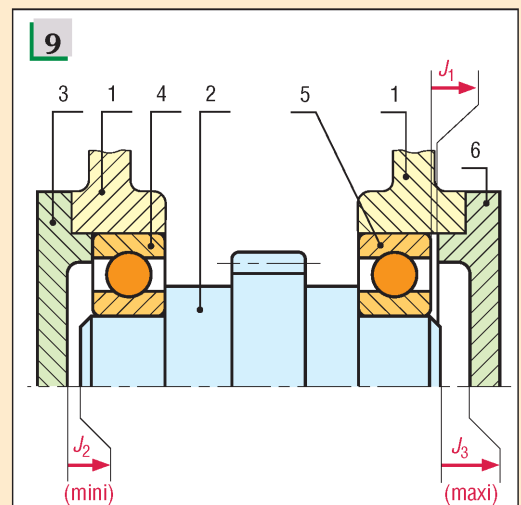
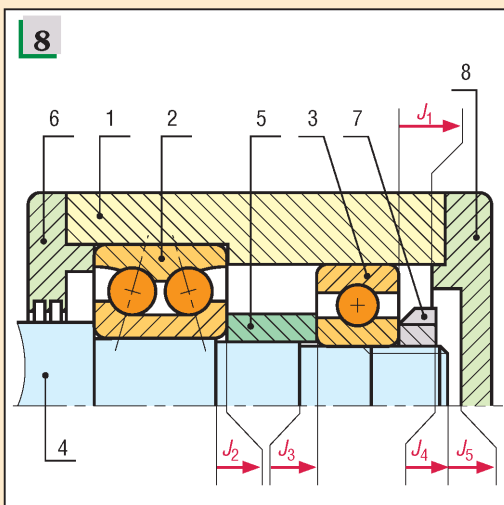
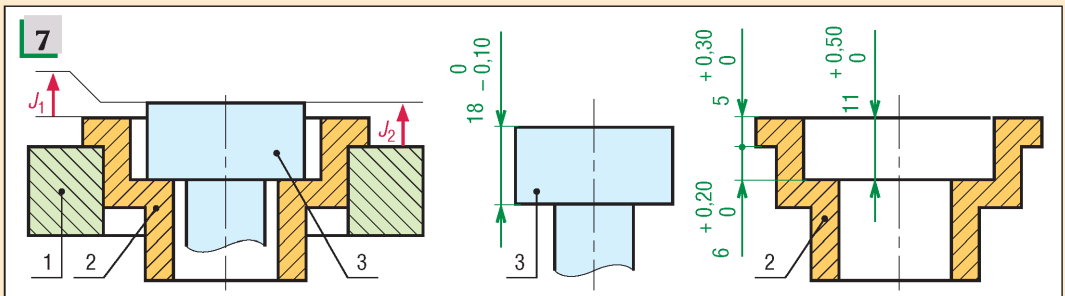
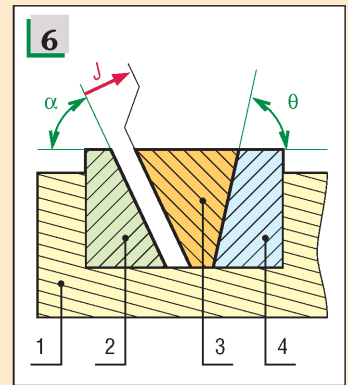
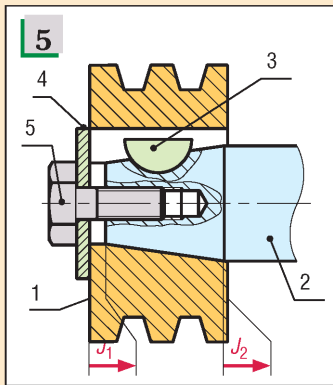
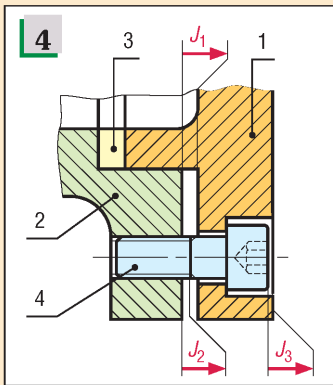
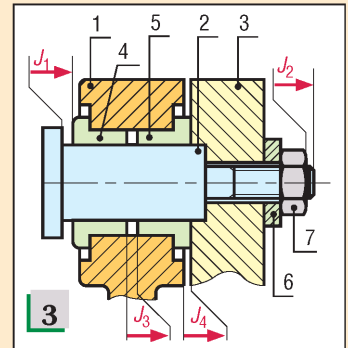
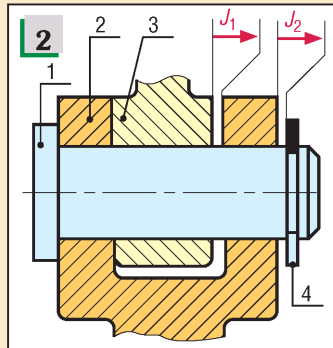
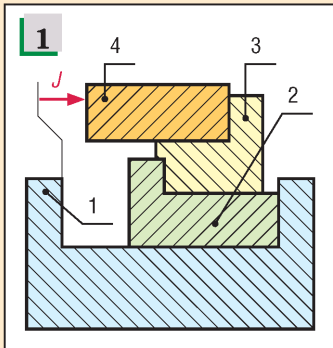
L'angle d'inclinaison et la manière de repérer le jeu jouent un rôle : J' jeu entre les deux surfaces est égal à $J \cdot \cos \alpha$.



7. Forme en queue d'aronde.

VI - Exercices

Pour les exercices suivants installer les chaînes de cotes relatives aux jeux indiqués. Pour l'exercice 7, calculer $J_{1\text{maxi}}$, $J_{1\text{mini}}$, ITJ_1 , $J_{2\text{maxi}}$, $J_{2\text{mini}}$ et ITJ_2 .



10

TOLÉRANCES GÉOMÉTRIQUES

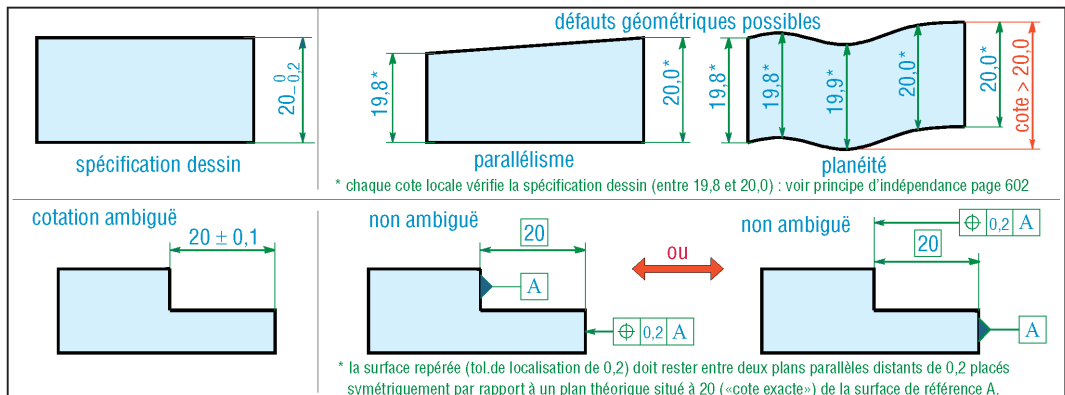
(Normes GPS)

OBJECTIFS

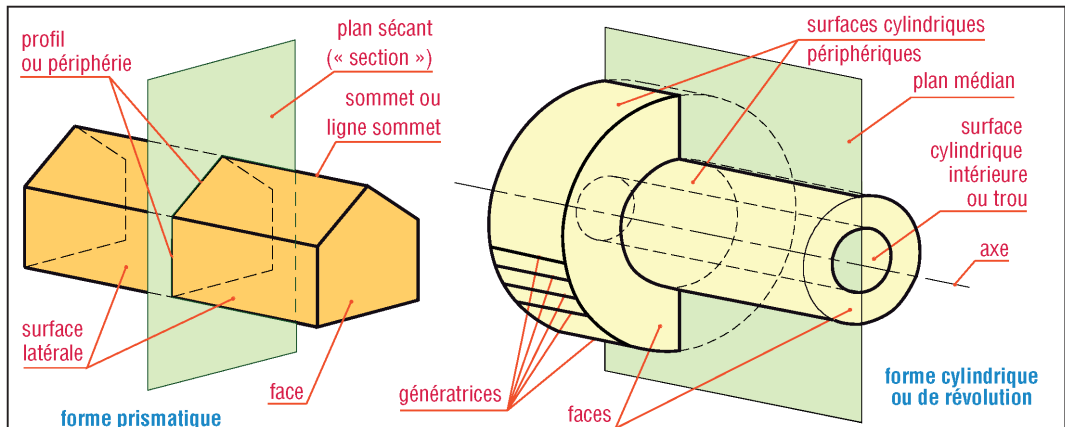
- Décrire et définir les tolérances géométriques et indiquer la normalisation correspondante : symboles, règles d'inscription...
- Donner des notions dans le cas de la cotation au maximum de matière.

Les tolérances dimensionnelles usuelles (ajustements...) ne suffisent pas toujours pour définir rigoureusement la forme géométrique d'un objet. Malgré la cotation tolérancée des dimensions, des défauts géométriques nuisibles au fonctionnement et à l'assemblage sont toujours possibles (exemple fig. 1).

Principales normes GPS utilisées : NF EN ISO 1101, NF E 04-554 (ISO 5459), E 04-555 (ISO 2692), NF ISO 8015. Voir aussi NF EN ISO 5459 (références...).



1. Exemples de défauts géométriques et de cotation ambiguë corrigée par un tolérancement géométrique.



2. Rappels géométriques.

| Les tolérances géométriques - NF EN ISO 1101 | | | | |
|---|-------------------------------|---|---|------------|
| Tolérances | Caractéristiques géométriques | symbole | Références nécessaires | Paragraphe |
| tolérances de forme | rectitude | | non | II |
| | planéité | | non | II |
| | circularité | | non | II |
| | cylindricité | | non | II |
| | profil d'une ligne | | non | II |
| | profil d'une surface | | non | II |
| tolérances d'orientation | parallélisme | | oui | III |
| | perpendicularité | | oui | III |
| | inclinaison | | oui | III |
| | profil d'une ligne | | oui | II |
| | profil d'une surface | | oui | II |
| tolérances de position | localisation | | oui ou non | IV |
| | concentricité (centres) | | oui | IV |
| | coaxialité (axes) | | oui | IV |
| | symétrie | | oui | IV |
| | profil d'une ligne | | oui | II |
| | profil d'une surface | | oui | II |
| tolérances de battement | battement circulaire | | oui | V |
| | battement total | | oui | V |
| Symboles complémentaires | | | | |
| indication de l'élément de référence | | entre de ... à | NC non convexe CZ zone commune LD diamètre intérieur MD diamètre extérieur PD diamètre sur flancs ACS toute section droite ALS section longitudinale LE élément ligne | |
| indication de l'élément tolérancé | | (E) exigence de l'enveloppe (F) condition à l'état libre (pièces non rigides) (L) exigence au minimum de matière (M) exigence au minimum de matière (P) zone de tolérance projetée (R) exigence de réciprocité | (E) exigence de l'enveloppe (F) condition à l'état libre (pièces non rigides) (L) exigence au minimum de matière (M) exigence au minimum de matière (P) zone de tolérance projetée (R) exigence de réciprocité | |
| dimension théorique exacte | | indication de référence partielle | indication de référence partielle | |
| référence partielle (mobile) | | tout autour (profil) | tout autour (profil) | |
| zone de tolérance cylindrique ou circulaire | | élément de direction (plan, cylindre, cône) | élément de direction (plan, cylindre, cône) | |
| zone de tolérance sphérique | | plan de collection | plan de collection | |
| | | plan d'intersection | plan d'orientation | |

3. Les tolérances géométriques : symboles des caractéristiques géométriques et symboles complémentaires normalisés.

Les tolérances géométriques (normes internationales : **fig. 3**) permettent de corriger ces défauts et précisent les variations permises. Elles sont toujours restrictives par rapport aux tolérances dimensionnelles. Leur emploi ne doit pas être systématique. Un excès de spécifications amène un surcoût inutile. Les tolérances retenues doivent rester aussi larges que possible. La norme 2013 ajoute de la cotation 3D avec des spécifications complémentaires.

I - Inscriptions normalisées

1. Inscription des éléments de référence

Contrairement aux tolérances de forme, les tolérances de position, d'orientation et de battement exigent l'emploi d'une référence ou élément de référence : point, axe, ligne, surface...

a) Identification d'un élément de référence : la forme choisie comme référence (ligne, surface, point), doit être identifiée par une lettre majuscule inscrite dans un cadre relié à un triangle, noirci ou non (**fig. 4-1 et 4-3**).

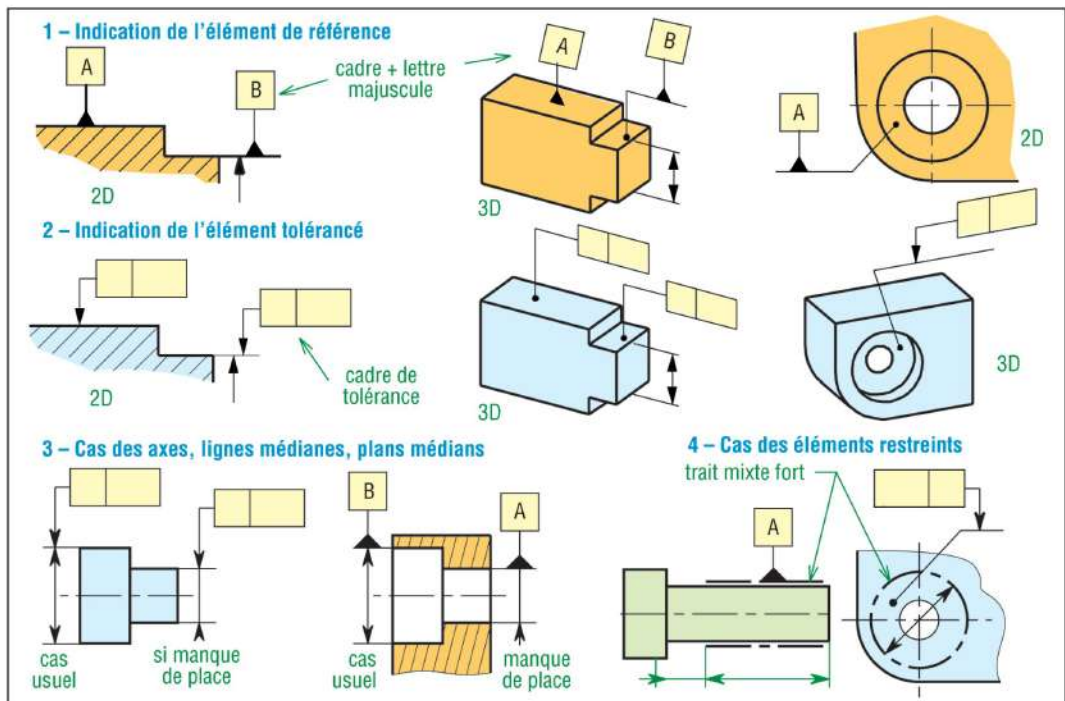
b) Éléments restreints : si la référence ne concerne qu'une partie de la forme choisie (élément restreint), cette partie doit être représentée par un trait mixte fort et les cotes utiles indiquées (**fig. 4-4**).

c) Références partielles : il est parfois nécessaire de repérer un ou plusieurs points, une ligne ou une zone limitée comme élément de référence. À cette fin on utilise les références partielles (normalisation **fig. 6**). Par exemple, trois points définissent un plan de référence.

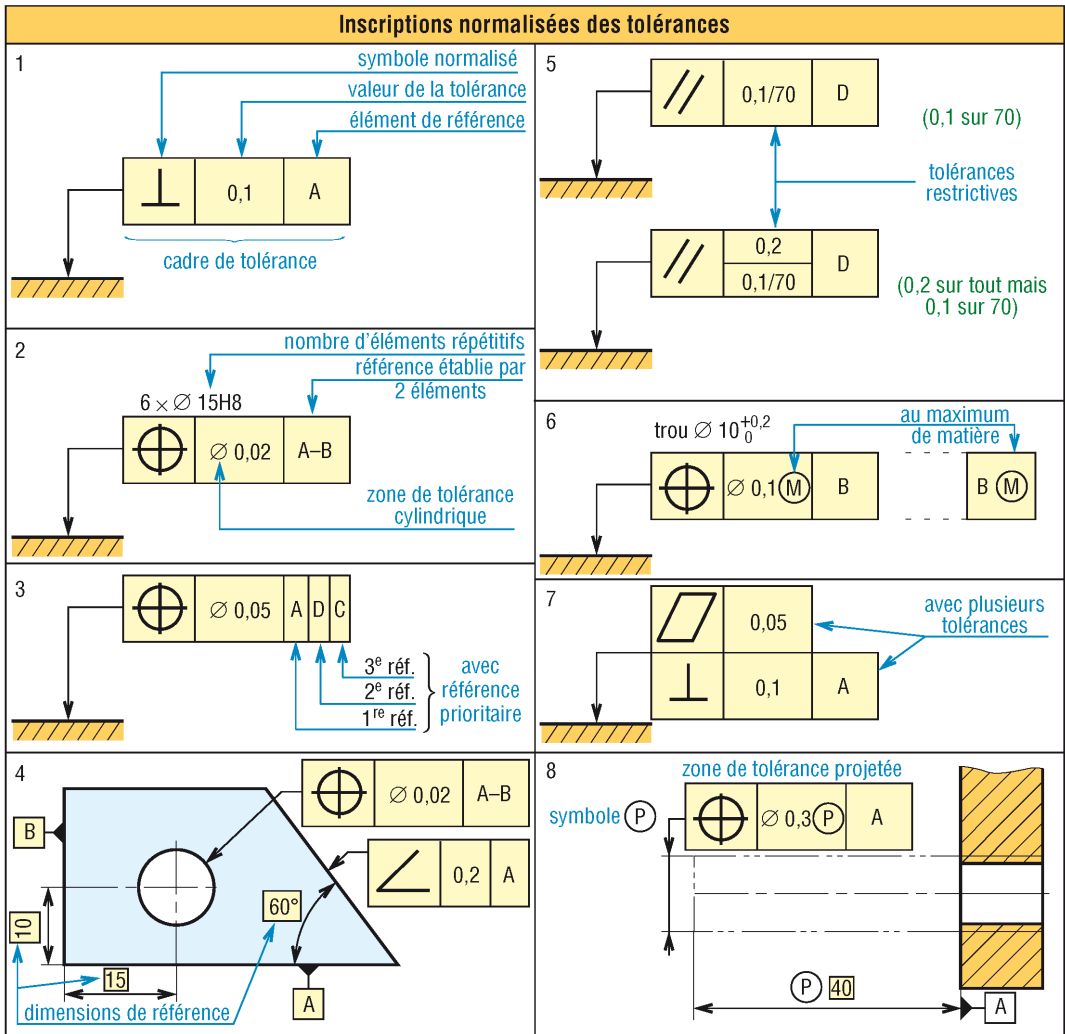
L'identification est inscrite dans la partie inférieure du cadre circulaire normalisé et les informations additionnelles (dimension zone...) dans la partie supérieure.

d) Dimensions théoriquement exactes : pour un élément de référence, et pour un élément à tolérer, il faut parfois indiquer ou ajouter certaines cotes utiles (dimensions de référence) pour définir une forme, une position, un angle ou une orientation.

Ces cotes ne doivent pas être tolérancées et doivent être encadrées pour les différencier de la cotation normale (**fig. 5-4 et 6**).



4. Inscriptions normalisées des éléments de références et des éléments tolérancés (inscriptions 2D et 3D).



5. Inscriptions normalisées des tolérances (existent en 2D et 3D).

2. Inscription des éléments tolérancés

a) Cas général : la forme à coter est repérée par une flèche reliée à un cadre rectangulaire appelé cadre de tolérance. Dans ce cadre, et dans des cases différentes, sont inscrits dans l'ordre : le symbole du défaut à coter, la valeur de la tolérance et si nécessaire la lettre majuscule repérant l'élément de référence (fig. 4-2, 4-3 et 5-1).

b) Cas exigeant plusieurs éléments de référence : si deux ou plusieurs éléments sont indispensables à la référence, les lettres correspondantes, séparées par un trait d'union, sont toutes inscrites dans la même case (fig. 5-2). **Exemple** : coaxialité (fig. 11).

Si un ordre de priorité doit être respecté au moment de la vérification, les lettres sont inscrites dans des cases séparées (fig. 5-3). **Exemple** : localisation (fig. 11).

c) Cas d'un élément restreint : une même forme peut parfois être tolérancée sur une partie restreinte ou encore comporter deux tolérances différentes. Les tolérances restrictives permettent la cotation de ces cas (fig. 4-4 et 5-5).

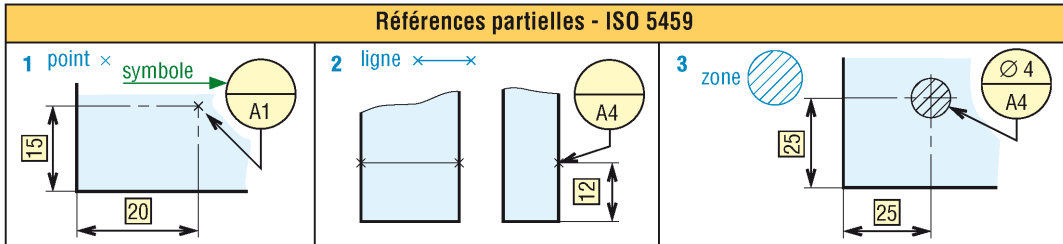
d) Cas d'éléments séparés : si la tolérance concerne un groupe de plusieurs éléments séparés ou distincts, la cotation doit être effectuée comme l'indiquent la figure 8. Si l'exigence s'applique à l'ensemble de tous les éléments séparés, la mention CZ (zone commune) est ajoutée à la suite de la tolérance. Sans cette mention, l'exigence porte sur chaque élément.

e) Cas de plusieurs tolérances : si une même forme reçoit plusieurs tolérances de nature différentes en même temps, l'inscription peut être effectuée comme l'indique la figure 5-7.

f) Cas d'une cotation au maximum de matière : l'inscription doit être réalisée avec le symbole M encadré (fig. 5-6). Le principe peut s'appliquer à la tolérance, à la référence ou aux deux en même temps. Il ne s'applique pas aux tolérances de battement. (Voir aussi paragraphe VIII).

g) Cas d'une zone de tolérance projetée : dans certains cas, la tolérance géométrique n'est pas appliquée à un élément ou une forme mais uniquement à son prolongement (en dehors l'objet). Utilisations : formes servant d'implantations à des goujons, clavettes, goupilles...

Le symbole P encadré doit être utilisé après la valeur de la tolérance géométrique et avant toutes les cotes utiles à la définition de la forme projetée (fig. 5-8).



6. Références partielles permettant de définir des éléments de référence (plan...).

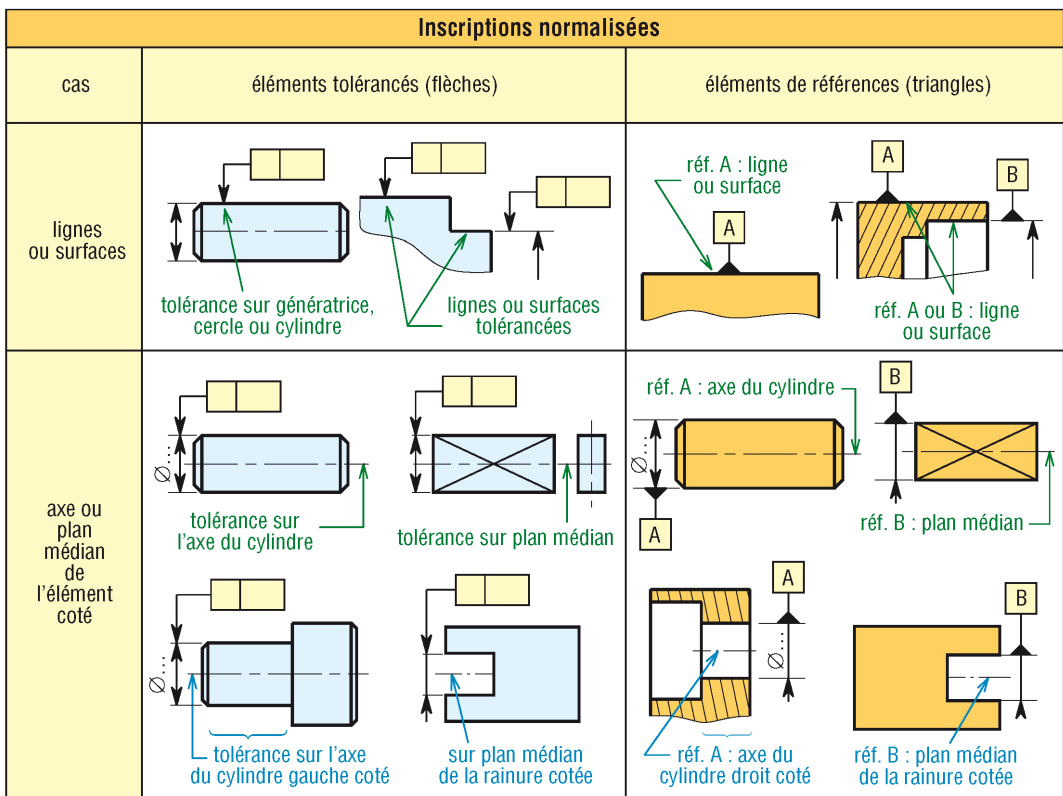
3. Repérage des éléments de référence et des éléments tolérancés

Les éléments tolérancés ou les éléments de référence peuvent être :

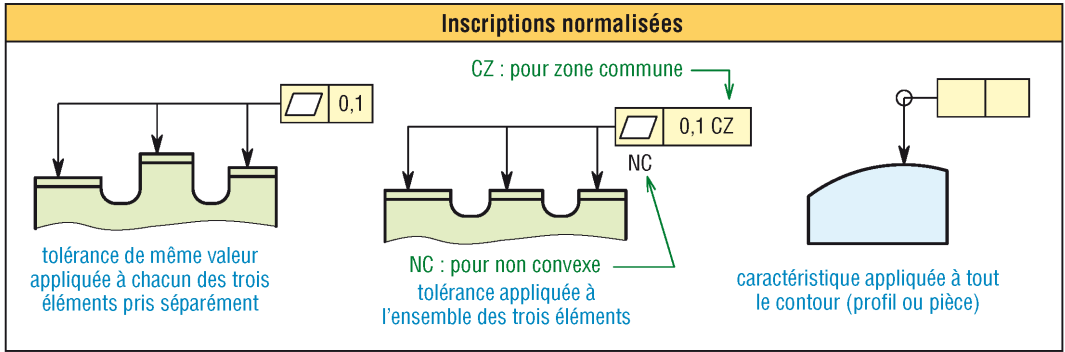
- des lignes ou des surfaces ;
- des axes, des plans médians d'objets ou des centres ;
- des axes ou des plans médians d'une partie ou d'un tronçon d'un objet.

Dans le premier cas, le triangle ou la flèche doivent aboutir sur l'élément même ou, si ce n'est pas possible, sur une ligne de rappel (fig. 7).

Dans les deux autres cas, le triangle ou la flèche doivent aboutir et être tracés dans le prolongement de la ligne de cote donnant la dimension de la forme (fig. 7).



7. Repérage des éléments : lignes, surfaces, axes, lignes médianes et surfaces médianes (existent en 2D et 3D).



8. Caractéristiques particulières.

II - Tolérances de forme

| Symbole | Exemple | Interprétation | Observations |
|--------------------------|------------------|---|---|
| rectitude | 2D 3D | <p>zone de tolérance</p> <p>ligne possible</p> <p>La zone de tolérance dans le plan considérée est limitée par 2 droites parallèles distantes de 0,1 mm dans la direction parallèle au plan A de référence.</p> | Toute ligne extraite de la surface supérieure, parallèle au plan de projection (en 2D) ou au plan de référence A comme spécifié par l'indicateur de plan d'intersection (en 3D), doit être contenue entre deux droites distantes de 0,1 mm. |
| | | <p>axe possible</p> | L'axe du cylindre doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,2, coaxiale ou non à l'axe de la pièce |
| planéité | | <p>plan possible</p> | La surface de la pièce doit rester entre deux plans parallèles distants de 0,2, parallèles ou non aux autres parties de l'objet. |
| circularité | | <p>cercle possible</p> | Le profil de chaque section perpendiculaire à l'axe doit rester entre deux cercles concentriques distants de 0,1, centrés ou non sur l'axe du cylindre. |
| cylindricité | | <p>cylindre possible</p> | La périphérie du cylindre doit être contenue entre deux cylindres coaxiaux distants de 0,1 (englobe la rectitude et la circularité). |
| profil d'une ligne | | <p>forme possible</p> <p>profil théorique</p> | Le profil de chaque ligne doit rester entre deux lignes qui enveloppent des cercles de diamètre 0,2 centrés sur le profil théorique spécifié. |
| profil d'une surface | | <p>surface possible</p> <p>surface théorique</p> <p>sphère $\varnothing 0,4$</p> | La surface de l'objet doit rester entre deux surfaces qui enveloppent des sphères de diamètre 0,4 centrées sur la surface théorique spécifiée. |


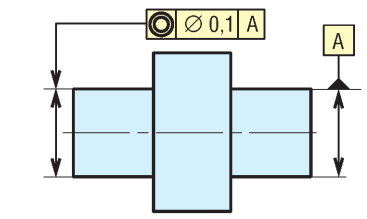
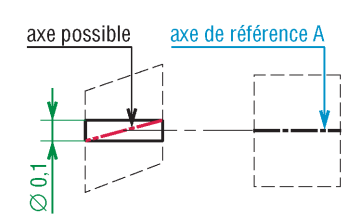
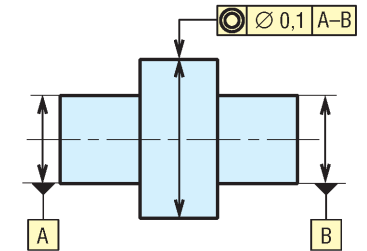
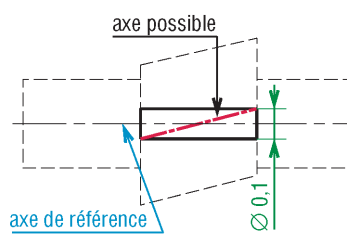

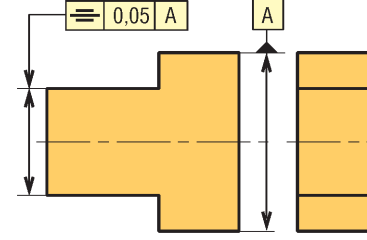
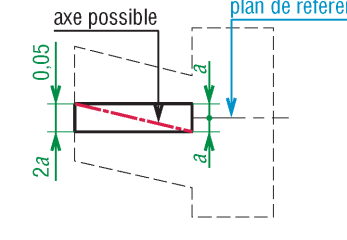
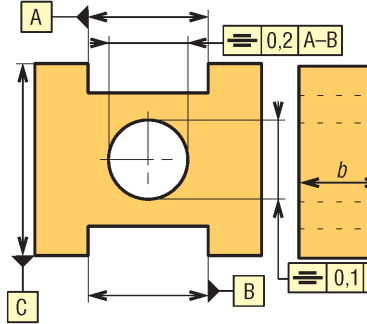
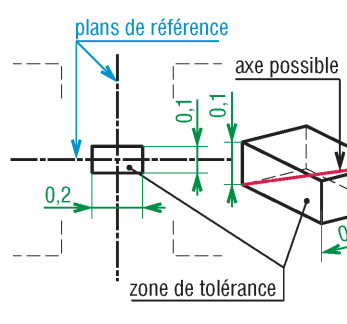

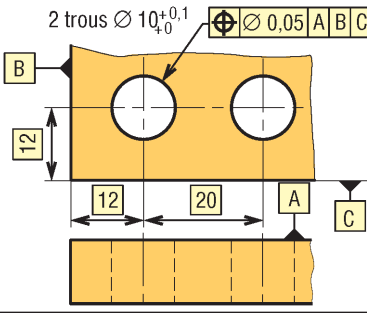
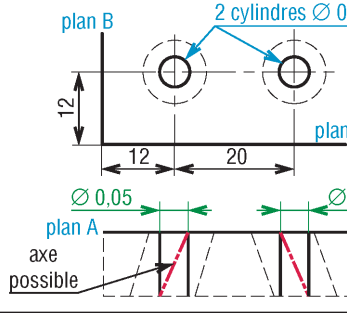
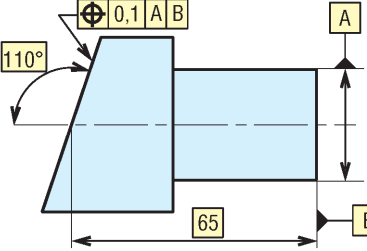
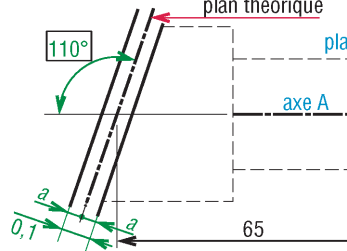
9. Tolérances de forme : exemples d'indications et interprétations correspondantes (existent en 2D et 3D).

III - Tolérances d'orientation

| Symbole | Exemple | Interprétation | Observations |
|----------------------------|---------|----------------|--|
| paral- lélisme // | | | <p>La surface supérieure doit rester entre deux plans distants de 0,1 et parallèles au plan de référence A.</p> <p>Remarque : peut s'appliquer à une ligne ou un axe.</p> |
| | | | <p>L'axe du trou supérieur doit être contenu dans un cylindre de diamètre 0,2 d'axe parallèle à l'axe de référence A.</p> |
| perpen- dicularité ⊥ | | | <p>La surface latérale gauche doit rester entre deux plans parallèles distants de 0,15 et perpendiculaires au plan de référence A.</p> <p>Remarque : la référence peut être une droite ou un axe.</p> |
| | | | <p>L'axe du cylindre à gauche doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,5 d'axe perpendiculaire à A.</p> |
| | | | <p>L'axe du cylindre doit être contenu dans une zone parallélépipédique (1 x 2) perpendiculaire au plan A à partir du plan B, deux plans d'orientation placent les largeurs de 1 (parallèle à B) et 2 (perpendiculaire à B).</p> |
| incli- naison ∠ | | | <p>La surface doit rester entre deux plans parallèles distants de 0,3 et inclinées de 30° par rapport au plan de référence A.</p> <p>Remarque : la référence peut être une droite ou un axe.</p> |
| | | | <p>L'axe du trou doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,1 inclinée de 70° par rapport au plan A.</p> <p>Voir aussi NF EN ISO 2538-2</p> |

10. Tolérances d'orientation : exemples d'indications et interprétations correspondantes (existent en 2D et 3D)

IV - Tolérances de position

| Symbole | Exemple | Interprétation | Observations |
|--|---|--|---|
| concentricité et coaxialité  |  |  | L'axe du cylindre à gauche doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,1 dont l'axe est celui du cylindre droit (A). |
| |  |  | L'axe du cylindre au milieu doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,1 dont l'axe est celui des deux autres cylindres ou droite commune de référence AB. |
| symétrie  |  |  | Le plan médian de la partie gauche doit rester entre deux plans parallèles distants de 0,05 et disposés symétriquement par rapport au plan A médian de la partie droite. |
| |  |  | L'axe du trou doit être contenu dans un parallélépipède 0,2 x 0,1 d'épaisseur b, d'axe l'intersection des plans médians (A-B) et (C). |
| localisation  |  |  | Les axes des trous doivent être contenus dans des cylindres de diamètre 0,05 d'axes perpendiculaires à A et positionnés par les cotes encadrées. |
| |  |  | La surface doit rester entre deux plans parallèles distants de 0,1, inclinés de 110° par rapport à A symétriquement par rapport au plan théorique (à 65 de B). |

11. Tolérances de position : exemples d'indications et interprétations correspondantes (existent en 2D et 3D).

V - Tolérances de battement

1. Battement circulaire

Plusieurs mesures sont nécessaires pour contrôler toute la surface spécifiée et la tolérance doit être respectée pour chaque position de mesure. La variation est mesurée dans la direction indiquée par la flèche. Au cours du mesurage, pendant une rotation complète autour de l'axe de référence, il n'y a pas déplacement de l'instrument de mesure ni déplacement axial de la pièce. Une erreur de battement simple peut résulter par exemple de défauts de circularité, planéité, cylindricité, perpendicularité (pris séparément ou en combinaison).

2. Battement total

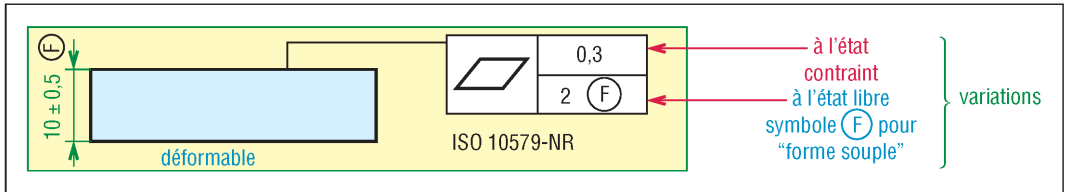
Au cours du mesurage, l'instrument de mesure se déplace le long d'une ligne fixe spécifiée pendant que la pièce effectue une série de rotations autour de l'axe de référence. Les erreurs de battement total résultent, séparément ou en combinaison, de tous les défauts géométriques précédents.

| Symbole | Exemple | Interprétation | Observations |
|----------------------|--|-----------------------------------|--|
| battement circulaire | <p>radial</p> | | Le battement radial pour chaque plan de mesure ne doit pas dépasser 0,05 pendant une rotation de A ou ligne extraite entre 2 cercles coplanaires concentrique à A et distants de 0,05. |
| | <p>axial</p> | | En tout point de la face, le battement axial (parallèle à A) ne doit pas dépasser 0,1 pendant une rotation complète autour de A ou ligne extraite entre 2 cercles identiques d'axe A distants de 0,1. |
| | <p>oblique dans une direction spécifiée</p> | | La ligne extraite doit être comprise entre 2 cercles distants de 0,1 mm dans la section conique (correspond à l'élément de direction C d'inclinaison α) ; ou le battement ne doit pas dépasser 0,1 dans chaque cône de mesure pendant une rotation complète de la pièce autour de l'axe C. |
| battement total | <p>oblique</p> | | La surface mesurée doit rester entre deux cônes distants de 0,2 et d'angle 20 pendant une rotation complète de la pièce autour de A. |
| | axial et radial | généralisation des cas précédents | |

12. Tolérances de battement : exemples d'indications et interprétations correspondantes.

VI - Tolérancement des pièces non rigides ou déformables NF EN ISO 10579

Elles sont cotées comme si les pièces étaient rigides ou indéformables. Il est nécessaire de préciser sur le dessin que la pièce est déformable : inscrire la référence ISO 10579 NR près du cartouche. Les variations à l'état libre doivent être suivies du symbole F entouré (exemple fig. 13).



13. Exemple.

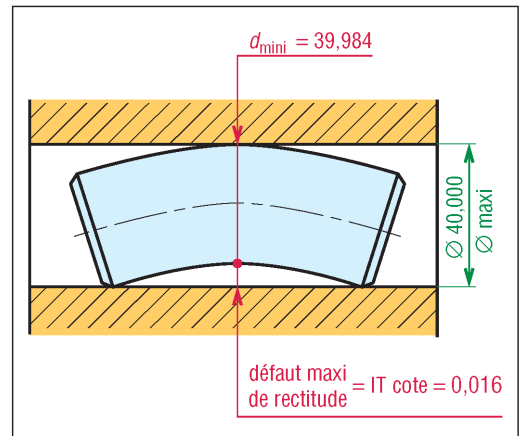
VII - Principe ou exigence de l'enveloppe (NF ISO 8015)

1. Principe

Une surface, après fabrication, ne doit pas dépasser les limites imposées par une enveloppe dont la forme géométrique (de dimensions celles de la forme théorique au maximum de matière) est parfaite. Sans oublier que toutes les dimensions locales possibles doivent être supérieures à la valeur minimale admissible de la cote tolérancée

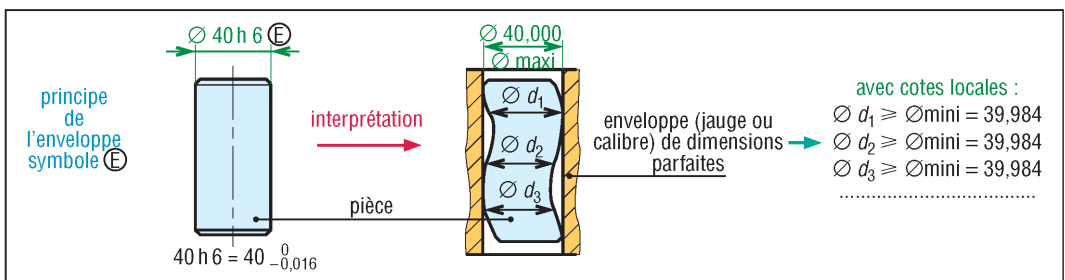
(exemple fig. 14 et 15).

L'application de ce principe permet un contrôle plus simple après fabrication (jauges, calibres...). L'utilisation est analogue avec les autres formes géométriques (cylindre, parallélépipède...).



14. Défaut maxi de rectitude lié au cas de la figure 15.

Remarque : si, avec le principe de l'enveloppe, des tolérances géométriques supplémentaires (rectitude, planéité, circularité, cylindricité) sont ajoutées, elles viennent en restriction par rapport à la tolérance (IT). Conséquence : aucune tolérance géométrique ne peut être supérieure à l'IT ; la tolérance de rectitude de l'axe figure 14 ne peut pas dépasser 0,016. Voir aussi principe d'indépendance page 570.



15. Principe de l'enveloppe ; symbole E.

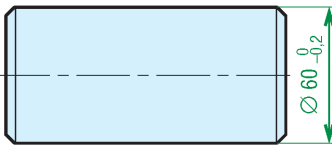
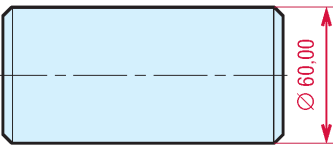
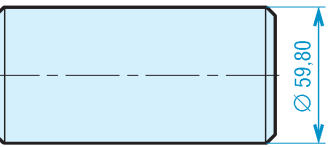
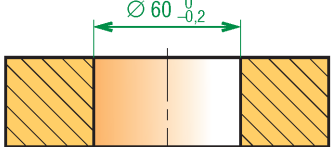
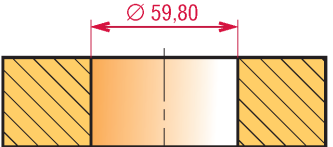
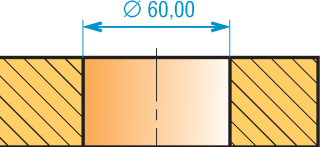
2. Inscription normalisée

Pour un élément isolé on indique le symbole E entouré d'un cercle en trait fin après la cote tolérancée ou l'ajustement (fig. 15).

Pour l'ensemble d'un dessin inscrire le symbole précédent près du cartouche.

S'il n'y a pas d'indication, le dessin sera interprété suivant le principe des cotes locales.

VIII - Cotation au maximum de matière

| Spécification dessin | Au maximum de matière (MMR) | Au minimum de matière (LMR) |
|--|---|--|
| (pièces mâles)  |  |  |
|  (pièces femelles) |  |  |

16. Dimensions au maximum et au minimum de matière.

À cotation identique, l'utilisation de la condition au maximum de matière permet des coûts de production moins élevés ; elle simplifie l'usinage et le contrôle, rend possible le contrôle de certaines tolérances géométriques par des jauges, calibres, etc.

Le principe du maximum de matière ne peut pas être appliqué aux tolérances de battement, aux entraxes des chaînes cinématiques (engrenages...) et aux assemblages serrés. L'inscription normalisée est réalisée avec le symbole M entouré (fig. 17 et 18).

1. Principe (NF EN ISO 2692 - E 04-555)

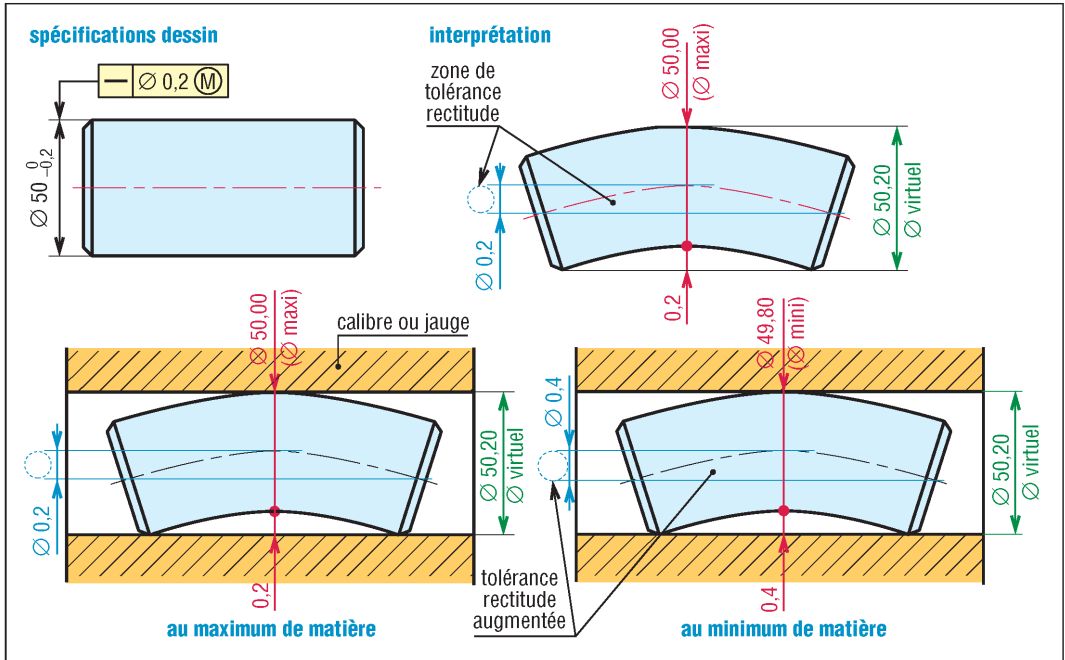
Utilisée avec les tolérances géométriques, la condition au maximum de matière établit une dépendance entre tolérance dimensionnelle (IT) et tolérance géométrique. Elle permet de transférer la portion de l'IT non utilisée lors du contrôle (marge restante) sur la tolérance géométrique afin de l'augmenter.

Tolérance géométrique au minimum de matière = tolérance géométrique au maximum de matière + intervalle de tolérance de la cote (IT)
 Dimension virtuelle pièce femelle = dimension au maximum de matière – tolérance géométrique
 Dimension virtuelle pièce mâle = dimension au maximum de matière + tolérance géométrique

2. Exemple 1

Les spécifications imposent une tolérance sur le diamètre (50,00 maximale et 49,80 minimale) et une tolérance de rectitude au maximum de matière (0,2). Ces deux conditions font qu'au maximum de matière le diamètre du cylindre enveloppe de la pièce atteint 50,20 (diamètre virtuel). Si le diamètre (pièce) diminue (à partir de 50,00), le jeu entre la pièce et le cylindre enveloppe augmente. Ce gain peut être ajouté à la tolérance de rectitude (au minimum de matière la tolérance atteint 0,4). En pratique il varie entre 0,2 et 0,4.

| Diamètre réalisé | Gain obtenu | Nouvelle tolérance de rectitude | Diamètre de l'enveloppe |
|------------------|-------------|---------------------------------|-------------------------|
| 50,00 | 0 | 0,20 | 50,20 |
| 49,95 | 0,05 | $0,20 + 0,05 = 0,25$ | 50,20 |
| 49,90 | 0,10 | $0,20 + 0,10 = 0,30$ | 50,20 |
| 49,85 | 0,15 | $0,20 + 0,15 = 0,35$ | 50,20 |
| 49,80 | 0,20 | $0,20 + 0,20 = 0,40$ | 50,20 |

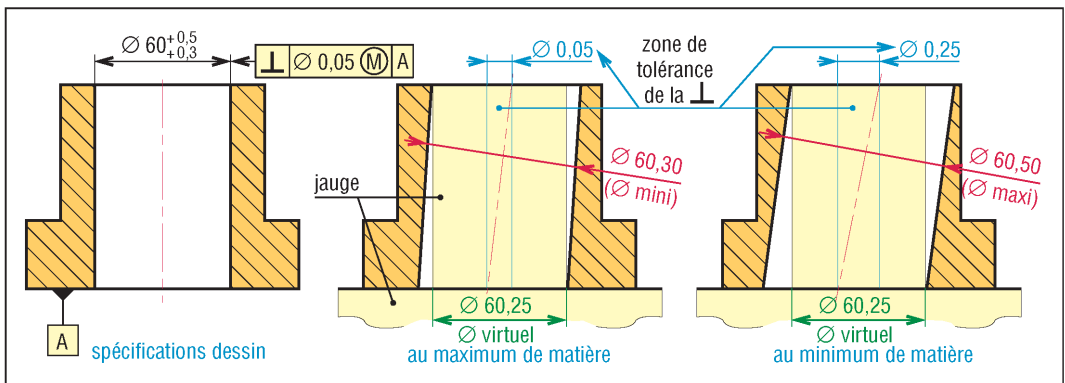


17. Exemple 1.

3. Exemple 2

Les spécifications imposent une tolérance sur le diamètre ($60,50$ maxi et $60,30$ mini) et une tolérance de perpendicularité au maximum de matière ($0,05$ avec la référence A). Ces deux conditions font qu'au maximum de matière le diamètre du cylindre enveloppe du trou atteint $60,25$ (diamètre virtuel).

Si le diamètre augmente (à partir de $60,30$), le jeu entre la pièce et le cylindre enveloppe augmente et le gain obtenu peut être ajouté à la tolérance de perpendicularité ; il atteint $0,25$ au minimum de matière et peut varier entre $0,05$ et $0,25$.



18. Exemple 2.

11

ÉTATS DE SURFACE (Normes GPS)

OBJECTIFS

- Décrire les principaux défauts de surface.
- Indiquer et définir les critères d'évaluation utilisés, règles d'inscription normalisées. Critères de choix.

Les principes, les termes, les définitions, les paramètres, les symboles et les indications d'états de surface à inscrire sur les dessins sont normalisés internationalement par l'ISO. Il en est de même du contrôle, des procédures, des équipements de mesure et de leur étalonnage.

Cet ensemble de normes relatif aux états de surface, développé partiellement dans ce chapitre, fait partie d'un édifice plus important appelé « Spécification Géométrique des Produits » ou normes GPS (Geometrical Product Specification).

La matrice GPS regroupe sous forme d'un même tableau l'ensemble de toutes les normes dimensionnelles, géométriques et d'états de surface nécessaires au monde industriel.

Normes GPS utilisées (3 caractéristiques : profils de rugosité, d'ondulation et primaire) : NF EN ISO 4287 ; NF EN ISO 1302 ; NF ISO 12085.

I - Principaux défauts des surfaces

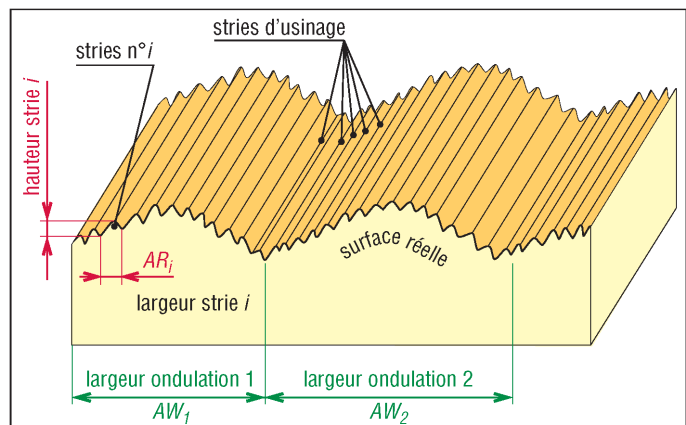
Les défauts possibles d'une surface peuvent être divisés en quatre catégories, en allant du plus grand au plus petit.

Défauts d'ordre 1 : ils correspondent aux défauts géométriques des surfaces : planéité, rectitude, circularité... (Voir chapitre précédent).

Défauts d'ordre 2 (fig. 1) : ils sont relatifs aux ondulations, sortes de collines et de vallées successives, inscrites dans le profil et engendrées par les vibrations, déformations des machines, broutements, traitements thermiques...

Défauts d'ordre 3 (fig. 1) : ce sont les stries de rugosité, sortes de sillons tracés avec régularité dans le relief des ondulations par les outils de coupe.

Défauts d'ordre 4 : plus irréguliers, parfois accidentels, ils correspondent à des arrachements, fentes...



1. Défauts amplifiés des surfaces usinées.

II - Définitions et terminologie (NF EN ISO 4287) concernant la topographie des surfaces

Surface réelle : elle correspond à la surface obtenue après fabrication de l'objet.

Profil de surface : il peut être considéré comme une tranche plane très mince judicieusement découpée dans la surface, suivant la direction de mesure. Il sert de base pour définir les autres profils. Le centre du palpeur donne un profil tracé numérisé en profil total.

Profil primaire : issu du profil de surface après mesure et filtrage, il sert de base à l'évaluation des paramètres du profil primaire (symbole *P*).

Exemples : *Pp, Pv, Pz, Pt, Pa, Pq, PSm, etc.*

Profil de rugosité : obtenu après filtrage du profil primaire, il sert de base à l'évaluation des paramètres de rugosité (symbole *R*).

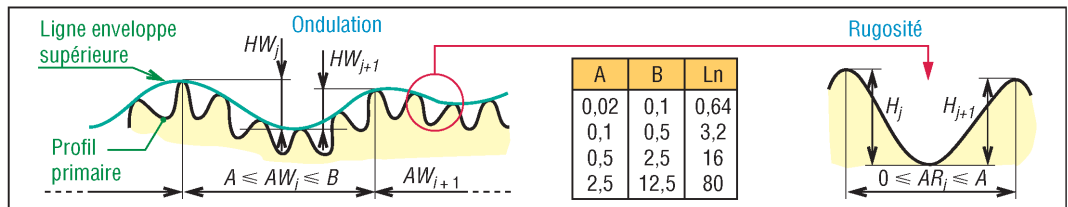
Exemples : *Rp, Rv, Rz, Rt, Ra, Rq, RSm, etc.*

Profil d'ondulation : obtenu après filtrage du profil primaire, il sert de base à l'évaluation des paramètres d'ondulation (symbole *W*).

Exemples : *Wp, Wv, Wz, Wt, Wa, Wq, WSm, etc.*

Longueur d'évaluation L_n : c'est la longueur de l'échantillon de profil utilisé pour déterminer la rugosité et autres paramètres. Elle peut comprendre une ou plusieurs longueurs de base.

Exemples : 0,4 - 1,25 - 4 - 12,5 - et 40 mm. Pour évaluer *Ra, Rz, Rv, Rp, Rc* et *Rt*.



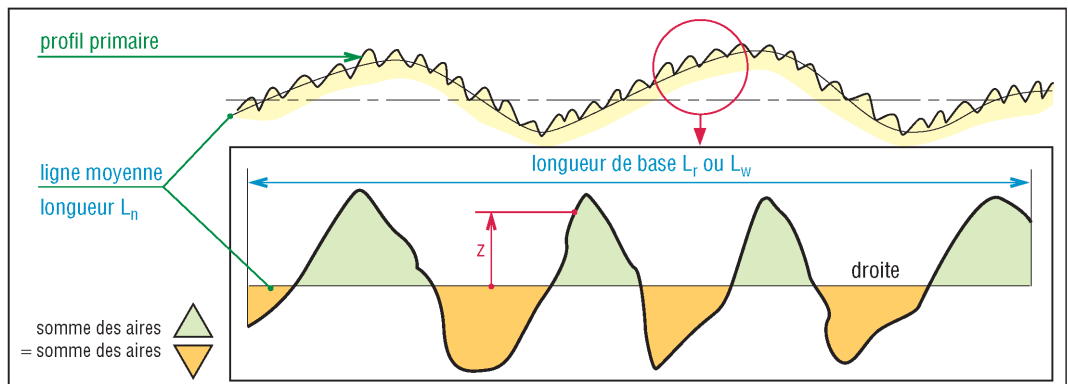
2. Paramètres liés aux motifs : ondulation et rugosité. A, B et L_n (longueur d'évaluation) en mm (ISO 3274).

Longueur de base : la longueur d'évaluation L_n est divisée en tronçons successifs dont la longueur, appelée longueur de base, dépend des irrégularités du profil. La ligne moyenne de chaque tronçon doit rester droite. L_r : rugosité ; L_w : ondulation ; $L_p = L_n$: primaire.

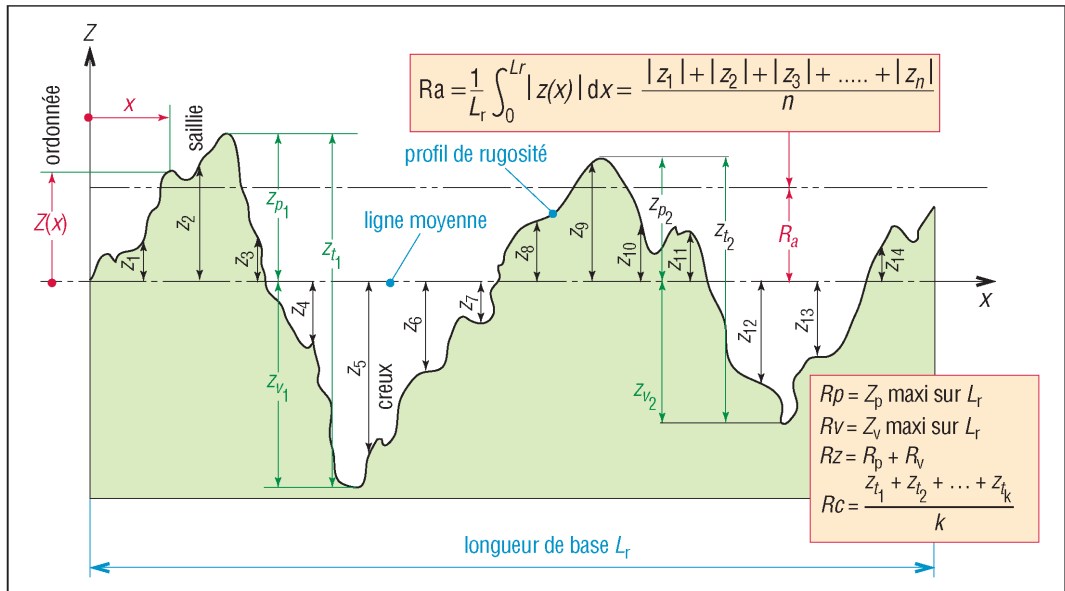
Exemples : pour *Ra, Rz, Rv, Rp, Rc* et *Rt*, $L_n = 5 L_r$.

Ligne moyenne ou des moindres carrés : pour le profil primaire, la ligne suit la direction du profil et est déterminée par calcul aux moindres carrés. Pour chaque longueur de base, la ligne est assimilée à une droite.

La somme des aires (entre profil et ligne) au-dessus de la ligne moyenne est égale à la somme des aires au-dessous (fig. 3). Plus précisément, la somme de tous les z^2 (z = distance entre profil et ligne moyenne) au-dessus de la ligne doit être égale à la somme des z^2 au-dessous, d'où le nom des moindres carrés : (voir fig. 3 et 4).



3. Définition de la ligne moyenne (ligne des moindres carrés).



4. Paramètres liés à la ligne moyenne. Écart moyen arithmétique Ra . L_r = longueur de base. Même démarche pour W_a .

III - Principaux paramètres normalisés

Il existe deux familles de critères, ceux liés aux motifs et ceux liés à la ligne moyenne ou au profil. Nous ne retiendrons que les plus utilisés.

1. Paramètres ou critères liés au motif (NF ISO 12085)

Ces paramètres ne font pas intervenir la ligne moyenne (voir fig. 2). On distingue deux cas, les paramètres d'ondulation et les paramètres de rugosité.

Chaque strie, ou sillon, peut être caractérisée par une hauteur H_j (distance ou hauteur entre le sommet et le creux) et par une longueur (ou pas) AR_j . Ces deux grandeurs sont mesurées en micromètre (ou micron = 0,001 mm) (voir fig. 2). Choix de HW_j et AW_j pour l'ondulation.

Profondeur moyenne d'ondulation W : moyenne arithmétique des profondeurs HW_j des motifs d'ondulation à l'intérieur de la longueur d'évaluation, L_n .

$$W = \frac{HW_1 + HW_2 + \dots + HW_m}{m} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m HW_j$$

$m = 2n$

Pas moyen de l'ondulation AW : moyenne arithmétique des longueurs AW_j des motifs d'ondulation à l'intérieur de la longueur d'évaluation, L_n .

$$AW = \frac{AW_1 + AW_2 + \dots + AW_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AW_i$$

Rugosité ou profondeur moyenne de rugosité R : moyenne arithmétique des profondeurs H_j des motifs de rugosité à l'intérieur de la longueur d'évaluation L_n .

$$R = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_m}{m} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_j$$

$m = 2n$

Pas moyen de rugosité AR : moyenne arithmétique des longueurs AR_j des motifs de rugosité à l'intérieur de la longueur d'évaluation.

$$AR = \frac{AR_1 + AR_2 + \dots + AR_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i$$

Autres paramètres : Rx (W_x) plus grande des profondeurs H_j (HW_j) sur la longueur L_n .

Wte : distance entre le point le plus haut et le plus bas de la ligne enveloppe supérieure (fig. 2).

2. Paramètres liés à la ligne moyenne ou au profil (NF ISO 4287)

a) Écart moyen arithmétique Ra ou critère statistique de rugosité

De tous les critères de rugosité, il est le plus utilisé (fig. 4). Même démarche pour Wa et Pa. Ra est la moyenne arithmétique, sur une longueur de base Lr (Ln = 5 Lr), de toutes les distances zi entre ligne moyenne et profil. Ra caractérise le z moyen du profil.

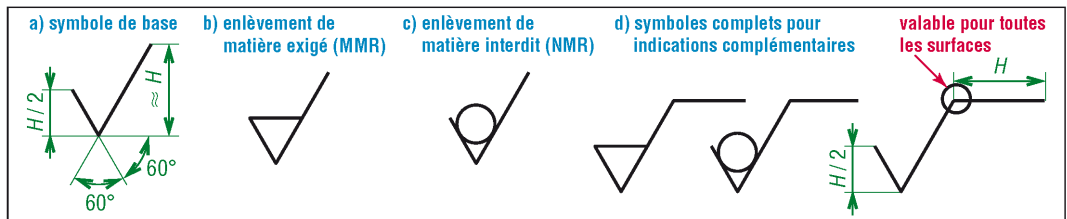
| Ra : principales valeurs nominales normalisées et classes de rugosité associées | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|-----|---------|-----|-----|----------|-----|-----|-----------|-----|------|-------|--------|
| Ra (µm) | 50 | 25 | 12,5 | 6,3 | 3,2 | 1,6 | 0,8 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,025 | 0,0125 |
| Classe de rugosité | N12 | N11 | N10 | N9 | N8 | N7 | N6 | N5 | N4 | N3 | N2 | N1 | N0 |
| Rz (µm) | 200 à 50 | | 50 à 10 | | | 10 à 0,5 | | | 0,5 à 0,1 | | | < 0,1 | |
| Lr (mm) | 8 | | | 2,5 | | 0,8 | | | 0,25 | | | 0,08 | |

b) Autres critères ou paramètres liés à la ligne moyenne (fig. 4)

Hauteur maximale du profil (Pz, Rz, Wz) ; hauteur totale du profil (Pt, Rt, Wt) ; taux de longueur portante (Rmr (c), Pmr (c), Wmr (c)) ; hauteur maxi des saillies (Rp) ; hauteur maxi des creux (Rv...) ; hauteur moyenne (Rc...) ; Wmr (c) ; etc. Voir aussi CD-Rom.

IV – Inscription normalisée (NF EN ISO 1302) d'un état de surface sur un dessin

La norme utilisée repose essentiellement sur la normalisation ISO et est commune, à quelques nuances près, à la plupart des pays industrialisés.



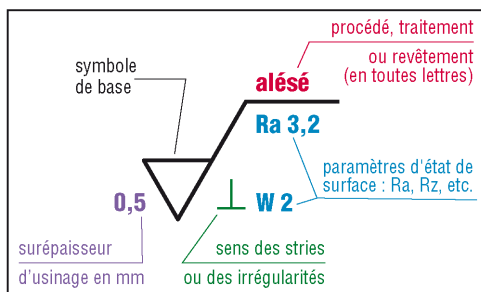
5. Symboles de base normalisés (NF ISO 1302). 1^{er} et 6^e symboles : tout procédé de fabrication autorisé (APA).

1. Normalisation

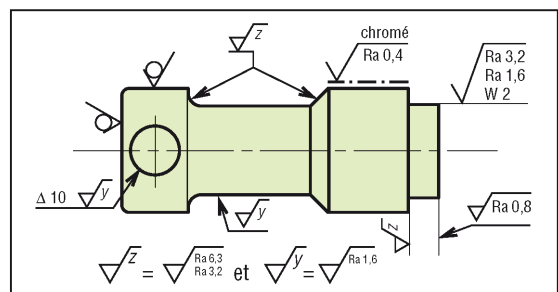
Le symbole de base, sorte de vé dissymétrique à 60° (fig. 5), est employé dans le cas général et ne préjuge d'aucun procédé de fabrication.

Si un enlèvement de matière est nécessaire (usinage, etc.), une barre est ajoutée au symbole de base. Si l'enlèvement de matière est proscrit la barre est remplacée par un cercle (fig. 5).

L'écart moyen arithmétique Ra, indiqué en haut à gauche du vé, est le critère de base généralement retenue pour la spécification des états de surface (fig. 5).



6. Spécification de l'état de surface.



7. Exemple de cotation, position des symboles.

| Symboles pour la direction des stries | | |
|--|--|--|
| <p>stries parallèles au plan de projection</p> | <p>stries perpendiculaires au plan de projection</p> | <p>stries dans deux directions croisées obliques</p> |
| <p>stries multidirectionnelles</p> | <p>stries approximativement circulaires</p> | <p>stries approximativement radiales</p> |

8. Symboles pour indiquer ou contrôler la direction des stries. Existe aussi *P* : particulières non directionnelles.

| États de surface – Principe et exemples d'inscription | | | |
|--|--|---------|---|
| symbole | signification | symbole | signification |
| | surface avec spécification obtenue sans enlèvement de matière : fonderie, forgeage, extrusion, etc. ; hauteur maximale de rugosité $R_z = 0,5$; règle des 16 % | | surface avec spécification obtenue par usinage. R_a doit être compris entre 0,8 et 1,6 μm ($0,8 \leq R_a \leq 1,6$) surépaisseur d'usinage : 0,5 mm |
| | si la longueur de base (fig.3) diffère des valeurs normalisées elle doit être indiquée (ici $L_r = 2,5 \text{ mm}$, $L_n = 5 L_r$) ; $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ | | surface obtenue par tournage : $R_a = 3,2 \mu\text{m}$; profondeur moyenne d'ondulation $W = 5 \mu\text{m}$; stries d'usinage perpendiculaire au plan de projection |
| | surface usinée, traitée par chromage, $6,3 \leq R_z \leq 16 \mu\text{m}$ avec une longueur de base limitée à 2,5 mm. « Règle des 16 % » U pour limite supérieure ; L pour limite inférieure. | | état de surface obtenu sans usinage, traitement par cémentation, rugosité $R_z = 16 \mu\text{m}$; spécifications valables pour toutes les surfaces du contour |
| <p>Éléments utilisés pour indiquer les exigences d'état de surface</p> | | | |

9. Exemples d'inscription d'états de surface.

Lorsqu'il y a répétition des symboles la norme prévoit différentes indications simplificatrices (fig. 10). Symboles complémentaires pour la fonderie XPCEN ISO/TS 8062-2.

Représentation d'un symbole complexe ou répétition fréquente du même état de surface :

l'indication peut se limiter au symbole de base dont la signification doit être décrite à proximité. Une lettre repère (*y*, *z*, etc.) peut être utilisée pour différencier plusieurs groupes de symboles identiques (voir aussi fig. 7).

= =

=

=

Le cercle complémentaire indique que les spécifications sont valables pour toutes les surfaces.

Toutes les surfaces de la pièce sont usinées avec $R_a = 3,2 \mu\text{m}$, sauf indications.

variante 1

ou

variante 2

10. Représentations simplifiées.

2. Choix des états de surface

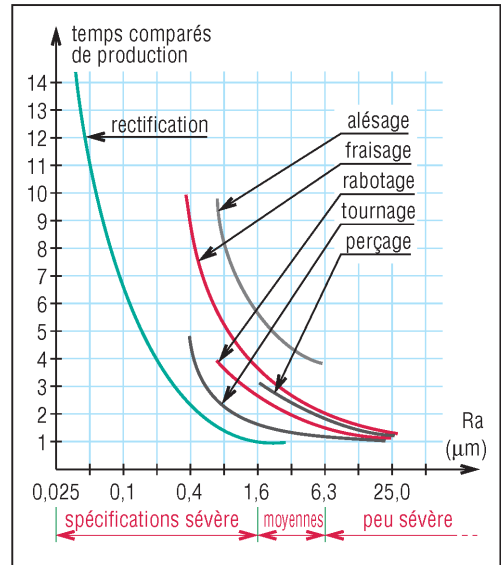
La figure 12 indique les rugosités que l'on peut attendre des principaux procédés de production.

Remarques :

- $Ra > 6,3$: spécifications peu sévères, correspondant à ce qu'il est possible d'obtenir avec un grand nombre de pièces brutes, sans usinage complémentaire. 6,3 : fini grossier ; 25 : rugueux.

- $1,6 \leq Ra \leq 6,3$: spécifications moyennes, correspondent à ce qu'il est possible d'obtenir usuellement avec les procédés d'usinages classiques.

- $Ra < 1,6$: spécifications devenant sévères, l'utilisation de ces valeurs doit être faite avec réflexion et concertation car les temps de production et les prix de revient augmentent très rapidement à partir de ce cas (fig.11). 0,4 : fini très fin ; 0,0125 : extra-fin.



11. Prix de revient et spécifications.

| Procédés | rugosité Ra en µm (0,001 mm) | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|--------|--|
| | 50 | 25 | 12,5 | 6,3 | 3,2 | 1,6 | 0,8 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,025 | 0,0125 | |
| par usinage | oxycoupage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | sciage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | rabotage et mortaisage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | perçage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | fraisage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | électroérosion | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | perçage avec alésoir | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | alésage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | tournage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | brochage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | taillage (engrenages) | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | laser | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | rectification | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | rodage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | polissage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| superfinition | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | | |
| brut | sable | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| | moulage | moule métallique | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | |
| | | sous pression | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | |
| | à la cire perdue | à la cire perdue | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | |
| | | à la cire perdue | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | |
| | forgeage-estampage | à chaud | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | |
| | | à froid, calibrage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | |
| | laminage | à chaud | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | |
| à froid, calibrage | | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | |
| extrusion | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | | |
| matriçage | cas usuels | | cas moins fréquents | | | | | | | | | | | |

12. Rugosité Ra des principaux procédés de fabrication (Ra moulage varie avec matériau).

12

GRAPHIQUES ET DIAGRAMMES USUELS

OBJECTIFS

- Indiquer et décrire les graphes les plus universellement utilisés (graphes à axes de coordonnées, à barres, camembert, abaque, organigrammes...).
- Préciser les caractéristiques et les domaines d'emploi des divers graphes.
- Fournir des recommandations et des suggestions de construction.
- Proposer des exercices d'application.

Les graphes et les diagrammes sont une représentation imagée de données (numériques...) ou de schémas d'organisation. Il existe un grand nombre de représentations possibles, beaucoup sont accessibles à des non-techniciens ou des non-spécialistes. De nombreux logiciels offrent une assistance pour le tracé des graphes usuels.

Les techniciens et les ingénieurs les utilisent pour l'analyse (calculs techniques, détermination de paramètres expérimentaux, prévisions, coûts, organisation, etc.) et pour la communication (information, publicité, séminaires, etc.). Ils présentent avec précision et clarté un large éventail de données tout en mettant en valeur les informations principales.

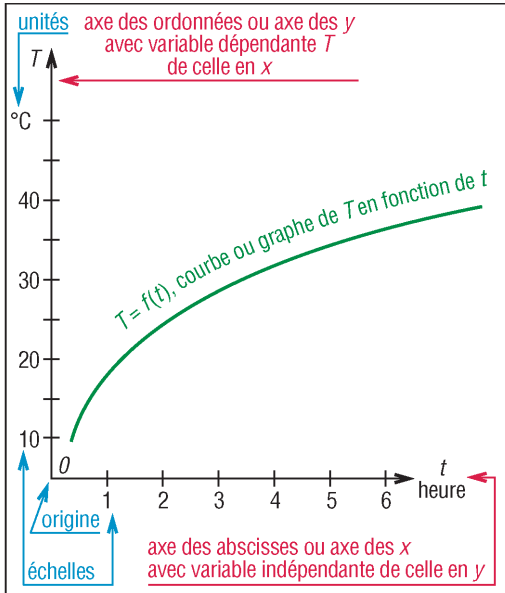
Contrairement aux tableaux de données, ils permettent d'apprécier et observer plus facilement certaines caractéristiques essentielles : tendances, irrégularités, fluctuations, périodicités, rapports entre paramètres...

I – Graphes avec axes de coordonnées

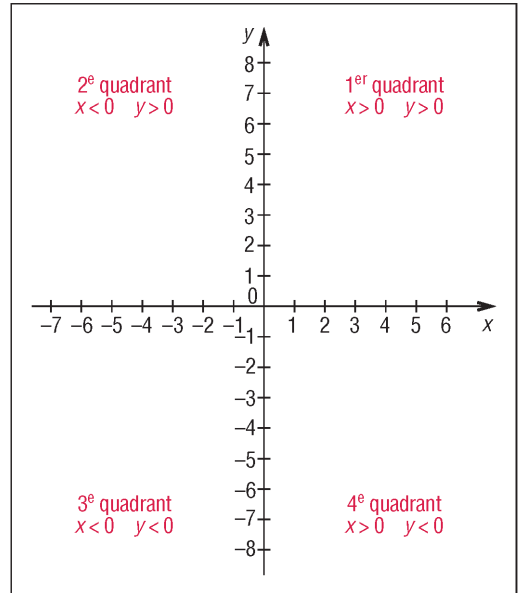
D'origine mathématique, ils sont parfaitement adaptés à la description des phénomènes de type physique ou technique, notamment lorsqu'on souhaite connaître la variation d'une grandeur ou un paramètre important (température, force, coût...) en fonction d'un autre (temps, course...) encore appelée variable.

1. Graphe à deux variables

Par convention le paramètre important est porté en ordonnée, « axe des y », et la variable, qui doit être indépendante du paramètre important, en abscisse, « axe des x ».



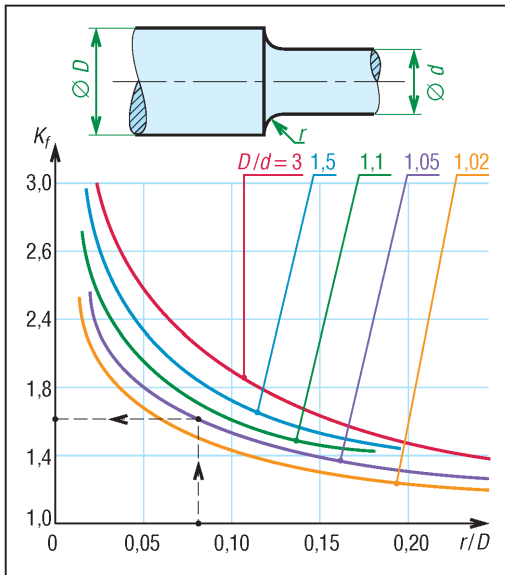
1. Axes, unités, courbe, variables, échelles : origine des systèmes d'axes à deux coordonnées.



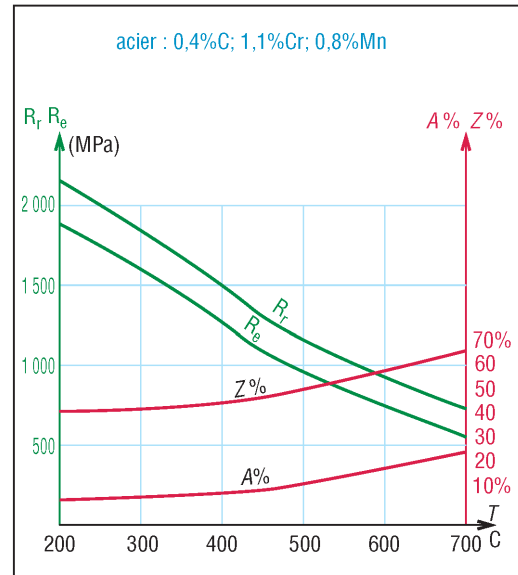
2. Les quatre quadrants.

Remarque : plusieurs courbes peuvent être tracées sur un même graphe ; c'est le cas de grandeurs de même famille utilisant la même échelle. De même, s'il n'y a pas risque de confusion ou de surcharge, une deuxième ordonnée peut être ajoutée à droite du graphe (fig. 4).

Cas des graphes à plus de deux variables : l'utilisation de familles de courbes permet d'ajouter une ou plusieurs variables supplémentaires et ainsi multiplier les possibilités de ce type de graphe.



3. Graphe à deux axes permettant de travailler avec plus de deux variables.



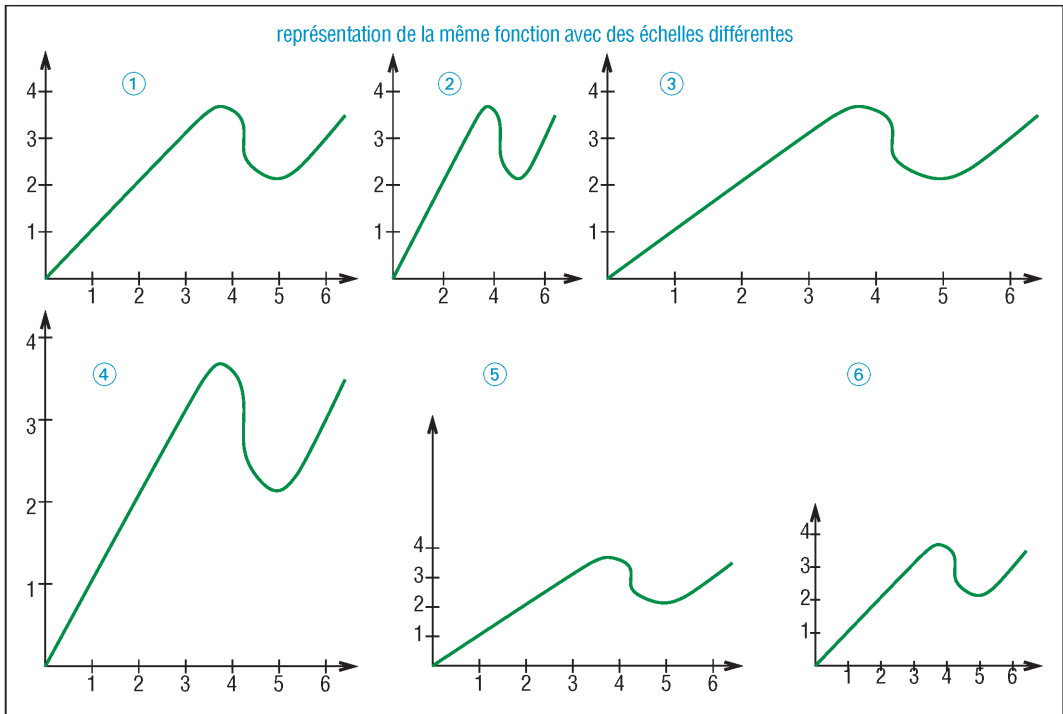
4. Graphe utilisant deux ordonnées pour représenter deux familles de courbes.

2. Choix des échelles

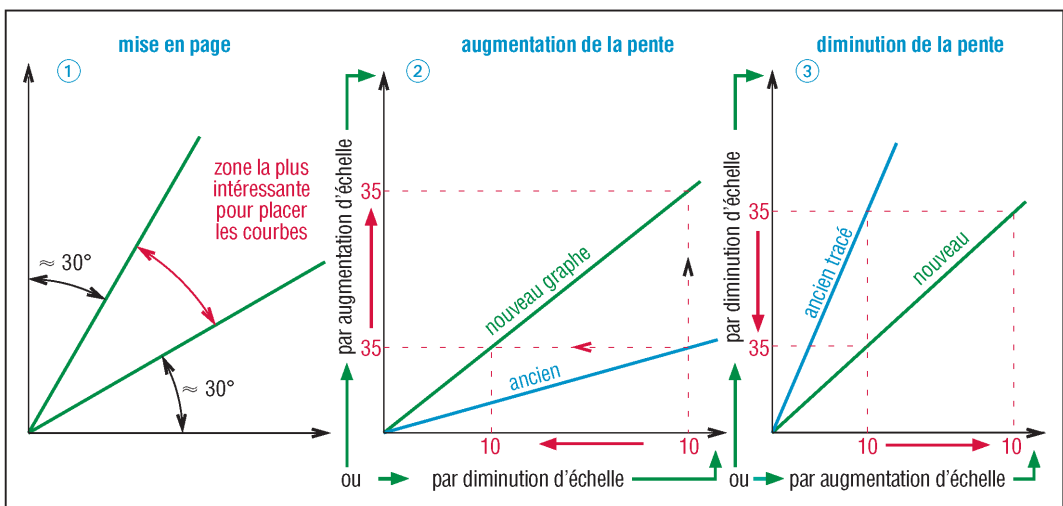
Ce choix est de première importance : l'allure du graphe, son centrage, sa lecture et son exploitation en dépendent.

Un mauvais choix peut rendre difficile ou imprécise la lecture des données et ne pas mettre en valeur (ou exagérer) les variations essentielles.

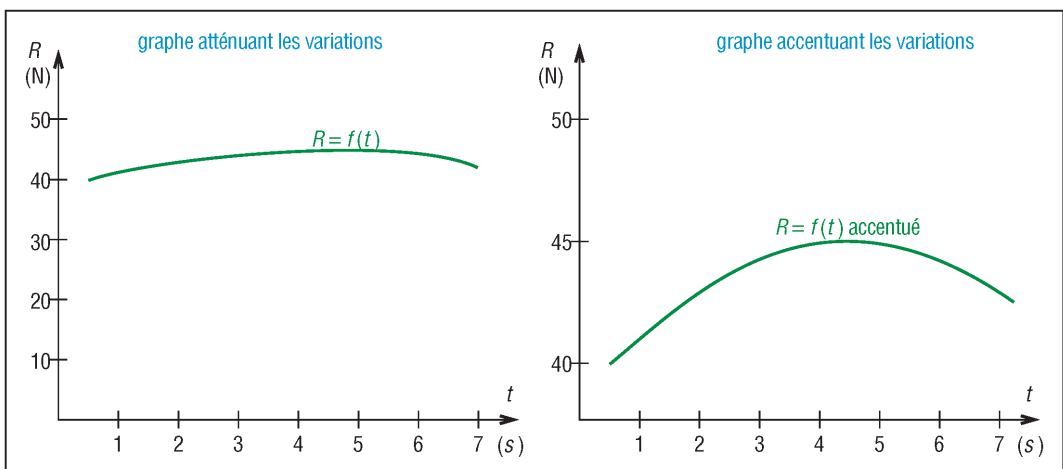
On peut, au besoin, modifier ou recentrer un graphe en changeant l'une des deux échelles.



5. Modification ou recentrage d'un graphe en changeant les échelles.



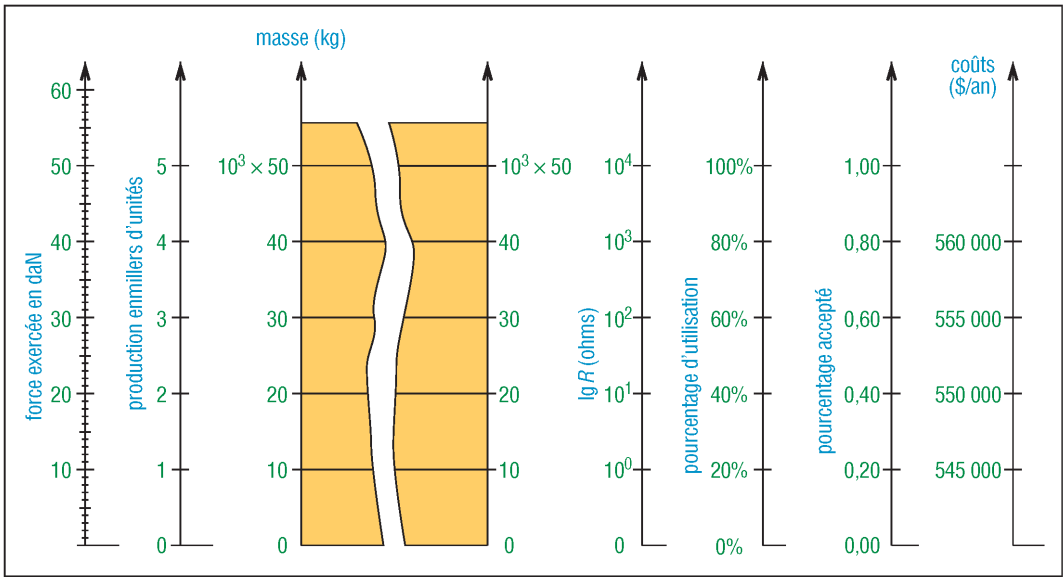
6. Principe du recentrage d'un graphe par modification des échelles.



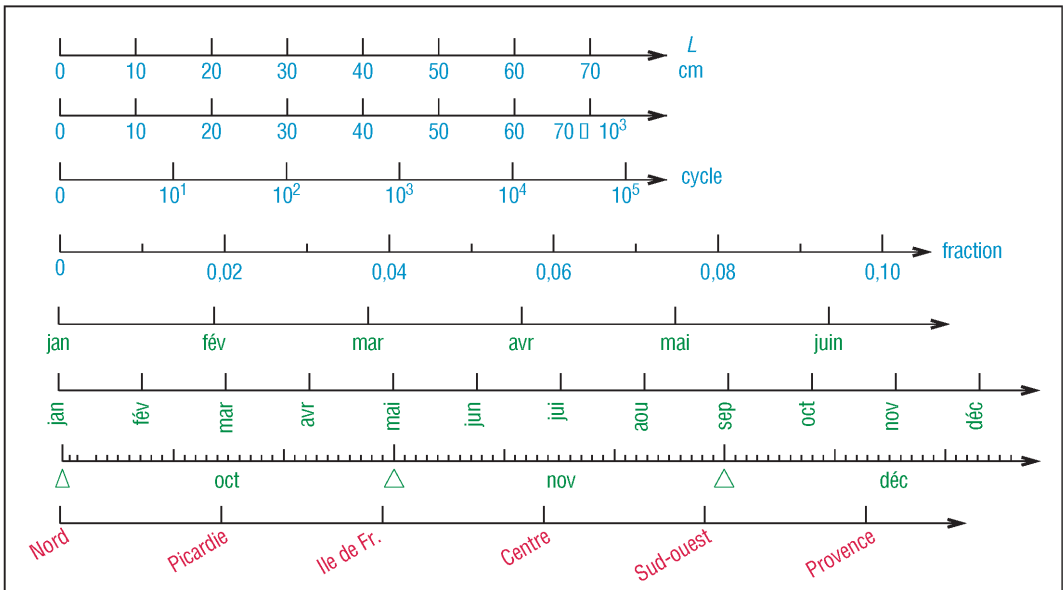
7. Modification de l'allure du graphe en modifiant l'origine et l'échelle sur l'un des axes.

3. Remarques et suggestions pour construire un graphe

- Indiquer clairement le titre ou la référence du graphe.
- Sur chaque axe écrire lisiblement le nom de la grandeur utilisée ou son symbole normalisé.
- Pour chaque échelle indiquer l'unité de mesure normalisée choisie.
- Choisir les échelles de façon à ce que les courbes ne soient pas comprimées ; la courbe représentative doit être centrée dans le plan du graphique et dessinée avec précision.
- Choisir de préférence des échelles pleines (origine à zéro). Une modification de l'origine peut amplifier des variations lorsque celles-ci sont faibles ; cette représentation peut parfois être imprécise et influencer le jugement.
- Habituellement, les échelles sont croissantes en allant de la gauche vers la droite (axe des x) et de bas en haut (axe des y).
- Écrire généralement les chiffres des échelles en dehors des zones graphiques.
- Limiter le nombre des décimales, à cette fin utiliser les puissances de 10 (par exemple remplacer 10 000 000 par 10^7).
- Faire éventuellement un cadre pour délimiter la zone graphique.



8. Exemples d'écriture sur l'axe des ordonnées.



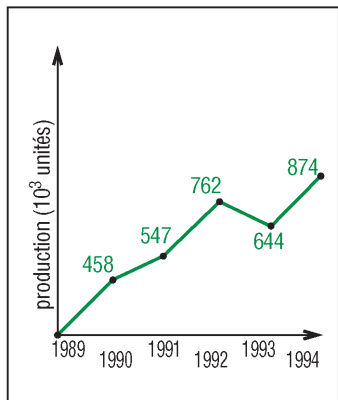
9. Exemple d'écriture sur l'axe des abscisses.

4. Courbe observée, courbe expérimentale et courbe mathématique

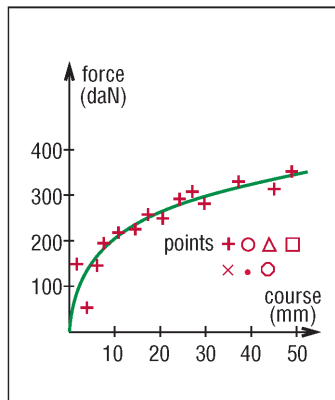
Courbe observée : surtout utilisée comme outil de communication, elle est tracée à partir de données connues, point par point, sans interpolation. Elle permet de faire un bilan récapitulatif et de dégager des tendances générales.

Courbe expérimentale : servant essentiellement comme outil d'analyse, elle est obtenue par interpolation (courbe moyenne) à partir d'une série de mesures en laboratoire ou sur le terrain. Les points tracés peuvent utiliser des symboles ou des couleurs différents pour différencier les séries de mesures.

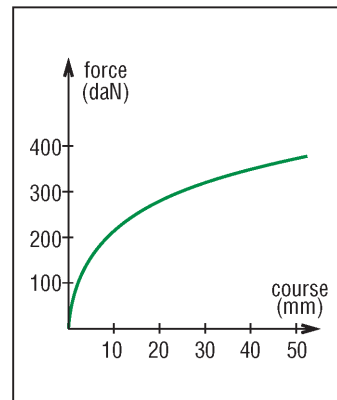
Courbe mathématique : elle est obtenue par calcul à partir d'une équation connue. C'est une courbe théorique et les points calculés ne sont pas, en principe, dessinés sur le graphe.



10. Courbe observée.



11. Courbe expérimentale.

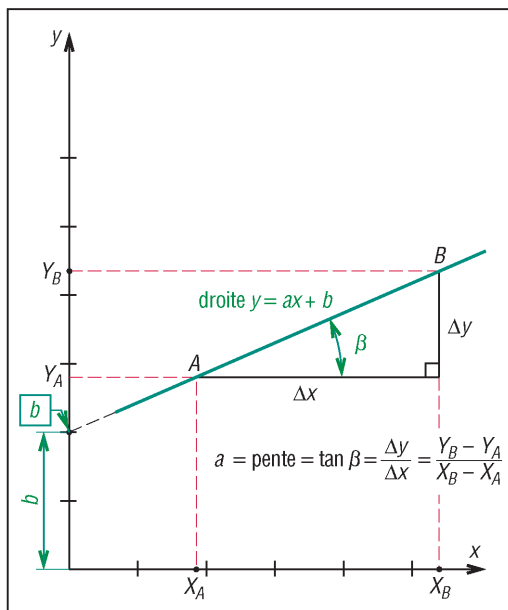
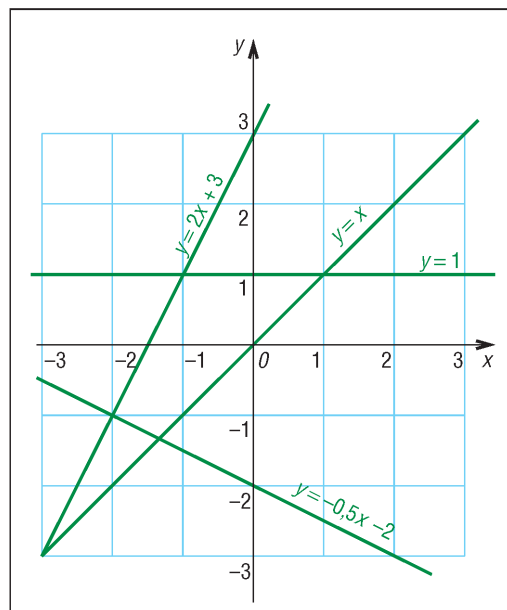


12. Courbe mathématique.

5. Courbes ou droites de la forme $y = ax + b$

Quelle que soit la valeur des constantes a et b , il y a toujours proportionnalité entre les deux variables x et y . Autrement dit, quels que soient les points A et B choisis, l'accroissement de Y (« $Y_B - Y_A$ ») est toujours proportionnel à l'accroissement de X (« $X_B - X_A$ »).

Remarque : a , pente de la droite, caractérise la proportionnalité ; b est l'ordonnée du point d'intersection entre la droite et l'axe des y (pour $x = 0$, $y = b$).

13. Principaux paramètres liés aux droites $y = ax + b$.14. Exemple de droites de forme $y = ax + b$.

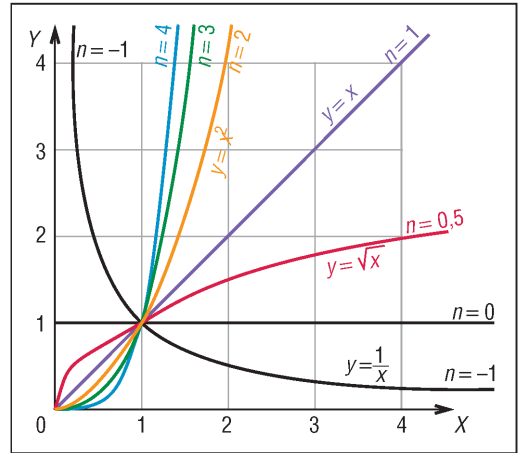
6. Courbes en puissance de X du type $Y = A.(X)^n$

a) Allures générales

A et n sont des constantes (paramètres constants), n est la puissance de X.

- Si $n = 0$ et $n = 1$ les courbes obtenues sont des droites.
- Si $n = 2$ la courbe est une parabole.
- Si $n = -1$ la courbe est une hyperbole.

Remarques : si $n > 1$ les graphes obtenus sont symétriques par rapport à l'axe y. Si $0 < n < 1$ les graphes sont symétriques par rapport à l'axe x.



15. Exemples de courbes d'équation $y = x^n$.

b) Transformation des graphes $Y = A.(X)^n$ en droite (linéarisation)

Les graphes n'étant pas toujours facilement exploitables expérimentalement avec les axes usuels, échelles arithmétiques, il est possible de les transformer en expression linéaire (droite) à partir des logarithmes.

Principe (lg étant le logarithme décimal) :

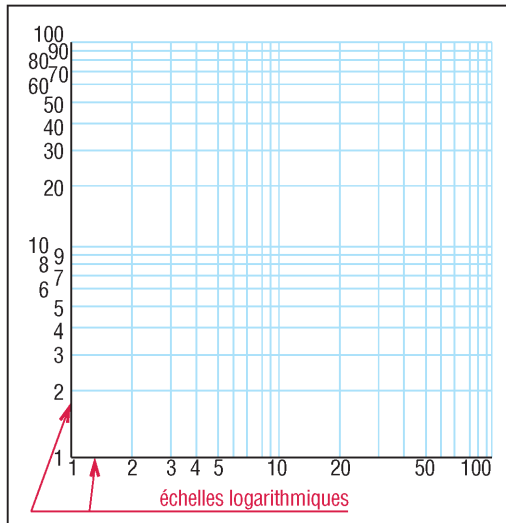
$$Y = A (X)^n \text{ donne}$$

$$\lg Y = \lg [A (X)^n] = \lg A + n.\lg X$$

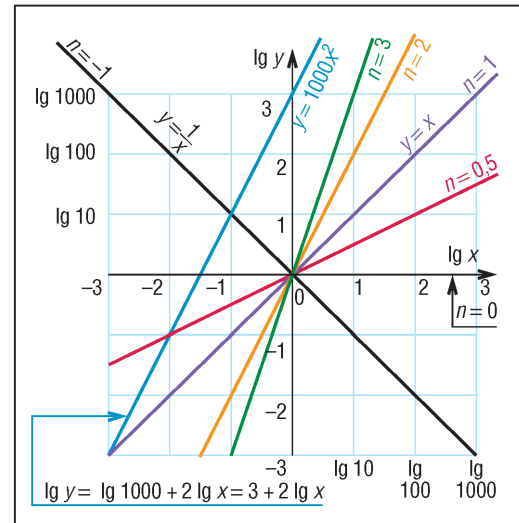
$$\text{Posons } \lg Y = y ; \lg A = a \text{ et } n.\lg X = n.x$$

$$\text{on obtient } y = a + n.x$$

$y = a + n.x$ est l'équation d'une droite dans le système d'axes (x, y) ou [lg X, lg Y] avec échelles logarithmiques (papier « log-log » pour les tracés).



16. Papier log-log.



17. Courbes $y = x^n$ tracées sur papier log-log.

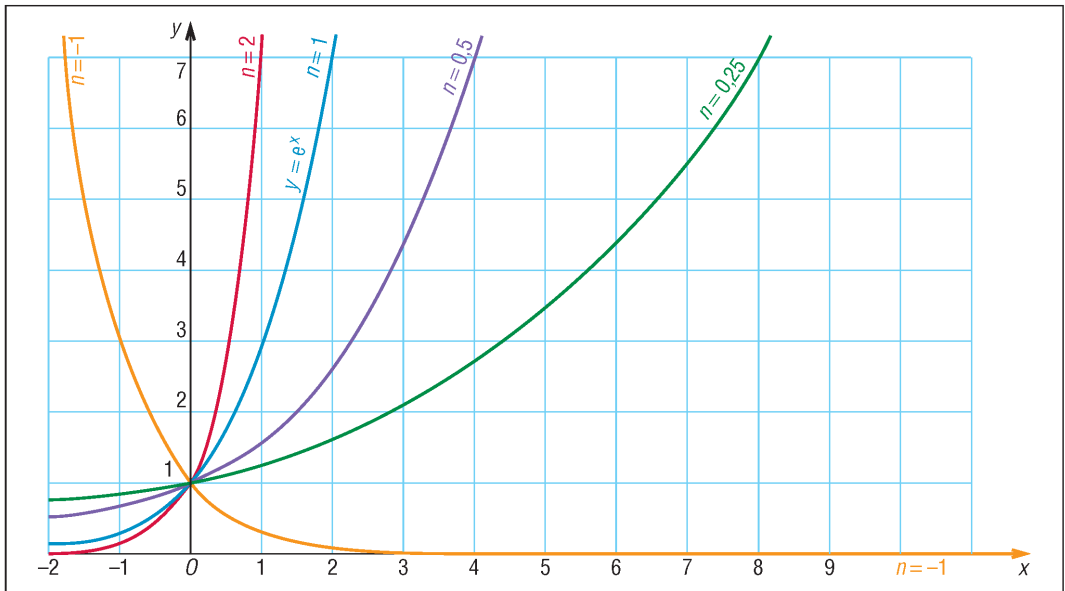
Intérêt expérimental des graphes avec échelles log-log : si au cours d'une expérimentation, avec série de mesures et report des valeurs sur un graphe log-log, la courbe obtenue est une droite, on peut affirmer que le phénomène étudié est du type $Y = A (X)^n$.

La valeur de n est obtenue en mesurant (sur le graphe) la pente de la droite et celle de A en mesurant l'ordonnée du point d'intersection entre la droite et l'axe y.

7. Courbes exponentielles du type $Y = A (e)^{nX}$ ou $Y = A (B)^X$

a) Allures générales

Leur croissance est beaucoup plus rapide que celles du type $Y = A (X)^n$.



18. Exemples de courbes d'équation $y = e^{nx}$.

b) Linéarisation

En utilisant les logarithmes, les courbes exponentielles peuvent être transformées en droite (linéarisation) pour une exploitation expérimentale plus facile. Deux cas peuvent se présenter, ln étant le logarithme népérien :

Cas B = 10 : lg étant le logarithme décimal, $Y = A (B)^X$ donne
 $\lg Y = \lg A + X \cdot \lg B$
 forme $y = a + X$

$y = a + X$ est une droite dans le système d'axes $[y, X]$ ou $[\lg Y, X]$ (échelle logarithmique en ordonnée et échelle arithmétique en abscisse). Il suffit d'utiliser un papier semi-logarithmique (log. décimal) pour faire les tracés. Pour les exemples proposés $Y = 10^{nX}$ devient $y = 1 + nX$ avec $a = \lg 10 = 1$.

Cas B différent de 10 :

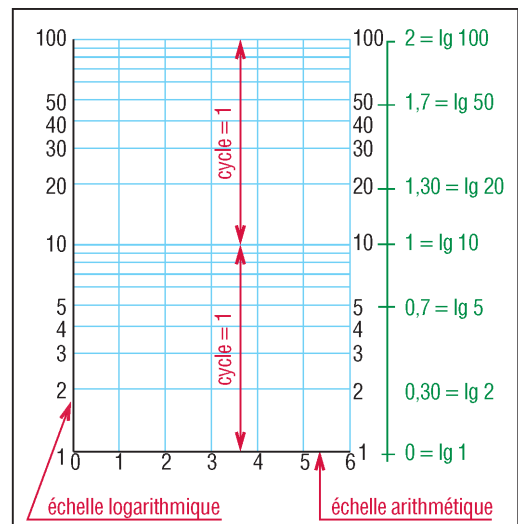
posons $B = e^n$
 ($e = 2,71828 =$ nombre d'Euler et n paramètre de croissance)

$Y = A (e)^{nX}$ donne
 $\ln Y = \ln A + nX \cdot \ln e$ (avec $\ln e = 1$)
 forme $y = a + nX$

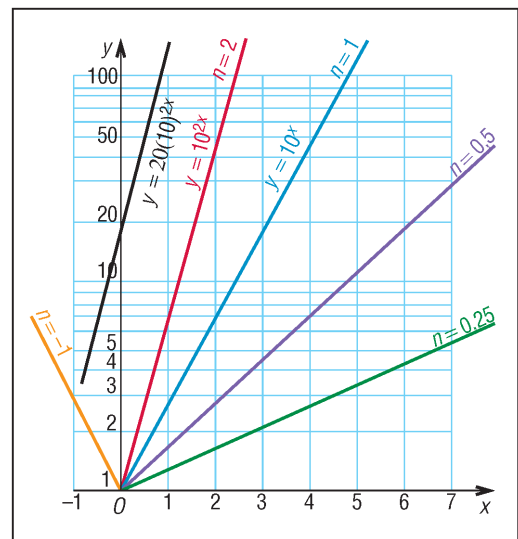
C'est l'équation d'une droite dans une grille semi-logarithmique (avec log. népérien).

Intérêt expérimental : dans les deux cas, si au cours d'une expérimentation et après report des points, la courbe obtenue est une droite en grille semi-log, on peut affirmer que le phénomène étudié est du type exponentiel.

La valeur de n est obtenue en mesurant, sur le graphe, la pente de la droite et celle de A en mesurant l'ordonnée du point d'intersection entre la droite et l'axe y .



19. Papier semi-logarithmique.

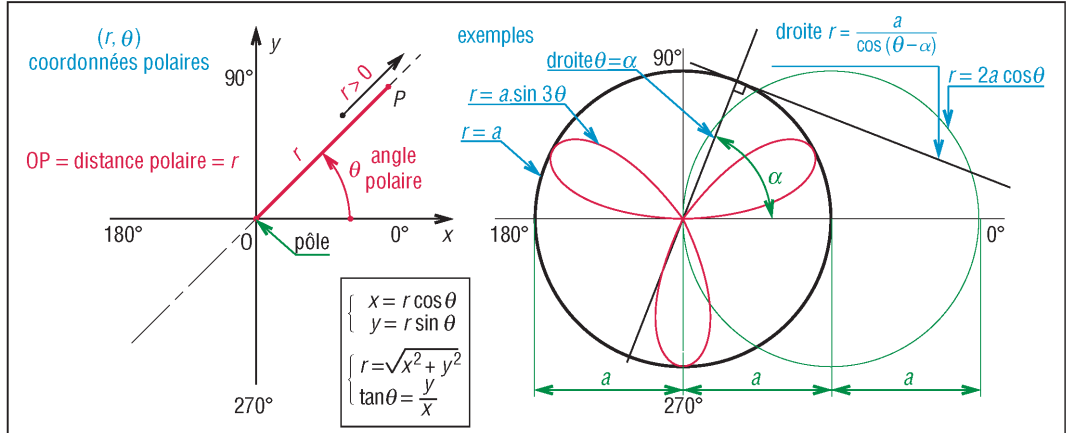


20. Courbes de la forme $y = e^{nx}$ tracées en papier semi-log.

8. Graphes en coordonnées polaires

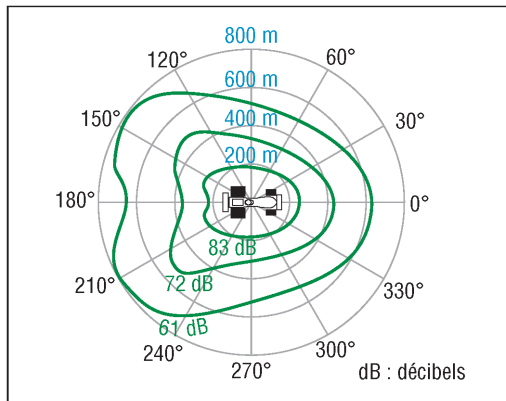
D'applications diverses, ils sont obtenus par des systèmes d'enregistrement à disque.
 Deux variables : la distance r (> 0 ou < 0) mesurée suivant une droite OP et l'angle orienté θ (têta) mesuré entre l'axe des x et OP .

Principe et courbes usuelles

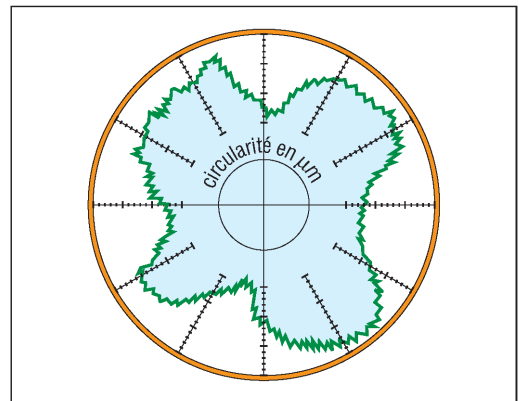


21. Coordonnées polaires et exemples de graphes.

Exemples expérimentaux :



22. Graphe donnant la valeur du bruit autour d'une automobile.



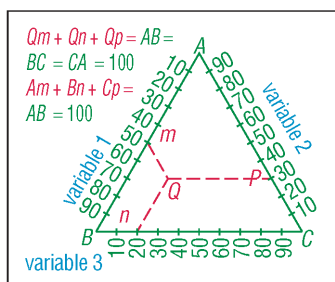
23. Graphe de circularité d'un roulement à billes.

9. Graphes triangulaires à trois variables

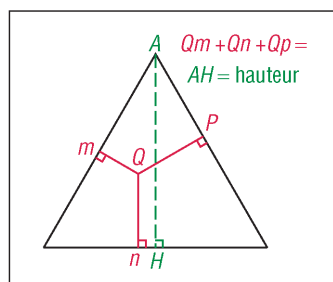
Ils sont plutôt utilisés en métallurgie et en chimie.

Cas d'emploi :

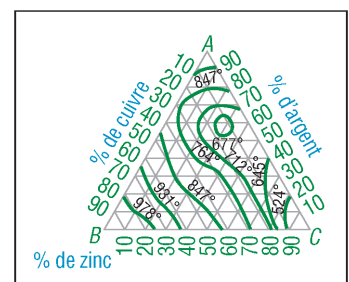
- Comparaison de trois variables apparentées ou non indépendantes (par exemple dont la somme « 100 % » est toujours constante).
- Analyse de compositions ou de structures à l'aide d'un réseau de courbes...



24. Principe 1.



25. Principe 2.



26. Exemple.

II – Graphiques ou diagrammes à barres

Ils sont facilement accessibles au plus grand nombre, techniciens et non-techniciens. Les livres, revues, magazines et journaux de grande diffusion les utilisent couramment.

Principe : dans ces diagrammes, les valeurs numériques (quantités produites, pourcentages, coûts, prix...) sont représentées graphiquement par des barres dont la longueur est proportionnelle à la quantité. Les barres, verticales ou horizontales, sont placées à intervalles réguliers. Les combinaisons possibles sont multiples.

Utilisations usuelles :

- Présentation de données à des non-techniciens (faciles à lire et à comprendre).
- Comparaison simple de deux données.
- Comparaison de données sur une période de temps.
- Donner une image de plusieurs données en rapport les unes avec les autres.

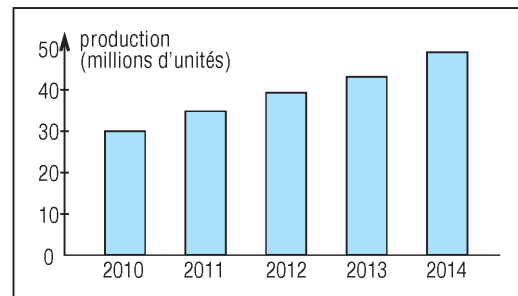
Remarque : ils sont moins intéressants lorsqu'il faut comparer un grand nombre de valeurs ou dans le cas de séries de données.

1. Principaux diagrammes à barres verticales

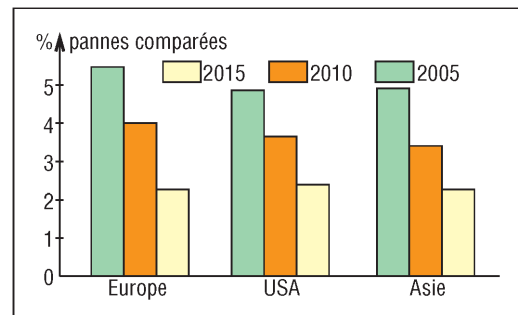
Diagramme à barres simples : il est utilisé pour suivre l'évolution d'une donnée ou grandeur (ventes, productions, coûts...) en fonction d'une variable (temps, lieu...).

Diagramme à barres groupées : il permet de comparer les évolutions de plusieurs grandeurs (données) différentes, toutes fonction d'une même variable (temps...). Chaque grandeur doit être identifiée par une couleur ou un motif particulier (défini en annexe par une clé ou une légende).

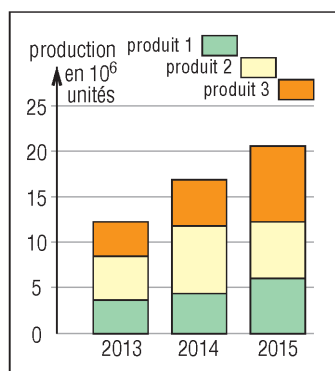
Diagramme à barres subdivisées : il est employé pour comparer plusieurs grandeurs (données) différentes toutes fonctions d'une même variable, tout en suivant l'évolution de leur somme ou total. Chaque grandeur doit être identifiée par une couleur ou un motif différent, défini en annexe par une clé ou une légende.



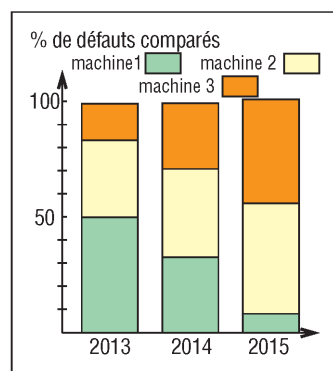
27. Diagramme à barres simples.



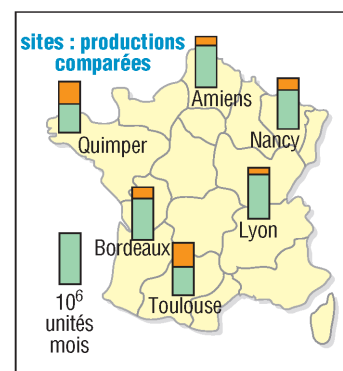
28. Diagramme à barres groupées.



29. Diagramme à barres subdivisées.



30. Variante à barres subdivisées.

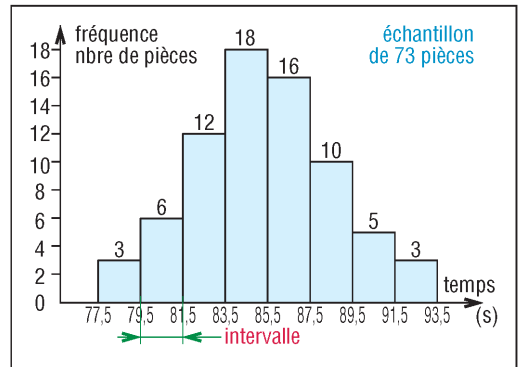


31. Variante à barres subdivisées.

Histogrammes : ce sont des diagrammes à barres verticales particuliers utilisés pour représenter la répartition statistique d'une série de mesures concernant une même grandeur et pour analyser les caractéristiques d'une population (rapide vue d'ensemble, valeur moyenne, dispersion ou étalement, tendances, comportement...)

Le principal problème est le choix du nombre des intervalles compte tenu du nombre des mesures ou observations (voir les recommandations d'Ishikawa).

| Histogramme simple : recommandations d'Ishikawa | |
|--|----------------------------------|
| nombre d'observations ou de mesures dans l'échantillon | nombre d'intervalles recommandés |
| < 50 | 5 à 7 |
| 50 à 100 | 6 à 10 |
| 100 à 250 | 7 à 12 |
| > 250 | 10 à 20 |



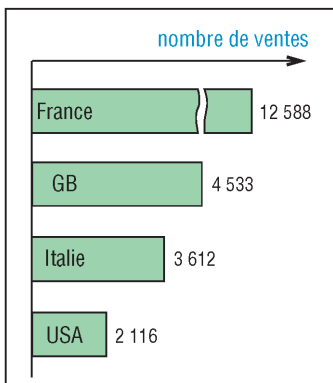
32. Histogramme de répartition de temps d'usinage.

2. Diagrammes à barres horizontales

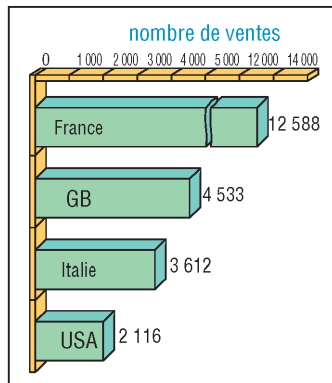
C'est une variante des précédents souvent utilisée lorsque l'une des grandeurs représentées est beaucoup plus grande que les autres.

Propriété : cette présentation, à visualisation identique, permet d'utiliser des barres moins larges et des espacements (intervalles) plus étroits : graphes plus compacts à qualité de lecture identique.

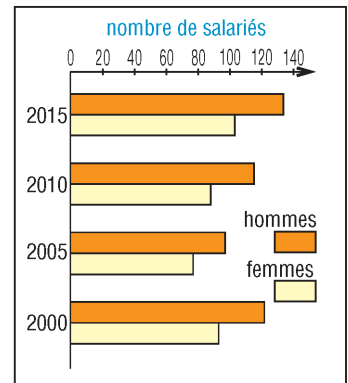
Principaux cas : barres simples, barres groupées, barres subdivisées, barres dos-à-dos (variantes des barres subdivisées), pyramide des âges (sorte d'histogramme).



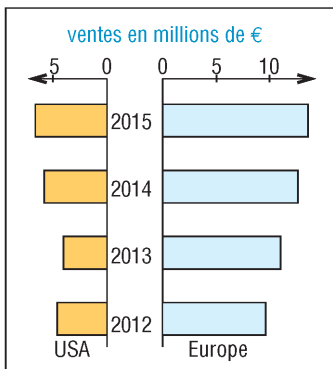
33. Diagramme à barres simples horizontales.



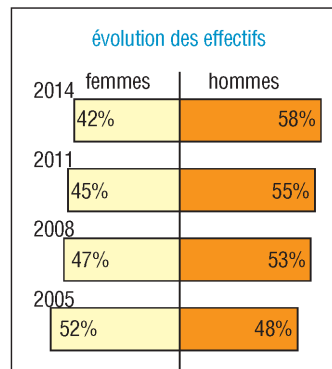
34. Variante avec effet de perspective.



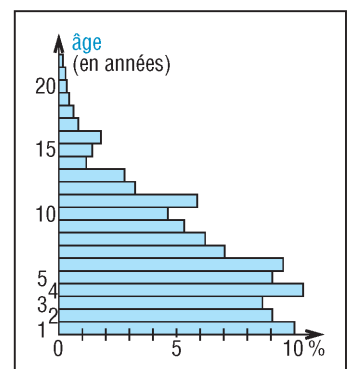
35. Diagramme à barres groupées horizontales.



36. Barres groupées dos-à-dos.



37. À barres dos-à-dos de même longueur.



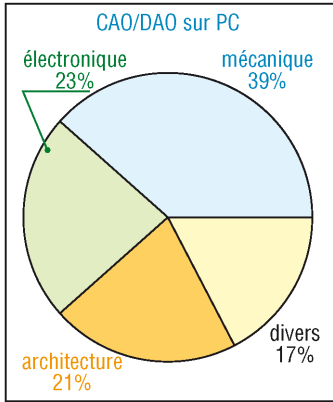
38. Pyramide des âges des lave-linges.

III - Diagrammes type camembert

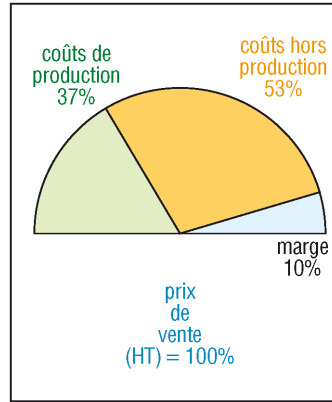
Ils sont souvent utilisés pour visualiser et comparer facilement les proportions (pourcentages) de plusieurs grandeurs ; un demi-camembert peut suffire à un nombre réduit de paramètres. Les variantes en perspective permettent d'ajouter des subdivisions supplémentaires.

Pour un camembert : 1 % occupe $3,6^\circ$; 10 % occupe 36° ; X % occupe X fois $3,6^\circ$.

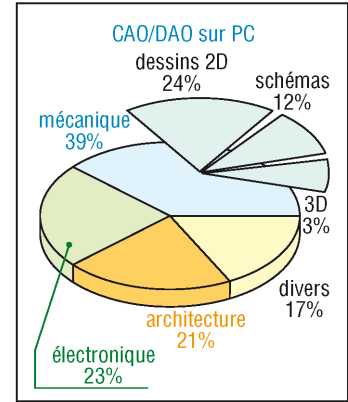
Pour un demi camembert : 1 % occupe $1,8^\circ$; 10 % occupe 18° ; X % occupe X fois $1,8^\circ$.



39. Diagramme camembert.



40. Demi-camembert.



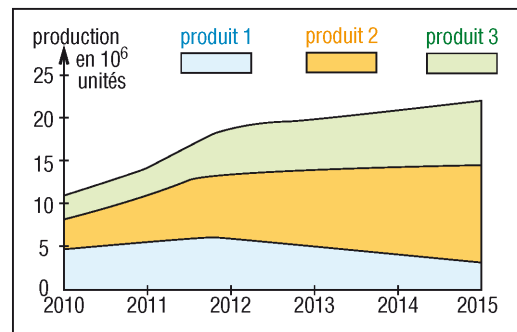
41. Camembert avec effet de perspective.

IV - Graphes rectangulaires avec surfaces

Ils combinent à la fois les propriétés des diagrammes à barres et celles des graphes à coordonnées rectangulaires du paragraphe 1.

Ils ont le même rôle que les diagrammes à barres subdivisées en offrant des comparaisons plus détaillées.

L'utilisation de couleurs ou de motifs différents simplifie la lecture.



42. Diagrammes à surfaces en coordonnées rectangulaires.

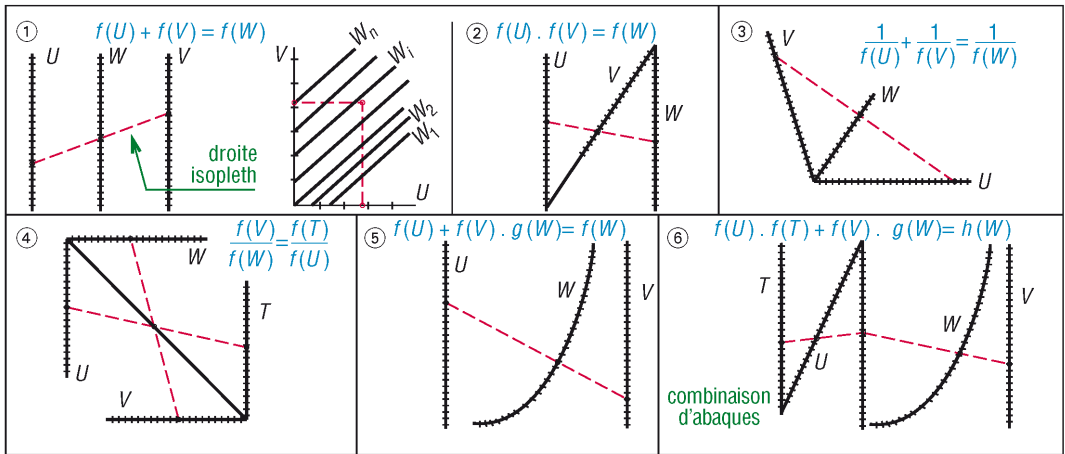
V - Abaques

Principal objectif : les abaques éliminent les calculs fastidieux nécessaires à l'exploitation de certaines formules de type mathématique, complexes, connues et contenant trois variables ou plus. Les abaques exigent du temps pour être construits mais sont très pratiques et très sûrs à l'usage ; il y a peu d'erreurs d'exploitation.

Principe : ils consistent en un jeu de trois échelles, ou plus, graduées (arithmétique, logarithme...), verticales ou inclinées, droites ou courbes représentant graphiquement les variables de la formule.

La valeur inconnue (cherchée) est déterminée par alignement. Dans le cas de trois variables, une droite (isopleth), tracée à partir des deux variables connues, coupe l'échelle de la troisième à la valeur cherchée.

Principales formes d'abaques



43. Différents types d'abaques.

VI - Organigrammes

Il existe une grande diversité de représentations possibles. Les organigrammes permettent de décrire des organisations, des processus, des ressources humaines, des produits, des flux de données...

Ce sont des outils particulièrement puissants et appréciés dans la mesure où ils présentent une très grande souplesse : pas de règles rigides ni de formalisme lourd ou complexe. De plus, ils sont faciles à comprendre par le plus grand nombre, techniciens ou non, spécialistes ou non.

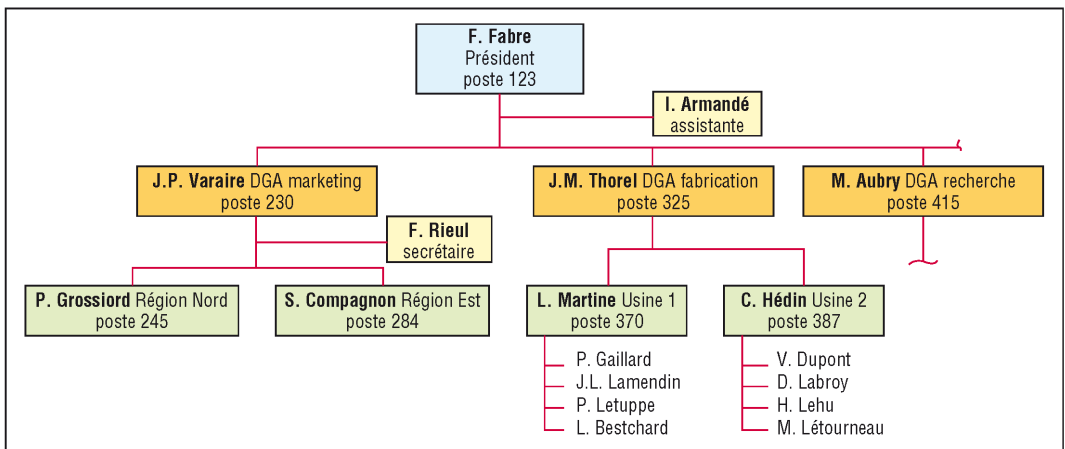
Une personnalisation éventuelle du graphisme et de l'écriture est souvent possible (logiciels...).

1. Organigrammes - Arborescences

Ce sont des sortes de tableaux représentant la structure hiérarchique d'une entreprise, d'un organisme, d'un système, d'un produit...

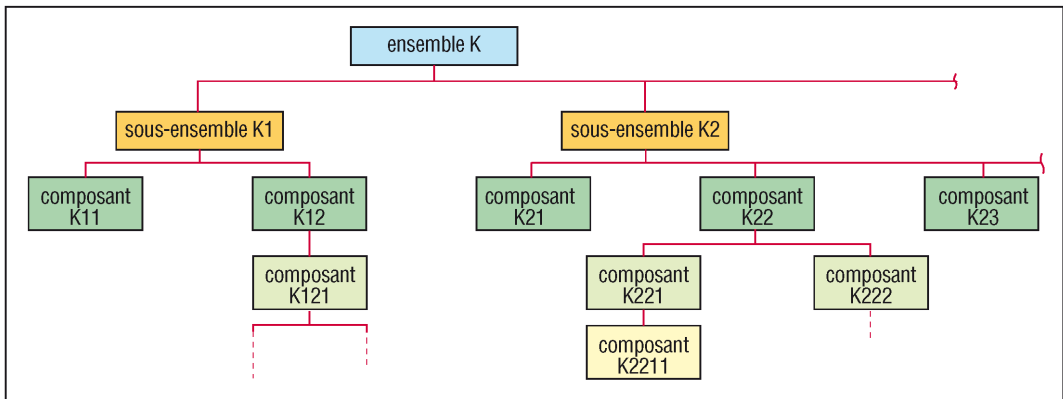
Organigramme de ressources humaines : il représente et détaille la structure hiérarchique d'une société. Les niveaux de responsabilité ou d'importance se retrouvent en allant du haut vers le bas. Le nom des personnes, leur fonction et les renseignements jugés importants (téléphone, fonction occupée...) sont indiqués dans un même rectangle ou boîte.

Les relations ou rapports directs existant entre ces personnes sont représentés par les lignes, verticales et horizontales, fléchées ou non, tracées entre les boîtes.



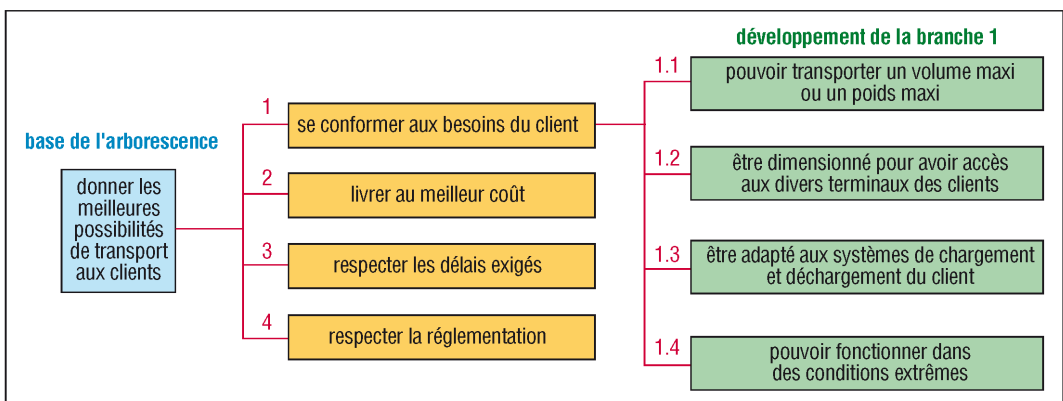
44. Organigramme de forme générale pour organisation, ressources humaines...

Organigramme technique de produit (ou arborescence technique) : c'est une variante du précédent, adaptée à la description d'un produit. Il représente la structure hiérarchique du produit en partant de l'ensemble (système global) et en s'arrêtant aux plus petits éléments ou composants (le produit est décortiqué niveau par niveau).



45. Organigramme technique de produit (OTP) ; forme générale.

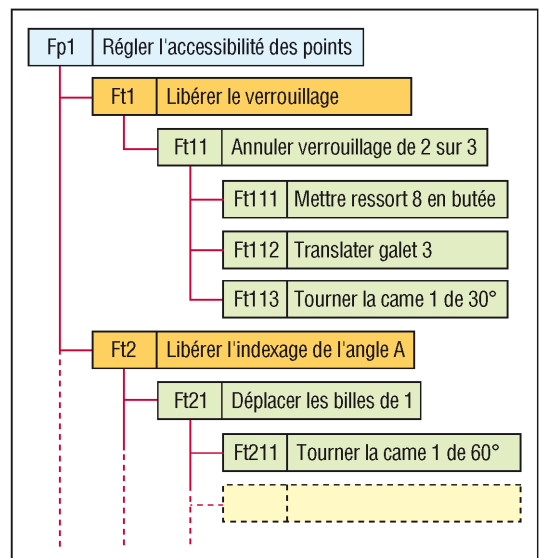
Arborescence fonctionnelle : utilisée en analyse fonctionnelle pour décrire les différentes fonctions liées à un produit (autres méthodes page 432), elle permet de représenter, à partir d'une fonction de base ou principale, les fonctions qui, de niveau en niveau, participent à celle-ci ou la réalisent.



46. Arborescence fonctionnelle d'un système de transport.

Arbre ou graphe de fonctions : également utilisé en analyse fonctionnelle, ils permettent d'analyser la nature et le poids des liaisons des fonctions techniques entre elles et avec les fonctions de service ou principales.

- Fp1 : fonction principale ;
- Ft1, Ft2 : sous-fonction principale de niveau 1 ;
- Ft11, Ft21 : sous-fonction principale de niveau 2 ;
- Ft111, Ft112, Ft113... : fonctions techniques successives de même niveau...



47. Exemple d'arbre de fonctions.

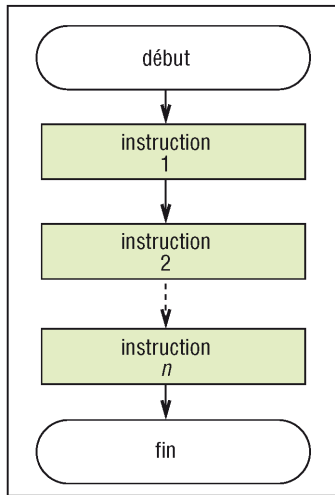
2. Algorithmes, ordinogrammes...

Organigrammes particuliers avec règles d'écriture et d'évolution (boîtes particulières, lignes fléchées pour le sens du flux...), ils sont utilisés pour représenter la logique d'enchaînement d'un algorithme ou des opérations de traitement d'un problème, d'un flux de données.

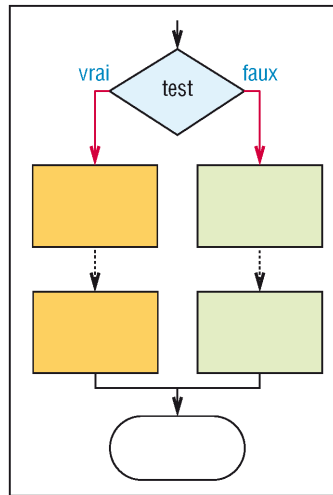
| Désignation | Entrée ou sortie de données | Instruction, opération sur données | Embranchement après test ou décision | Début, fin de séquence | Renvoi, connecteur | Sous-programme |
|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------|----------------|
| principaux symboles normalisés | | | | | | |

48. Principaux symboles (voir autres symboles pages 585).

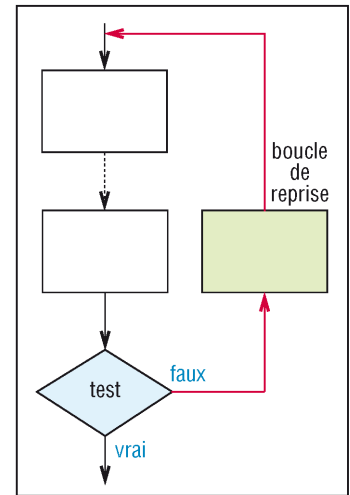
Principaux cas d'évolutions entre boîtes



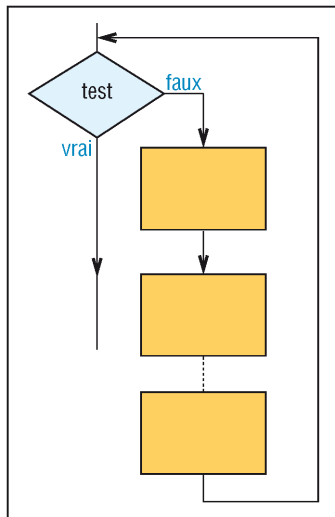
49. Séquence simple.



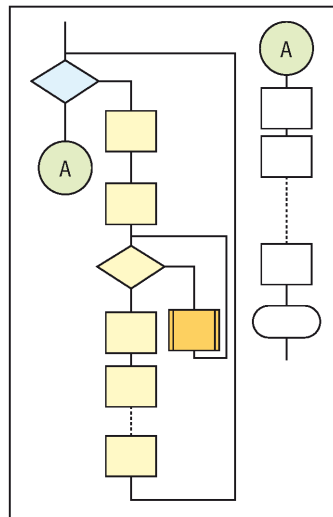
50. Embranchement entre deux séquences.



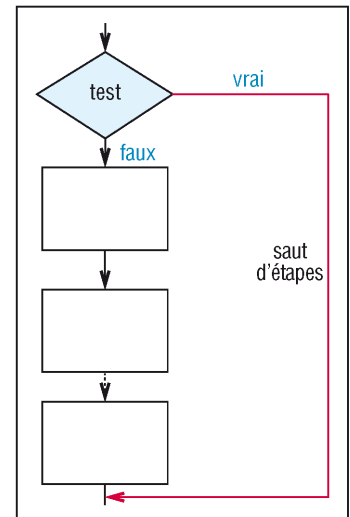
51. Reprise d'étapes.



52. Boucle de reprise avec test initial.



53. Exemple avec boucles emboîtées.



54. Saut d'étapes.

Algorithme : c'est l'ensemble des règles opératoires propres à un calcul ou à l'enchaînement des actions nécessaires à l'accomplissement d'une tâche.

VII - Graphes particuliers

Voir Pareto, Ishikawa (chapitre 38 : notions sur la qualité) ; APTE, FAST, SADT (chapitre 37 : méthodes d'analyse) ; GRAFCET (chapitre 43 : GRAFCET) ; Pert, Gantt (chapitre 36 : notion de projet).

VIII - Exercices

Exercice 1

Tracer un graphe, en coordonnées rectangulaires avec deux axes à échelles arithmétiques, représentant les données suivantes (production en ordonnée) :

| | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Production annuelle (en milliers d'unités) | 1 000 | 2 880 | 5 120 | 7 050 | 8 950 | 11 180 | 12 820 |
| Année de référence | 1985 | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |

- Déterminer l'équation de la droite décrivant au plus près ces données.
- Quelle production peut-on envisager entre 2015 et 2020 ?

Exercice 2

La flèche (f) d'un ressort de traction à spires en fonction de la charge (F) est mesurée expérimentalement. Les résultats sont :

| | | | | | | | | |
|--------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| F (charge en N) | 25 | 70 | 110 | 150 | 190 | 230 | 270 | 310 |
| f (flèche en mm) | 3 | 12 | 18 | 25 | 32 | 38 | 45 | 52 |

- Tracer le graphe F fonction de f . Déterminer l'équation correspondante ; en déduire la raideur du ressort.
- Quelle force produira une flèche de 70 mm ?

Exercice 3

Afin de réaliser l'étalonnage d'un thermocouple fer-constantan on détermine expérimentalement les données suivantes :

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| T (température °C) | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
| f.é.m. (mV) | 2,7 | 5,7 | 8,5 | 11,2 | 16,5 | 22,2 | 27,5 | 33,0 | 38,5 | 44,5 | 50 |

- Tracer le graphe T fonction de la f.é.m. (force électromotrice). Déterminer l'équation de la droite approchant au plus près ces données.
- Quelle est la valeur de la f.é.m. pour 1 000 °C ?

Exercice 4

On observe la chute d'un objet lâché du haut d'un gratte-ciel. La hauteur de chute et le temps correspondant sont rassemblés ci-dessous :

| | | | | | | | |
|--------------------------------|---|-----|------|------|------|-------|-------|
| t (temps de chute, en s) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| h (distance parcourue, en m) | 0 | 4,9 | 19,6 | 44,1 | 78,4 | 122,5 | 176,4 |

- L'équation représentant la chute est de la forme $[h = a.t^n]$. Déterminer les paramètres constants a et n après linéarisation et tracé sur papier log-log.
- Quelle est la durée de la chute si la hauteur du gratte-ciel est de 250 m ?

Exercice 5

La capacité (C) d'une vis d'Archimède, utilisée pour le convoyage des graines de maïs, dépend de sa vitesse de rotation (N). Les mesures réalisées expérimentalement donnent :

| | | | | | | | |
|-----------------------------|-----|-----|------|------|------|------|-------|
| C (capacité en L/s) | 3,4 | 6,3 | 16,5 | 37,0 | 68,1 | 91,5 | 110,5 |
| N (vitesse vis en tr/min) | 10 | 20 | 60 | 150 | 300 | 420 | 520 |

Tracer les données sur un papier log-log, en déduire l'équation exprimant la capacité de la vis en fonction de sa vitesse. Quelle est la capacité à 250 tr/min ?

Exercice 6

La consommation d'essence (Q) d'une automobile en fonction de sa vitesse (V) est mesurée expérimentalement. Les résultats sont :

| | | | | | | | |
|---|------|------|------|-------|-------|-------|-----|
| Q (consommation en mm^3/s) | 23,1 | 38,1 | 62,7 | 103,4 | 170,6 | 281,2 | 464 |
| V (vitesse du véhicule en m/s) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |

L'équation entre Q et V a la forme exponentielle $[Q = a.e^{n.X}]$. Déterminer, après linéarisation et tracé des données sur papier semi-log la valeur des paramètres constants a et n . Quelle est la consommation prévisible à 300 km/h ?

Exercice 7

Le chiffre d'affaires d'un composant nouvellement lancé sur le marché est relevé mois après mois. Les données sont :

| | | | | | | |
|---------------------------------|---------|---------|------|-------|-----|-------|
| Chiffres d'affaires (× 1 000 €) | 20 | 50 | 126 | 316 | 793 | 1 990 |
| Mois de référence | janvier | février | mars | avril | mai | juin |

a) L'équation liant les deux variables a la forme exponentielle $[Y = a \cdot e^{nX}]$. Déterminer les paramètres constants a et n .

b) Quel est le chiffre d'affaires prévisible pour juillet ?

Le tableau suivant est utilisé pour les exercices 8 à 13. Il rassemble les données statistiques essentielles de 1990 à 2015 d'une entreprise fabricant des composants pneumatiques.

| | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Année de référence | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 |
| Nombre d'employés | 50 | 78 | 106 | 149 | 195 | 190 |
| Chiffre d'affaire (× 100 000 €) | 25 | 55 | 255 | 550 | 725 | 850 |
| Coûts (× 100 000 €) | 20 | 42 | 190 | 450 | 650 | 675 |
| Bénéfices (× 100 000 €) | 5 | 13 | 65 | 100 | 75 | 175 |
| Production (× 1 000) | 15 | 23 | 32 | 50 | 110 | 115 |

Exercice 8

Tracer un histogramme donnant une représentation du nombre d'employés.

Exercice 9

Tracer un diagramme à barres représentant le nombre d'unités produites.

Exercice 10

Tracer un diagramme à barres groupées représentant le nombre d'unités produites avec le nombre d'employés.

Exercice 11

Tracer un diagramme à surfaces en coordonnées rectangulaires représentant les évolutions comparées du chiffre d'affaires et des coûts annuels. Mettre en évidence les bénéfices.

Exercice 12

Refaire l'exercice 11 précédent avec un diagramme à barres subdivisées.

Exercice 13

Tracer un diagramme camembert pour les données suivantes :

| Secteurs de coûts | Coûts (en % du coût total) |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Recherche et pré-développement | 20,0 |
| Développement / études détaillées | 13,0 |
| Industrialisation | 16,0 |
| Publicité / distribution | 19,0 |
| Frais de personnel (général) | 32,0 |

Exercice 14

Un essai de microphone directionnel fournit les données suivantes :

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Angle (°) | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | 135 | 150 | 165 | 180 |
| Sortie (V) | 1 | 0,97 | 0,96 | 0,94 | 0,91 | 0,86 | 0,81 | 0,76 | 0,71 | 0,63 | 0,55 | 0,49 | 0,46 |

La sortie en volts est mesurée à partir d'une source sonore constante déplacée de façon circulaire autour du micro. Il y a symétrie par rapport à la ligne (0°, 180°). Tracer les résultats sur un graphe avec coordonnées polaires.

13

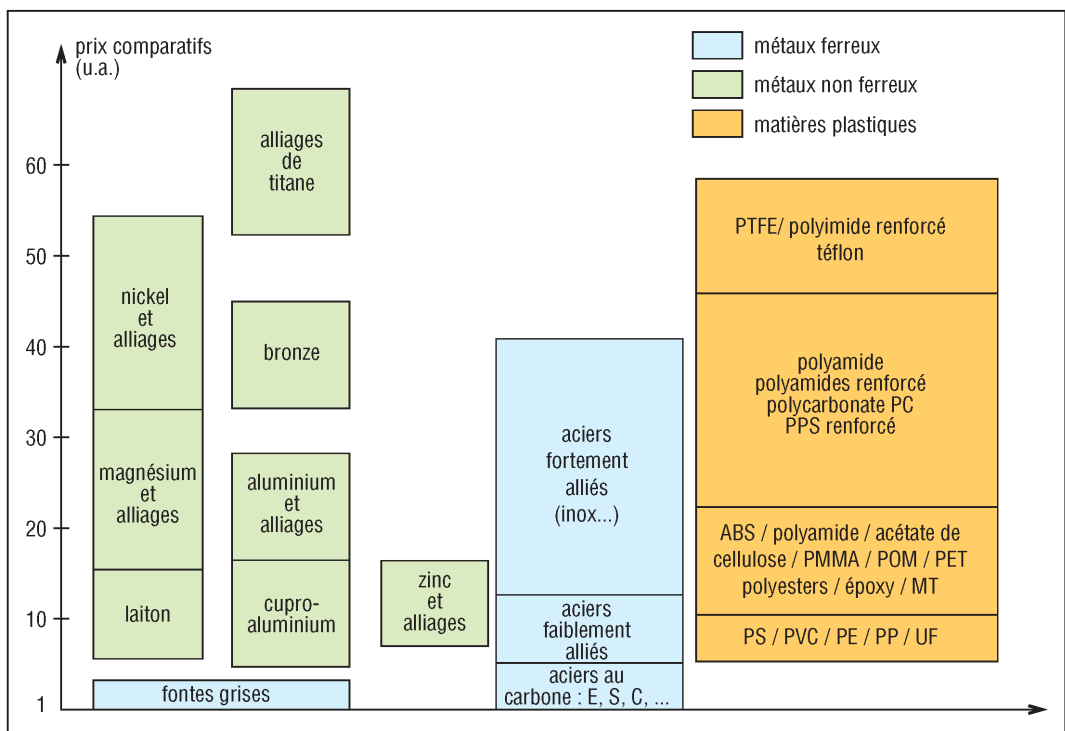
MATÉRIAUX GÉNÉRALITÉS

OBJECTIFS

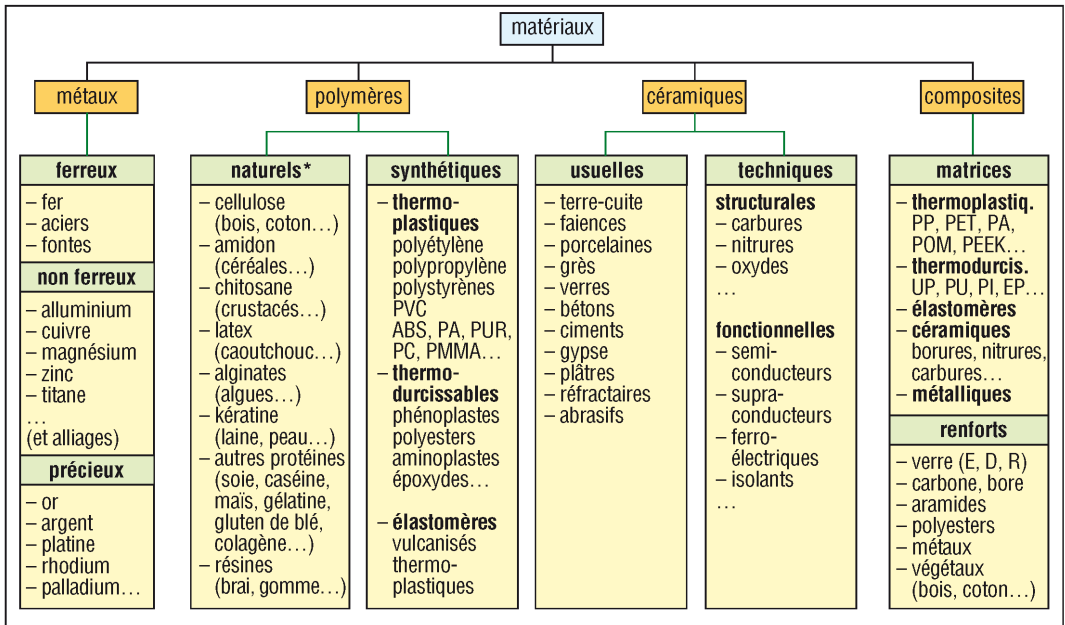
- Présenter les principaux matériaux industriels (métaux, matières plastiques, céramiques et composites).
- Indiquer les propriétés générales des deux principales familles (métaux et matières plastiques).
- Donner quelques notions sur les céramiques et les matériaux composites.

Les matériaux sont à la source de la technologie et du monde industriel. La réussite technique et le succès commercial d'un produit fabriqué dépendent en grande partie du ou des matériaux choisis.

Sélectionner un matériau n'est généralement pas une opération simple compte tenu de la grande variété proposée. Le choix dépend autant du prix que des qualités propres du matériau et du procédé de fabrication retenu pour la réalisation. La sélection est le plus souvent effectuée en équipe, client et concepteur étant associés aux techniciens de fabrication.



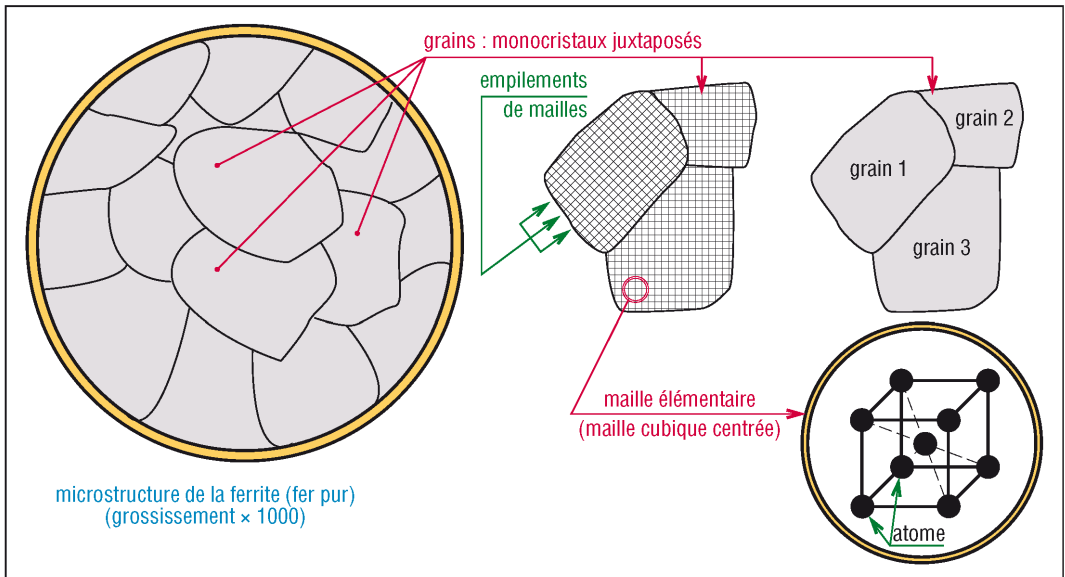
1. Prix comparatifs indicatifs (au kg) des principaux matériaux industriels (u.a. = unité arbitraire).



2. Principales familles de matériaux (* font aussi partie des principaux matériaux renouvelables).

I - Métaux

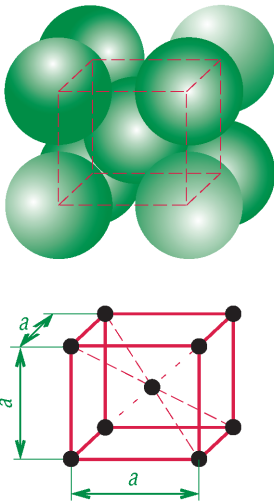
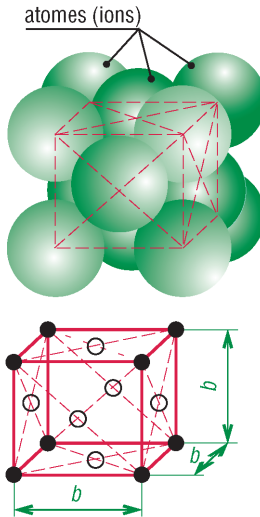
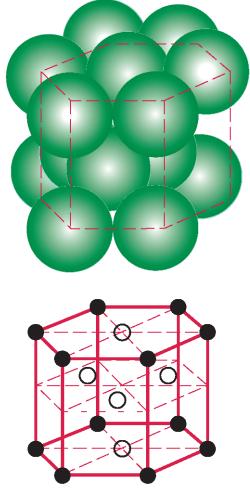
Ils sont étudiés en détail dans les chapitres suivants. Seules les propriétés caractéristiques communes sont abordées ici.



3. Structure cristalline des métaux.

Structure cristalline : c'est la façon dont les atomes sont empilés les uns sur les autres. Les métaux sont formés de monocristaux, ou grains, disposés côte à côte, dont la forme, plus ou moins régulière, est polygonale. Cette structure cristalline est à l'origine de leurs propriétés, elle influe sur les caractéristiques mécaniques et physiques.

Mailles : à l'intérieur des grains, les atomes, en contact les uns avec les autres, disposés régulièrement, forment des empilements compacts. Les réseaux cristallins ainsi formés sont appelés mailles. Les mailles rencontrées le plus fréquemment sont la maille cubique centrée, la maille cubique à faces centrées et la maille hexagonale compacte.

| Structures cristallines des métaux : principales mailles | | | |
|--|---|---|---|
| type | maille cubique centrée | maille cubique à face centrée | maille hexagonale compacte |
| forme de la maille |  |  |  |
| volume occupé par les atomes dans la maille | $V = 0,68 a^3$ 2 atomes par maille | $V = 0,74 b^3$ 4 atomes par maille | $V = 0,74 \text{ vol. de la maille}$ 6 atomes par prisme |
| exemples | fer α , Mn, Cr, W, Mo, V, Nb, Li, Zr, Ta, Ba, Ti (> 882 °C)... | fer γ , Al, Cu, Ag, Co, Pb, Ni, Au, Pt, Sr... | Mg, Zn, Cd, Be, Co (< 419 °C), Ti (< 882 °C)... |
| propriétés | haute résistance peu ductile | résiste au cisaillement très ductile | fragile peu ductile |

4. Structures cristallines des métaux : principales mailles.

Allotropie : propriété de certains métaux ou alliages qui peuvent avoir, selon la température, des structures cristallines (mailles) différentes, avec des propriétés différentes.

Exemples : fer α et fer γ , titane (< 882 °C et > 882 °C)...

Alliages : lorsqu'on ajoute les atomes d'un autre métal, on modifie l'arrangement des plans de la structure cristalline du métal de base. Cela accroît le plus souvent la résistance.

Exemple : le bronze est plus résistant que les deux métaux de base qui le constituent (cuivre et étain).

Désignation normalisée : elle utilise à la fois des lettres, qui précisent la nature du métal de base et des éléments d'addition, plus des chiffres qui indiquent les indices de pureté et les teneurs. Deux types de symboles sont utilisés : les symboles chimiques usuels et les symboles métallurgiques.

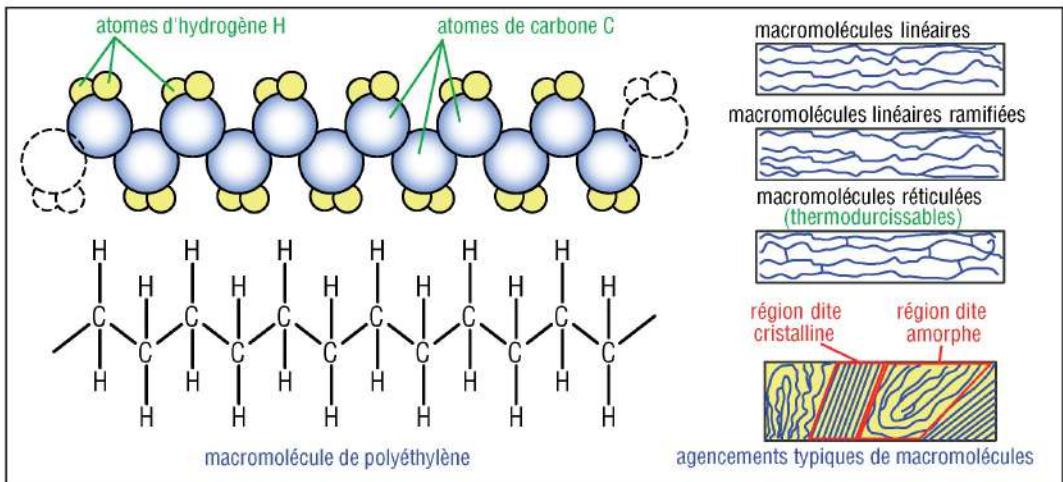
| Symboles chimiques et métallurgiques, densité des métaux usuels | | | | | | | |
|---|------------------|-----------------------|---------|-----------|------------------|-----------------------|---------|
| corps | symbole chimique | symbole métallurgique | densité | corps | symbole chimique | symbole métallurgique | densité |
| aluminium | Al | A | 2,7 | manganèse | Mn | M | 7,2 |
| béryllium | Be | Be | 1,85 | molybdène | Mo | D | 10,2 |
| bore | B | B | 2,35 | nickel | Ni | N | 8,9 |
| cadmium | Cd | Cd | 8 | phosphore | P | P | 1,88 |
| carbone graphite | C | — | 2,24 | platine | Pt | — | 21,5 |
| carbone diamant | C | — | 3,5 | plomb | Pb | Pb | 11,34 |
| chrome | Cr | C | 7,1 | silicium | Si | S | 2,4 |
| cobalt | Co | K | 8,9 | soufre | S | F | 2,1 |
| cuivre | Cu | U | 9 | titane | Ti | T | 4,5 |
| étain | Sn | E | 6 à 7,5 | tungstène | W | W | 19,3 |
| fer | Fe | Fe | 7,8 | vanadium | V | V | 5,9 |
| lithium | Li | L | 0,534 | zinc | Zn | Z | 7,15 |
| magnésium | Mg | G | 1,75 | zirconium | Zr | Zr | 6,5 |

II - Polymères ou matières plastiques

Il en existe deux familles principales : les thermoplastiques et les thermodurcissables (voir chapitre 18 : matières plastiques et élastomères).

1. Thermoplastiques

Très nombreux, ils sont les plus utilisés. Ils ramollissent et se déforment à la chaleur. Ils peuvent, en théorie, être refondus et remis en œuvre un grand nombre de fois.



5. Polymère : structure tridimensionnelle d'une macromolécule de polyéthylène ; formes des chaînes de macromolécules.

Exemples : polyéthylène, polypropylène, polystyrène, PVC.

2. Thermodurcissables

Ils ne ramollissent pas et ne se déforment pas sous l'action de la chaleur. Une fois créés, il n'est plus possible de les remodeler par chauffage.

Exemples : phénoliques, époxydes...

Remarque : une même matière plastique, comme le polyester par exemple, existe parfois dans la forme thermoplastique et dans la forme thermodurcissable.

3. Élastomères ou « caoutchoucs »

On peut les considérer comme une famille supplémentaire de polymères aux propriétés très particulières. Ils sont caractérisés par une très grande élasticité.

III - Céramiques

Ni métalliques, ni polymères, ce sont les matières premières les plus abondantes de la croûte terrestre et les matériaux les plus anciens utilisés par l'homme. Elles sont très dures, très rigides, résistent à la chaleur, à l'usure, aux agents chimiques et à la corrosion. Leur principal inconvénient est la fragilité.

Fabrication : elle comprend en général une mise en forme (pressage, moulage, extrusion...) suivie par un traitement thermique (cuisson ou frittage).

1. Céramiques traditionnelles

Elles regroupent les ciments ($\text{CaO} + \text{SiO}_2$), les plâtres, les produits à base d'argile (terres cuites, faïence, porcelaine, grès cérame...) et les produits à base de silice (verre, cristal...).

| Céramiques traditionnelles | | | | | |
|--|--------------------------|--|------------|--|---|
| nuances | | familles – matières premières | | norme NF | applications, emploi |
| produits poreux | terre cuite | marnes, argiles | | | tuiles, briques, carreaux, poteries... |
| | faïence | argile, silice, quartz | | | vaisselle, carrelage (mural), art |
| | grès | argile, kaolin, feldspath | | | carrelage (sol), émaillé, vitrifié |
| | réfractaires | – alumine Al_2O_3 + silice SiO_2 – magnésie chaux ($\text{MgO} + \text{CaO}$), magnésie chromite ($+ \text{Cr}_2\text{O}_3$), magnésie zircon ($\text{MgO} + \text{ZrO}_2$), – magnésie carbone ($\text{MgO} + \text{C}$), chromite ($\text{MgO} + \text{Cr}$), dolomie... | | EN ISO 10081 | – argileux, siliceux, laine isolante – ciment, béton, briques, produits frittés, produits isolants |
| produits vitrifiés | grès cérame | argile, silice, kaolin, chamotte | | | éviers, lavabos, baignoires, sanitaires... |
| | vitreux | argile, kaolin, feldspath, silice ; (« argile grésant ») | | | arts de la table, optique, sanitaires |
| | porcelaine | kaolin, feldspath, silice (quartz), argile | | | arts de la table, optique, sanitaires |
| verres (base de SiO_2 (> 50 %) et Na_2O (de 2 à 16 %)) | silicate sodocalcique | oxyde de calcium CaO , 5 à 14 % | EN 572 | verre flotté, armé, poli, étiré, imprimé | |
| | borosilicate | oxyde de bore B_2O_3 , 7 à 15 % | EN 1748-1 | résistant aux chocs thermiques (Pyrex) | |
| | silicate alcalinoterreux | $\text{CaO} - \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2 - \text{SrO}$ | EN 14178-1 | glace flottée, laine isolante... | |
| | crystal, cristalin... | oxyde de plomb PbO , 8 à 30 % | B 30-004 | vaisselle, art, optique... | |
| | vitrocéramique | Li_2O , ZnO , Ti_2O , ZrO_2 , MgO , CaO | EN 1748-2 | glace étirée, laminée, moulée... | |
| | spéciaux | | | optique, laser, fibre optique | |
| abrasifs | agglomérés | oxydes (Al_2O_3 ...), carbures (Si ...), émeri, corindon... | | ISO 525 | meules, feuilles, bandes, rouleaux... |
| | superabrasifs | diamants (D), nitrure de bore (B) | | ISO 6104 | meules, disques... |

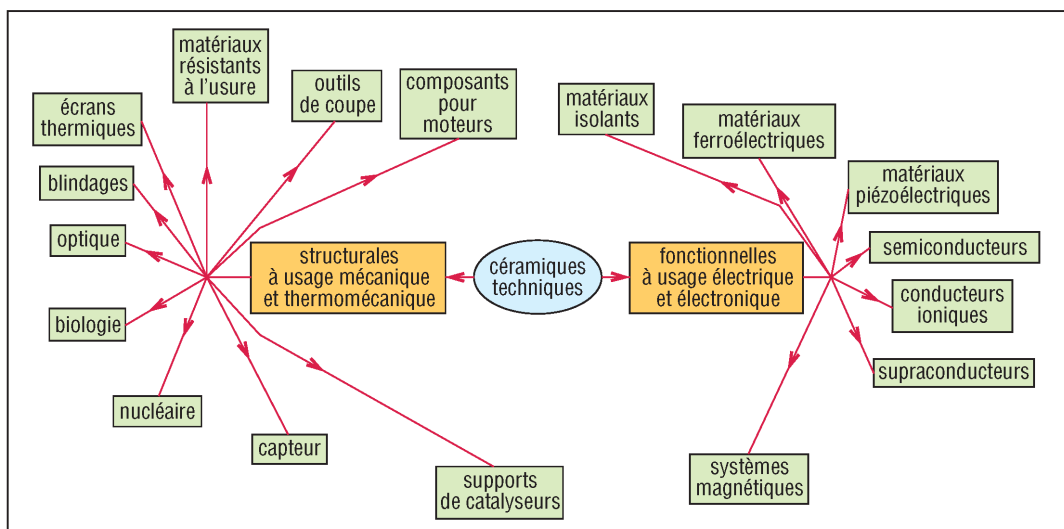
Cas des bétons, voir NF EN 206 et 206 C/N, etc.

2. Céramiques techniques

Plus récentes, elles sont soit fonctionnelles, à « usage électrique », soit structurales, à usage mécanique ou thermomécanique. Méthode de classification : XP ENV 12212.

Exemples : oxydes d'alumine (Al_2O_3), zircon (ZrO_2), nitrures de bore (BN) ou de silicium (Si_3N_4), carbures de silicium (SiC) ou de tungstène (WC), carbure de titane (TiC).

Utilisations : fibres optiques (silicium), mémoires magnétiques (ferrites), outils de coupe (carbures), abrasifs, isolants, écrans thermiques, joints d'étanchéité, laser, prothèses osseuses...



6. Domaines d'application des céramiques techniques.

IV – Matériaux composites

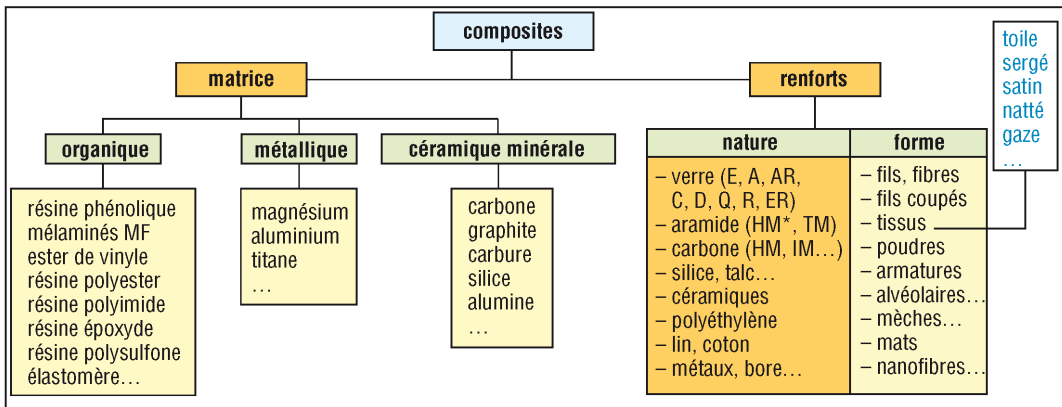
Ils sont composés d'un matériau de base (matrice ou liant : polymère, céramique ou métal) renforcés par des fibres, ou agrégats, d'un autre matériau afin de combiner au mieux les avantages des deux. Les deux corps, de structure différente, ne se mélangent pas (structure hétérogène) au contraire d'un alliage (structure homogène). Fabrication : NF E 68-001.

Exemples familiers : béton armé (béton + armature acier), pneumatiques (élastomère + toile + fils d'acier), équipements sportifs (raquettes, ski...).

Composites à matrices polymères : en renfort, la fibre de verre, la plus économique, est la plus utilisée. La fibre de carbone, plus coûteuse, est utilisée dans des applications plus pointues : équipement sportifs de haut niveau, aéronautique... Les fibres organiques comme les aramides (kevlar) sont un compromis entre les deux.

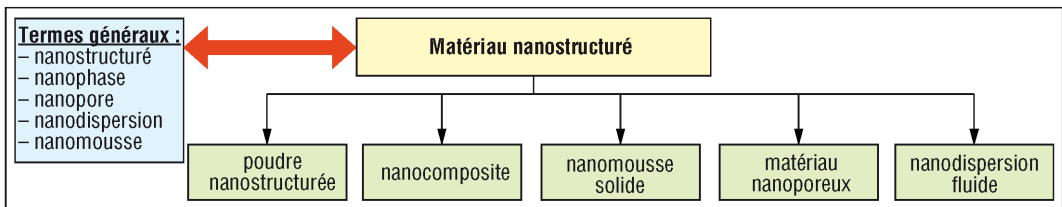
| Fibres | diamètre 0,001mm | R _f (da N/mm ²) | E (da N/mm ²) |
|--|---------------------|---|------------------------------|
| verre E | 3 – 20 | 250 – 350 | 7 × 10 ³ |
| carbone | 7 – 10 | 250 – 700 | 35 × 10 ³ |
| aramide (kevlar) | 12 | 270 – 350 | 11 × 10 ³ |
| acier | 13 | 420 | 20 × 10 ³ |
| alumine Al ₂ O ₃ | 3 – 10 | 2 100 | 43 × 10 ³ |
| carbure de silicium (Si C) | 3 – 10 | 2 100 | 50 × 10 ³ |

7. Caractéristiques mécaniques de quelques fibres de renforcement de composites.



8. Principaux constituants des matériaux composites (* HM = haut module, IM = module intermédiaire...).

V – Matériaux nouveaux



9. Principales catégories de matériaux nanostructurés (voir aussi FD T16-101-4 – Vocabulaire XP ISO TS/80004...).

Depuis la préhistoire, toutes les époques ont connu le développement de nouveaux matériaux : âge de pierre, âge du bronze, acier au XIX^e siècle...

De nos jours, les nanomatériaux (1 nm à 100 nm), les composites récents, les céramiques techniques et les métaux de pointe sont les plus prometteurs. En développement croissant, ils sont bien souvent des éléments déterminants dans la fabrication et le succès des machines les plus complexes : engins spatiaux, avions, équipements sportifs pour la haute compétition...

En outre, ils pallient de plus en plus à la pénurie des ressources naturelles en matériaux traditionnels et en matériaux stratégiques : chrome, manganèse, cobalt...

14

ESSAIS DES MATÉRIAUX

OBJECTIFS

- Présenter et décrire les principaux essais mécaniques normalisés et mondialement utilisés.
- Donner des notions d'extensométrie et de photoélasticité.

Les essais, en laboratoire ou sur le terrain, apportent des renseignements précis et fiables sur la qualité et les performances d'un matériau. Il en existe un grand nombre ; des normes internationales règlent la plupart.

Principaux essais : essais mécaniques (traction, dureté, résilience, fatigue, fluage...), essais pour la productique (emboutissage, pliage, usinabilité...), essais sur les surfaces (abrasion, rayures, rugosité, adhérence...), essais sur les fluides (viscosité, écoulements...), essais non destructifs (NF EN 1330 ; radiographie, ultrasons, magnétoscopie, acoustique d'étanchéité, ressuage...)

I - Définitions préliminaires

Homogénéité : un matériau est homogène s'il possède, en tous points, les mêmes propriétés chimiques et physiques. La plupart des métaux et des alliages sont considérés comme homogènes. Le bois et les composites ne le sont pas, ils sont hétérogènes.

Contraintes (unités : N/mm^2 ou MPa) : elles caractérisent par des indications chiffrées les efforts de cohésion qui existent entre les grains de matière. On trouve des contraintes normales, ou de tension, ayant pour symbole σ (sigma) et des contraintes de cisaillement, ayant pour symbole τ (tau). (Voir la résistance des matériaux).

Déformations : elles résultent et varient avec les charges appliquées sur les objets. Elles sont mises en évidence par la variation des dimensions, et peuvent être élastiques ou plastiques.

Exemples : allongement, raccourcissement, fléchissement, torsion, glissement...

Isotropie : un matériau est isotrope s'il présente les mêmes caractéristiques mécaniques dans toutes les directions de la matière. Les métaux et les alliages sont généralement isotropes. Les matières plastiques, les matériaux composites et le bois ne sont pas isotropes. Le bois est plus résistant dans le sens des fibres que dans le sens perpendiculaire aux fibres.

Élasticité : elle caractérise l'aptitude qu'a un matériau à reprendre sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé. Un ressort, chargé normalement, a un comportement élastique. La propriété contraire est la plasticité.

Plasticité : un matériau qui ne reprend pas sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé est dit plastique. La pâte à modeler a un comportement plastique. La plupart des

métaux et des alliages ont un comportement élastique sous charges modérées et plastique sous charges excessives.

Ductilité : c'est l'aptitude qu'a un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. Elle est caractérisée par l'allongement pour cent $A\%$ (plus $A\%$ est grand, plus le matériau est ductile).

- Si $A\% \geq 5\%$ les matériaux sont considérés comme ductiles.
- Si $A\% < 5\%$ les matériaux sont considérés comme fragiles ou « cassants ».
- $Z\%$ (striction) et K (résilience) sont également des indicateurs.

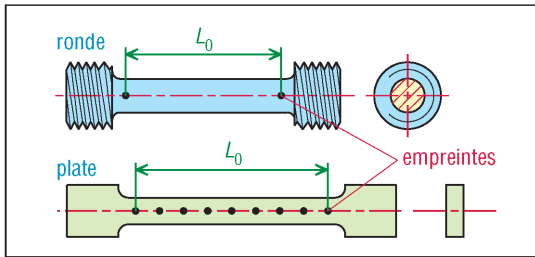
La ductilité est une propriété déterminante pour les matériaux devant être déformés à froid (emboutissage, pliage...).

Malléabilité : cette propriété est identique à la ductilité mais appliquée à la compression. L'aluminium, le cuivre, l'or, certains laiton et certains aciers inoxydables sont très malléables ($A\% > 35\%$) et acceptent des emboutissages profonds.

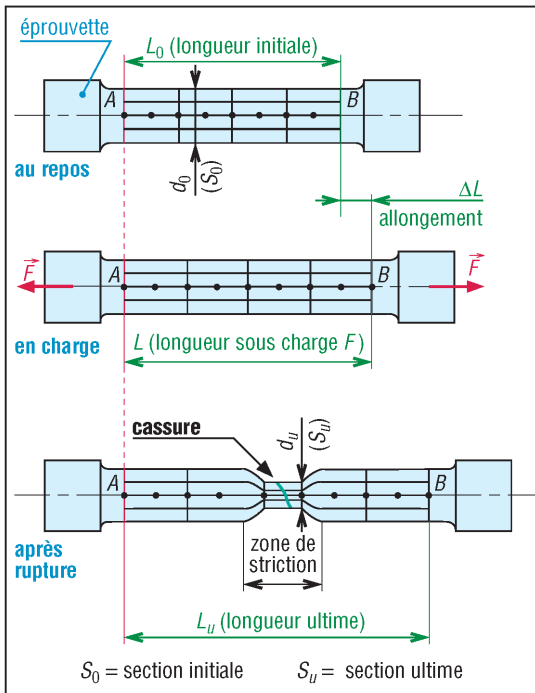
II - Essai de traction

Voir aussi Norme NF EN ISO 6892-1 à 3.

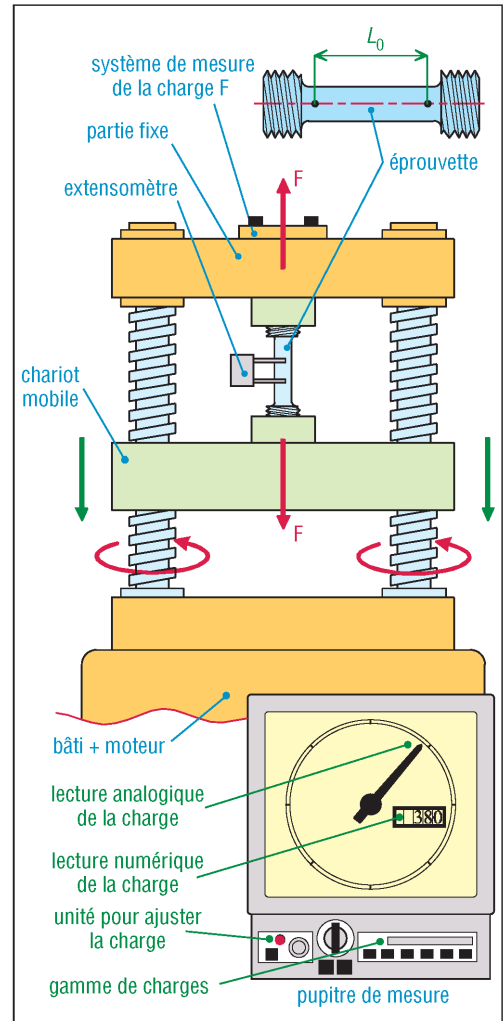
Essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester), cylindrique ou parallélépipédique (plate), deux forces égales et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.



1. Exemples d'éprouvettes de traction usuelles.



2. Éprouvette en cours d'essai.



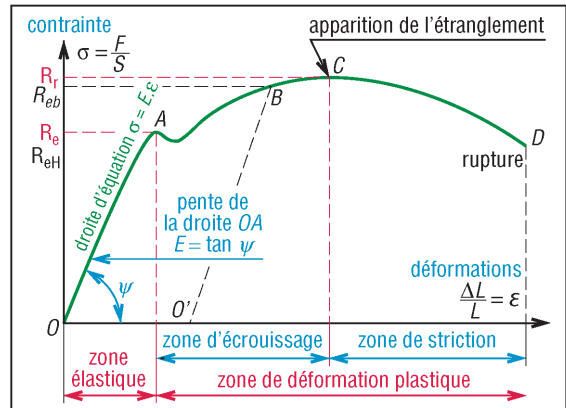
3. Principe des machines d'essai de traction.

1. Courbes contraintes déformations typiques

Pour un grand nombre de matériaux, comme les métaux et les alliages, les courbes obtenues présentent une zone, appelée domaine élastique, où le graphe est une droite (segment OA). Pour tous les points de cette droite, la déformation, ou l'allongement, est proportionnelle à la contrainte, ou à l'effort exercé, et le matériau (l'éprouvette) est parfaitement élastique (se comporte comme un ressort parfait).

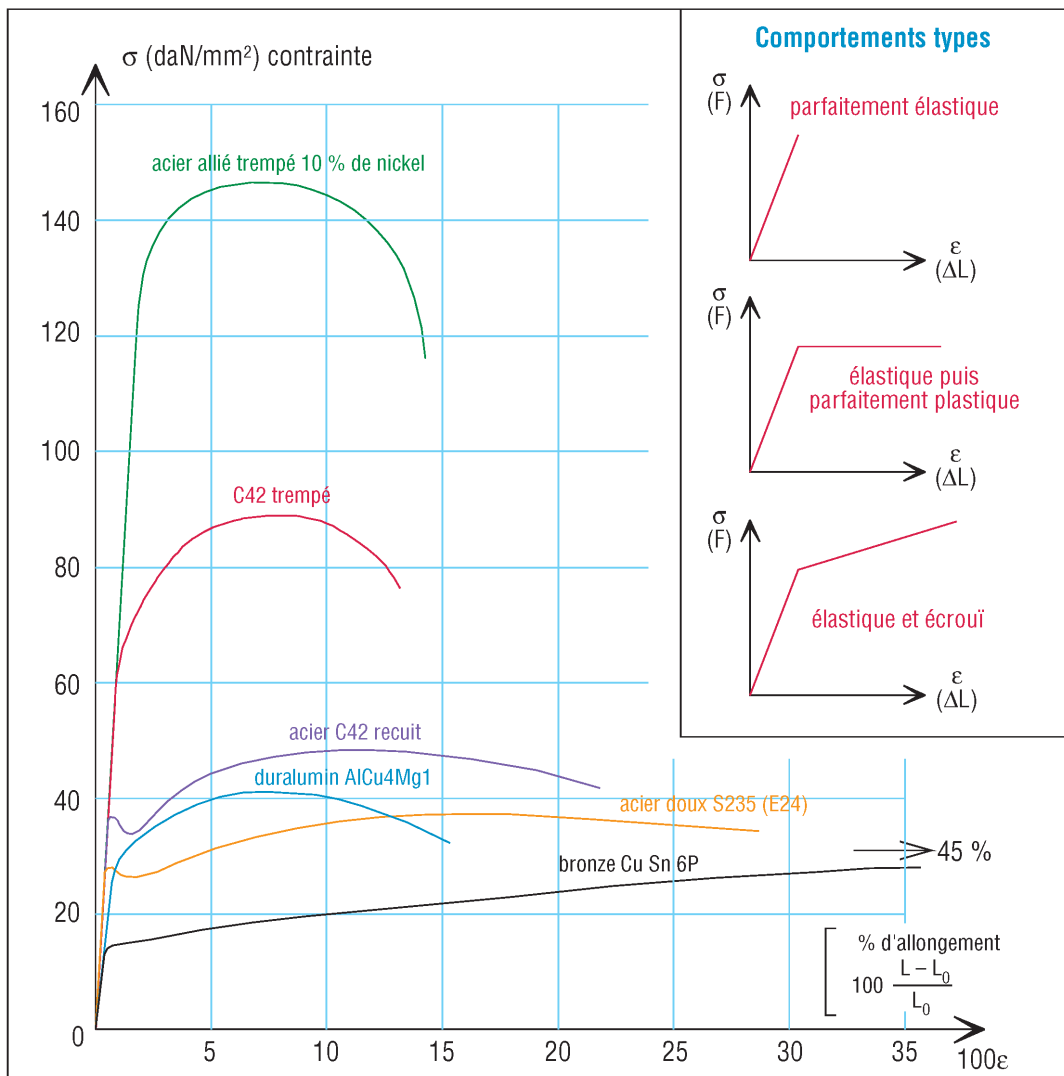
R_r : résistance à la rupture (ou R_m)
 R_e : limite élastique (ou $R_{e0,2}$)
 E : module d'élasticité longitudinal

| | |
|--|--|
| <p style="text-align: center;">allongement pour cent</p> $A = 100 \frac{L_U - L_0}{L_0}$ | <p style="text-align: center;">coefficient de striction</p> $Z = 100 \frac{S_U - S_0}{S_0}$ |
| <p style="text-align: center;">$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$</p> <p><small>ν = coefficient de Poisson G = module d'élasticité transversal</small></p> | <p style="text-align: center;">loi de Hooke</p> $\sigma = E\varepsilon$ $\left(\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}\right)$ |



4. Grandeurs fondamentales définies par l'essai de traction.

5. Courbe type de traction (matériau ductile).



6. Courbes de traction de quelques matériaux et modèles de comportement.

Module d'élasticité longitudinale E (N/mm²) : il caractérise la pente de la droite de proportionnalité précédente et l'élasticité du matériau testé. Plus E est grand, plus le matériau est rigide et inversement.

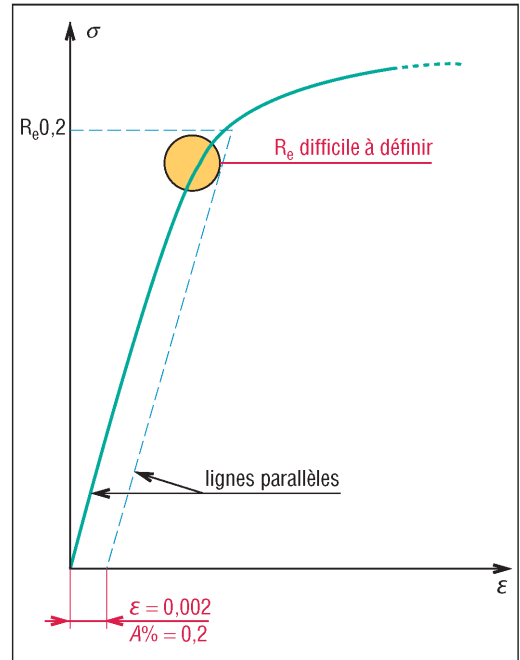
Exemples : $E_{\text{aciers}} = 200\,000\text{ N/mm}^2$, $E_{\text{élastomères}} \approx 1\text{ N/mm}^2$.

Loi de Hooke ($\sigma = E\varepsilon$) : cette loi, ou équation de la droite OA , traduit la proportionnalité précédente (σ en N/mm², E en N/mm² et ε sans unité). Elle est à la résistance des matériaux ce qu'est la loi d'Ohm à l'électricité.

Limite élastique R_e (N/mm²) : elle marque la fin du domaine élastique (« point A »). Pour les valeurs supérieures le matériau ne se déforme plus élastiquement mais plastiquement (l'éprouvette ne retrouve plus ses dimensions initiales après déchargement, il subsiste un allongement permanent).

2. Limite conventionnelle d'élasticité $R_{e,0,2}$ ou $R_{p,0,2}$ (N/mm²)

Variante de la précédente (R_e), elle tient compte des imprécisions de la mesure, c'est-à-dire des imperfections de la droite OA et des appareils de mesure. Pour la mesure de R_e on tolère une légère déformation permanente de 0,2 % ($A\% = 0,2$).



7. Définition de $R_{e,0,2}$

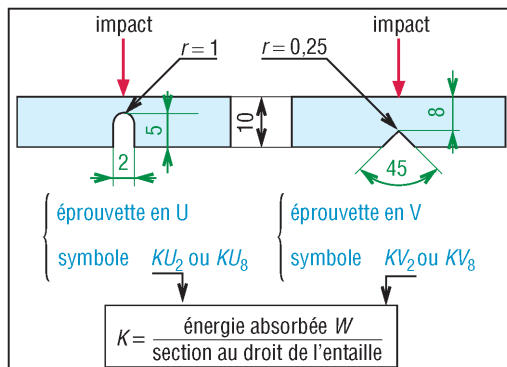
3. Phénomène d'écrouissage

Surtout employé en compression, il permet d'augmenter la limite élastique R_e sans modifier la résistance à la rupture R_r .

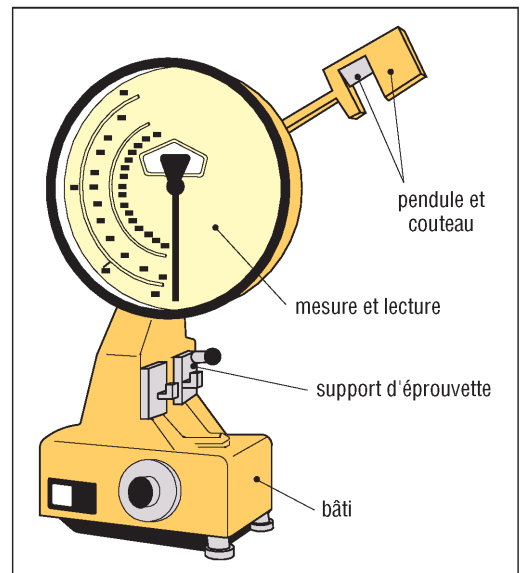
Dans un premier temps le matériau est déformé plastiquement (avant point de striction C : chemin OAB). Au relâchement le déchargement se fait suivant la droite BO' , parallèle à OA (voir fig. 5).

À la remise en charge la nouvelle courbe caractéristique du matériau est devenu $O'BC$ avec $R_{e,b}$ comme nouvelle limite élastique.

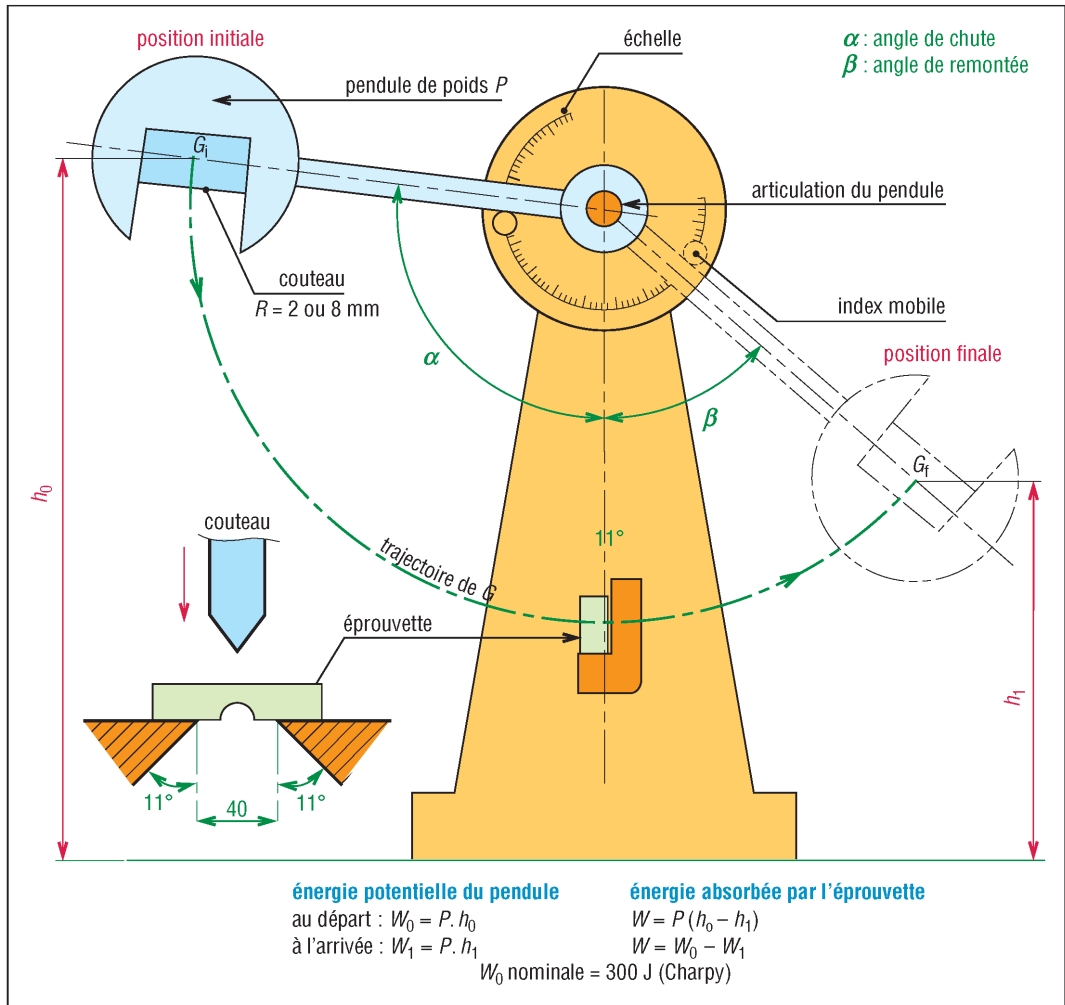
III - Essai de résilience NF EN ISO 148-1



8. Essai Charpy : forme des éprouvettes (55 × 10 × 10).



9. Machine d'essai de résilience.



10. Principe d'essai de résilience. Vitesse d'impact : $V = \sqrt{2gL(1 - \cos\alpha)}$.

La résilience, de symbole général K , caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre ; ce risque est amplifié aux basses températures.

Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (épreuve sur deux appuis) ou Izod (épreuve encastrée). Une jauge peut être collée sur le couteau (courbes : force-déplacement).

L'essai, qui est un essai comparatif entre matériaux, mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester.

L'énergie absorbée par l'épreuve (W) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le départ ($W_0 = P \cdot h_0$) et l'arrivée ($W_1 = P \cdot h_1$) :

$$W = P \cdot h_0 - P \cdot h_1 = P (h_0 - h_1)$$

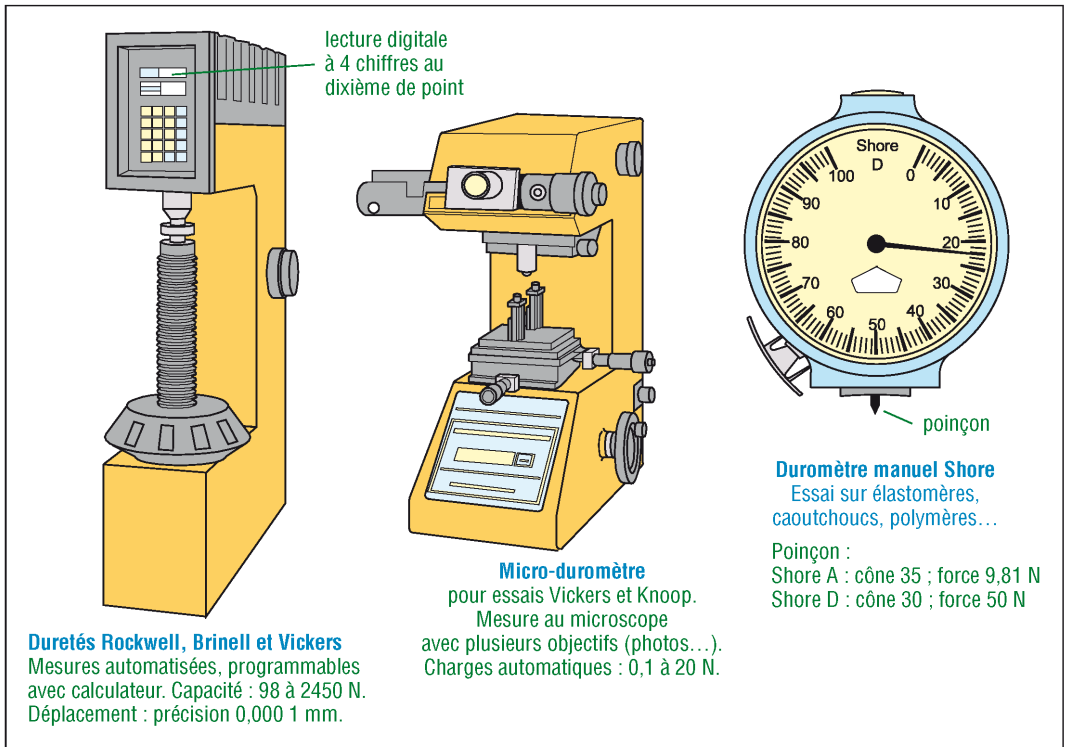
La résilience est égale au rapport de W sur l'aire de la section au droit de l'entaille (fig. 8).

KV_2 et KU_2 correspondent à un couteau de rayon 2 mm, KV_8 et KU_8 à $R = 8$.

Exemple : $KV_2 = 121$ (pour énergie nominale 300 J ; entaille V ; énergie absorbée 121 J).

IV - Essai de dureté

La dureté, de symbole général H , caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures...), à l'usure et à l'érosion. Elle peut être évaluée en mesurant une empreinte laissée en surface par un poinçon agissant sous l'action d'une force connue (essais Brinell, Vickers et Rockwell) mais aussi par une hauteur de rebondissement d'un objet très dur sur la surface à tester (essai Shore pour élastomères et plastiques). Aussi NF EN ISO 14577.

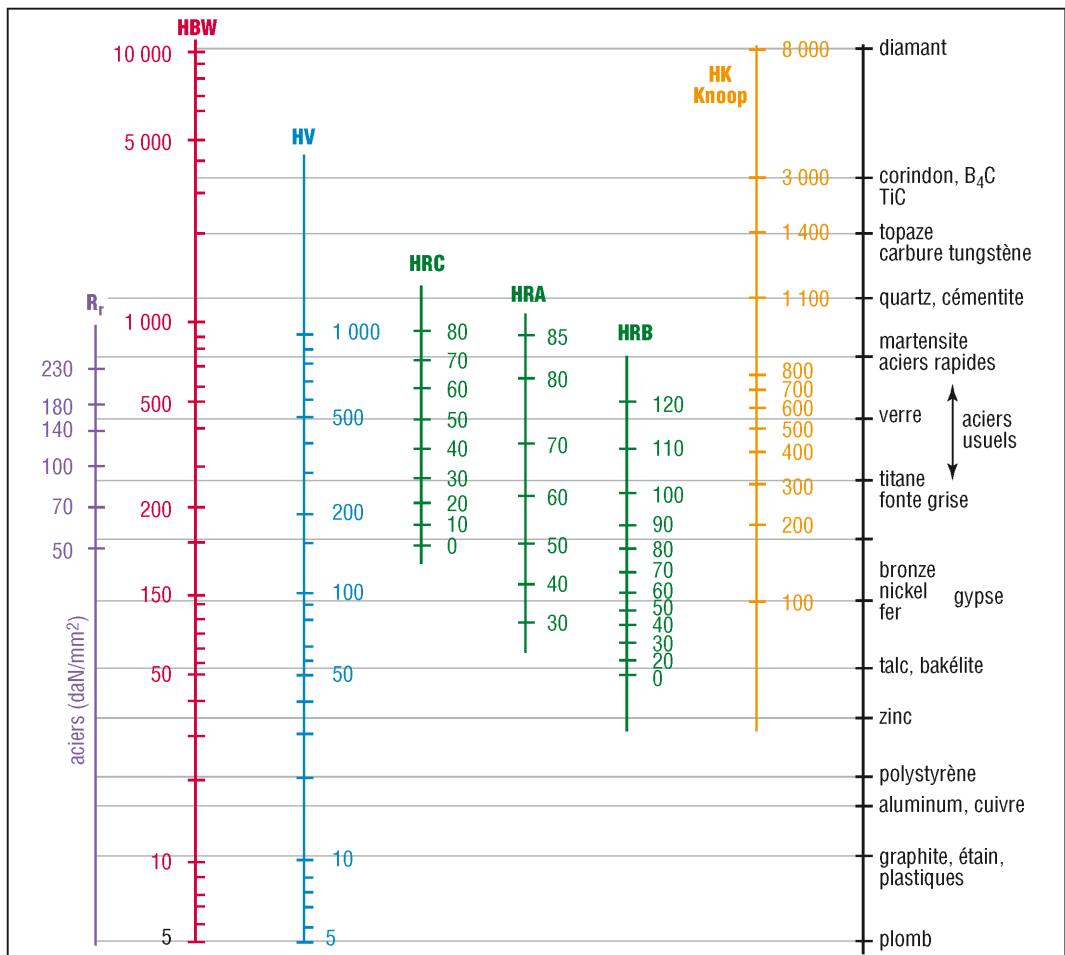


11. Exemples de machines d'essai de dureté.

| Principaux essais de dureté | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--------|-------|--------------|-------------|--------------|-------|-------|-------|-----|
| essai | symboles | principe et conduite de l'essai | | | | | | | | | |
| Brinell HB ISO 6506 | HBW | <p>bille $\varnothing d$ en carbure</p> <p>surface</p> <p>$a = \varnothing \text{moyen} = (a_1 + a_2)/2$</p> | | | | | | | | | |
| | | $HBW = \frac{0,102 \times F}{S}$ <p>avec</p> $S = \frac{\pi d}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$ <p>(F en N, a et d en mm) $0,981 \leq F \leq 2\,942 \text{ daN}$ $0,102 \approx 1/9,807$</p> | | | | | | | | | |
| Vickers HV ISO 6507 KNOOP ISO 4545 | HV 100 HV 50 HV 30 HV 20 HV 10 HV 5 ... HV 0,01 | <p>pyramide à base carrée</p> <p>136</p> <p>pour HV 100, F = 100 kg</p> <table border="1"> <tr> <td>HV</td> <td>HV 100</td> <td>HV 50</td> <td>etc.</td> </tr> <tr> <td>F (N)</td> <td>980,7</td> <td>490,3</td> <td>...</td> </tr> </table> | | HV | HV 100 | HV 50 | etc. | F (N) | 980,7 | 490,3 | ... |
| | | HV | HV 100 | HV 50 | etc. | | | | | | |
| F (N) | 980,7 | 490,3 | ... | | | | | | | | |
| | | $HV = 0,1891 \frac{F}{d^2}$ <p>avec</p> $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ <p>(F en N, d_1 et d_2 en mm) Variante : essai Knoop $d_1 = 7,1 d_2$; $HK = 1,451 F/d_1^2$; F en N ; d en mm.</p> | | | | | | | | | |
| Rockwell HR ISO 6508 | HRA HRC HRD HRBW HREW HRFW HRGW HRRW HRKW HRN HRTW | <p>cône ou bille</p> <p>120</p> <p>précharge (marquage) F_0 (100 N)</p> <p>mise en charge $F + F_0$</p> <p>relâchement F_0</p> <p>échelle de dureté (C, B, A...)</p> <p>billes : $d = 1,5875$ ou $3,175 \text{ mm}$</p> <p>$h = \text{enfoncement rémanent}$</p> <p>dureté HR = $100 - \frac{h}{0,002}$</p> | | | | | | | | | |
| | | <table border="1"> <tr> <td>A-C-D</td> <td>100 et 0,002</td> </tr> <tr> <td>B-E-F-G-H-K</td> <td>130 et 0,002</td> </tr> </table> <p>* HRN et HRTW prendre 100 et 0,001.</p> | | A-C-D | 100 et 0,002 | B-E-F-G-H-K | 130 et 0,002 | | | | |
| A-C-D | 100 et 0,002 | | | | | | | | | | |
| B-E-F-G-H-K | 130 et 0,002 | | | | | | | | | | |

12. Principes des essais de dureté Brinell, Vickers et Rockwell. * HRN et HRTW prendre 100 et 0,001.

| Duretés | Principe d'obtention | Désignation (exemple) |
|-------------------------------------|--|---|
| Brinell HBW NF EN ISO 6506 | Elle est obtenue par calcul. Après essai on mesure l'empreinte laissée par une bille en carbure de tungstène (diamètre : 1-2,5-5-10 mm) et la valeur de la charge F appliquée pour obtenir cette empreinte. Temps d'application 2 à 8 s, temps de maintien usuel 10 à 15 s. Utilisation : tous métaux. | 600 HBW 1/30/20 : dureté mesurée de 600 HBW ; avec une bille de 1 mm ; charge F de 30 kg (294,2 N) ; maintien 20 s (temps omis si $10 \text{ s} < t < 15 \text{ s}$). |
| Vickers HV NF EN ISO 6507 | Elle est obtenue par calcul après essai. On mesure l'empreinte laissée par une pyramide droite en diamant à base carrée d'angle au sommet 136° et la valeur de la charge F appliquée pour obtenir l'empreinte. Temps d'application 2 à 8 s, maintien 10 à 15 s. Utilisation : tous métaux. Variante : essai Knoop, symbole HK, microduretés, empreinte en forme de losange, matériaux durs pour petites pièces et fines sections. NF EN ISO 4545. | 640 HV 30/20 : dureté mesurée de 640 HV ; sous charge F de 30 kg (294,2 N) ; maintien de 20 s (temps omis si $10 \text{ s} < t < 15 \text{ s}$). |
| Rockwell HR NF EN ISO 6508 | La dureté, contrairement aux précédentes, est obtenue par lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un pénétrateur : billes acier (S) ou carbure (W), 1,59 et 3,18 mm ou cône diamant (échelles A-C-D-N). La précharge (F_0) permet de faire une empreinte initiale et par là d'éliminer les incertitudes propres aux défauts de surface. Utilisation : HRC (métaux ferreux) ; HRA et HRD (matériaux très durs : carbures, aciers trempés...) ; HRBW (non ferreux et métaux en feuilles) ; HREW, HRFW, HRGW (métaux doux) ; HR15N-30N-45N-15TW-30TW-45TW (plastiques). | 70 HR30T W : dureté mesurée de 70 dans l'échelle HR30T ; bille en métal dur W (S = acier, W = carbure dur). |
| | | 60 HRBW : dureté mesurée de 60 dans l'échelle HRB ; bille en carbure W . |
| | | 62 HRC : dureté mesurée de 62 dans l'échelle HRC ; cône diamant. |



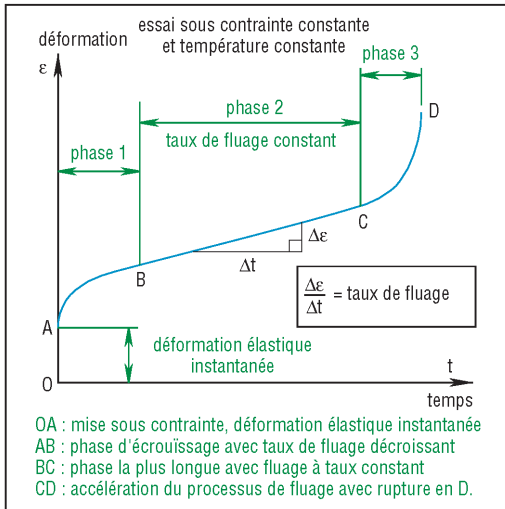
13. Comparaisons indicatives des échelles de dureté usuelles (voir tables de conversion NF EN ISO 18265).

V - Essai de fluage

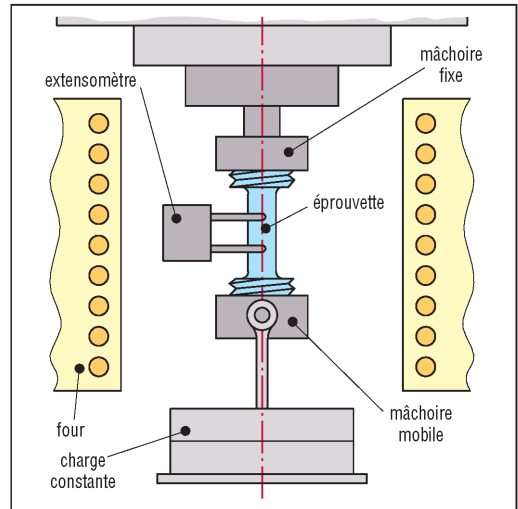
La déformation continue des objets, avec le temps, sous l'action d'efforts appliqués constants est appelée fluage. Le phénomène de fluage est observé dans les systèmes travaillant pendant de longues durées (10, 20 ans...) ou dans des machines travaillant sous températures élevées (chaudières, turbines, moteurs d'avion...). Voir NF EN ISO 899-1 et NF EN ISO 204.

L'essai de fluage est un essai de traction, à chaud ou non, de longue durée. La rupture se produit sous des contraintes constantes bien inférieures aux limites usuelles du matériau.

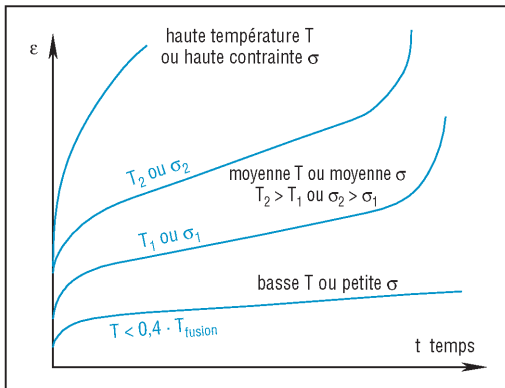
Certains matériaux (matières plastiques...) présentent du fluage à température ambiante. Pour les métaux le fluage est surtout sensible à des températures comprises entre 35 et 70 % de leur température de fusion. Le fluage a plus d'effet sur les céramiques que sur les métaux.



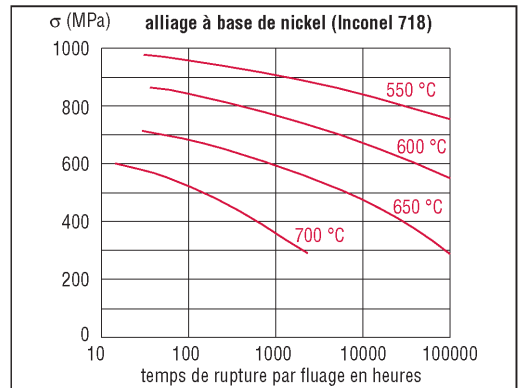
14. Courbe type de fluage et principales phases.



15. Essai type de fluage.



16. Principales formes de courbes obtenues en essai de fluage.



17. Courbes de rupture par fluage d'un alliage de nickel.

Forme des courbes obtenues en fluage :

$$\epsilon = B \cdot t \cdot \sigma^n \quad (B \text{ et } n \text{ constantes})$$

Le comportement à long terme (T_1, t_1) peut être simulé à court terme à plus haute température (T_2, t_2) avec la loi de Larson-Miller :

$$T_1 (C + \log t_1) = T_2 (C + \log t_2) = \dots$$

t = temps en heure ; C : constante égale à 20 ;
 T : température Kelvin ($t \text{ °C} + 273$)

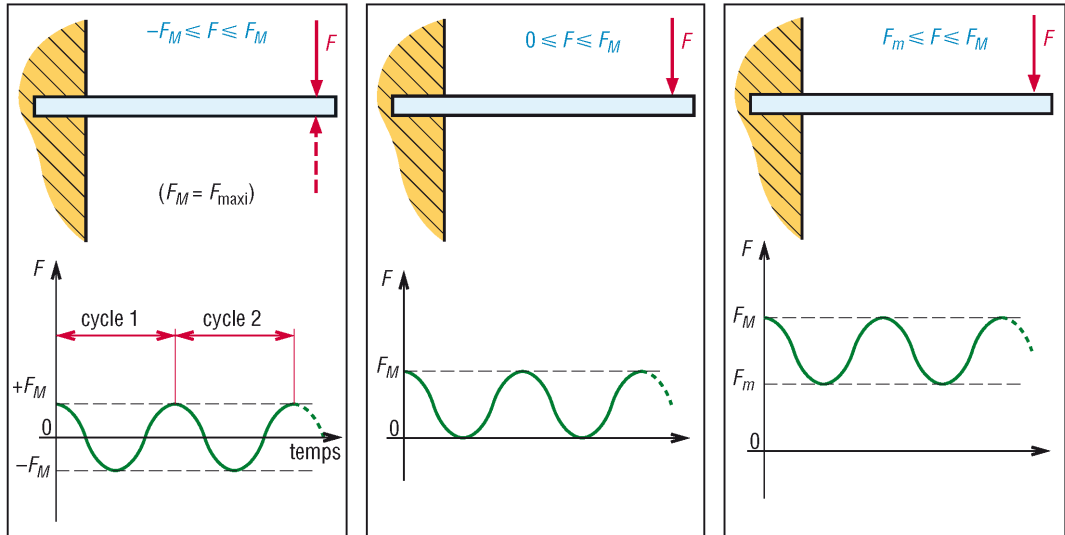
Exemple : 10 000 heures (420 jours) à 550 °C équivaut à 12 heures à 664 °C.

| Matériau | Température de fusion °C |
|-----------------------|--------------------------|
| aluminium et alliages | 660 |
| aciers au carbone | 1 400 |
| aciers inoxydables | 1 450 |
| bore | 2 300 |
| carbone | 3 367 |
| chrome | 1 650 |
| cobalt | 1 495 |
| fer | 1 538 |
| magnésium et alliages | 650 |
| nickel | 1 455 |
| titane | 1 670 |
| vanadium | 1 890 |

VI - Essai de fatigue ou d'endurance

1. Phénomène de fatigue

Il est de première importance sur les structures d'avions et dans de nombreux autres domaines (roulements, engrenages, arbres de transmission...). Une roue de voiture mal équilibrée est un exemple de système soumis à un phénomène de fatigue ; un effet de résonance peut l'amplifier. La rupture peut se produire, après un certain nombre de cycles ou allers et retours, sous des efforts bien inférieurs aux limites usuelles du matériau (R_T et R_e).



18. Charge alternée.

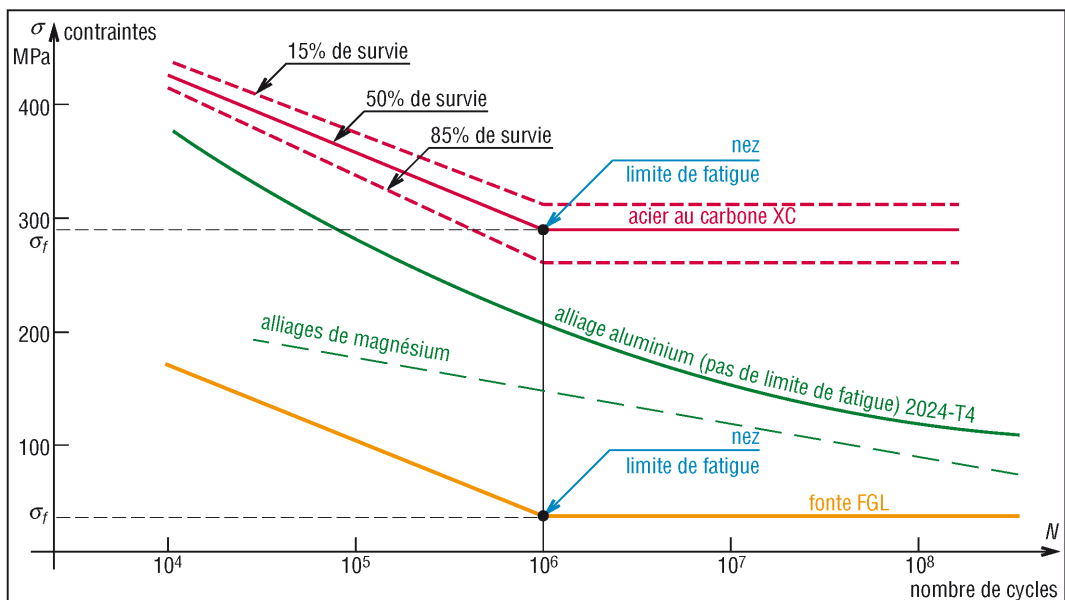
19. Alternée dans une seule direction.

20. Charge ondulée.

2. Essai de fatigue

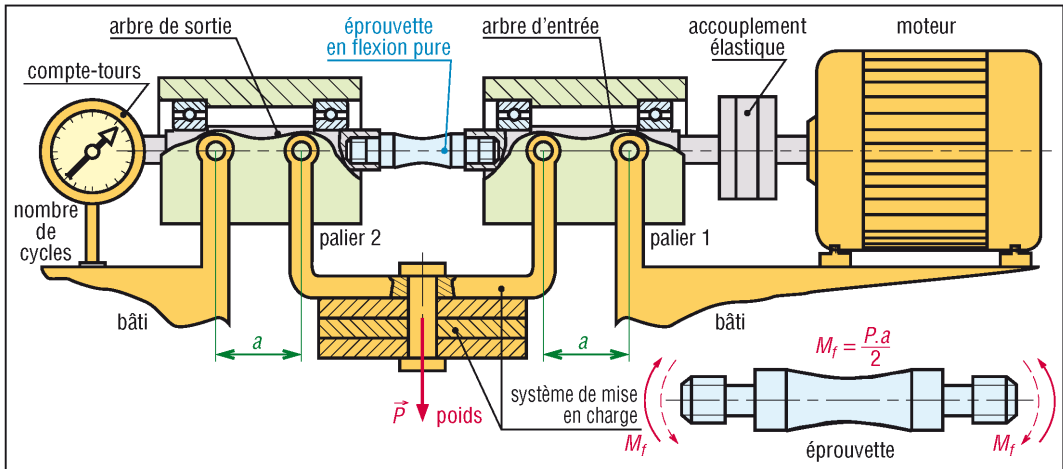
C'est un essai statistique dans la mesure où des éprouvettes identiques, sous les mêmes conditions d'essai, donnent des résultats différents. Il y a une répartition statistique des résultats autour d'une valeur moyenne ou médiane.

Cette valeur moyenne, une fois déterminée, est choisie comme représentative de la capacité du matériau (analogie avec la durée de vie des roulements).



21. Courbes d'endurance ou de Wolher. Les alliages ferreux et ceux au titane ont tous un nez de fatigue.

Il y a trois types d'essais de fatigue : traction compression, torsion alternée et flexion alternée « le plus classique », l'éprouvette est soumise à un couple de flexion pure alternée M_f .



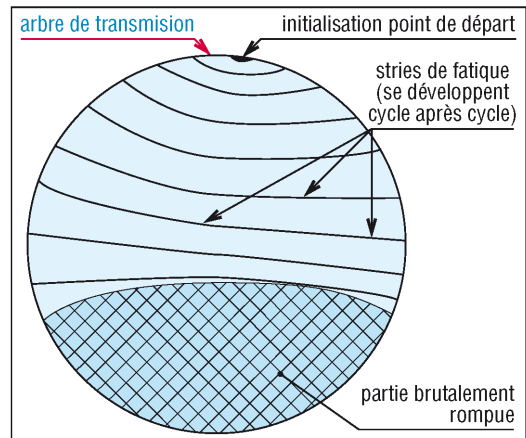
22. Essai de fatigue en flexion rotative (machine de Moore) ou flexion alternée.

3. Mode de rupture

Les fissures de fatigue démarrent à partir des imperfections en surface : rayures, empreintes, stries d'usure, arête de filetage, hétérogénéité due au traitement thermique, défauts du réseau cristallin...

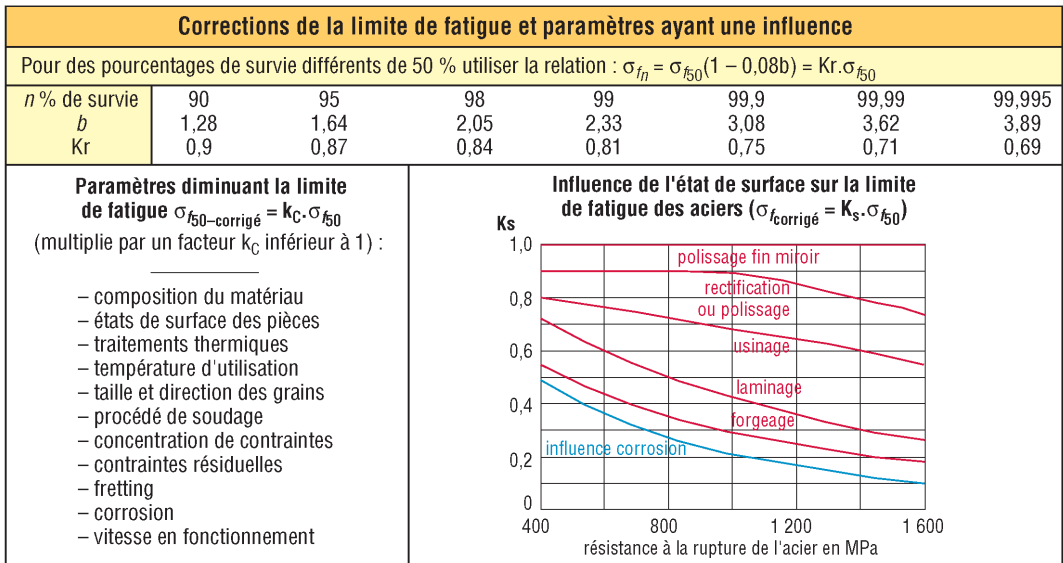
Après amorce, la fissure s'agrandit sous l'action des efforts alternés qui écartent et rapprochent continuellement les parties fissurées ; il y a un phénomène de concentration de contraintes en ces points.

La rupture définitive se produit brutalement lorsque les dimensions de la partie non encore fissurée ne sont plus suffisantes pour supporter les charges exercées.



23. Cassure typique de fatigue.

| Valeurs indicatives de σ_{f50} (limite de fatigue pour 50 % de survie) | | | |
|--|--------------|--|---|
| $\sigma_{f50} = k \cdot R_r$ (avec R_r : résistance à la rupture par traction du matériau) | | | |
| sollicitations | K | matériaux (1 MPa = 1 N/mm ²) | nombre de cycles |
| flexion | 0,5 | aciers en général ou $\sigma_{f50} = 700$ MPa | si $R_r \leq 1\,400$ MPa si $R_r > 1\,400$ MPa 10^6 |
| | 0,4 | aciers moulés et fontes moulées ou $\sigma_{f50} = 280$ MPa | si $R_r \leq 600$ MPa si $R_r > 600$ MPa 10^6 |
| | 0,45 à 0,65 | alliages de titane | 10^6 |
| | 0,3 à 0,5 | alliages de cuivre et alliages de nickel | 10^8 |
| | 0,45 | alliages d'aluminium (corroyés) ou $\sigma_{f50} = 130$ MPa | si $R_r \leq 330$ MPa si $R_r > 330$ MPa $5 \cdot 10^8$ |
| | 0,16 0,35 | alliages d'aluminium (produits de fonderie) alliages de magnésium | $5 \cdot 10^8$ 10^8 |
| torsion | 0,29 | aciers en général | 10^7 |
| | 0,32 | fontes FGL | 10^7 |
| | 0,22 | alliages de cuivre | 10^7 |
| traction alternée | 0,43 | aciers en général | 10^7 |



VII - Extensiométrie électrique - photoélasticité

Ces deux techniques classiques permettent l'étude expérimentale des contraintes et des déformations. Elles sont particulièrement intéressantes lorsque les formes des objets sont compliquées et que les charges sont difficiles à évaluer autrement (calculs...).

1. Méthodes photoélastiques

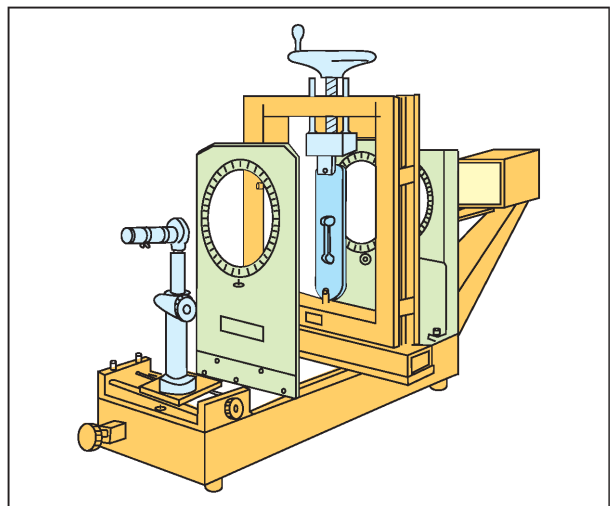
Ces méthodes expérimentales permettent de repérer, visualiser et étudier les zones les plus chargées des objets sous contraintes comme, par exemple, les directions principales des déformations. Les résultats sont particulièrement intéressants près des formes amenant des concentrations de contraintes (trous, encoches, épaulements...).

Une matière plastique transparente est utilisée pour modéliser l'objet réel. Un système optique spécial (polariscope), permet d'observer des motifs colorés, interpréter et visualiser les zones contraintes. Il est ainsi possible, par dessins et essais successifs, d'améliorer la définition des objets. Les pièces soumises à des vibrations ou des charges dynamiques peuvent être étudiées avec un système stroboscopique.

L'étude dans les trois dimensions est envisageable par tranches découpées dans des modèles 3D « figés ».



24. Motif obtenu par photoélasticité.



25. Exemple de polariscope par transmission.

3. Extensométrie électrique

Elle est basée sur l'emploi des jauges de contraintes. C'est la méthode expérimentale la plus usuelle pour vérifier les résultats théoriques (calculs de contraintes, de déformations...).

Les jauges sont collées sur la surface à étudier et mesurent les déformations en un point donné. La déformation subie est transformée en variation de résistance électrique mesurée par un pont d'extensométrie : c'est le principe du pont de Wheatstone. Les contraintes sont ensuite obtenues par calcul à partir des lois de la résistance des matériaux ou élasticité.

Jauges de contraintes : sous l'effet d'un allongement la section du brin (fil) de la jauge diminue, il en résulte une variation de la résistance électrique du fil. En mesure, R_1 est une jauge active collée sur la structure et R_2 une jauge identique collée sur une pièce de même matière. R_2 ne subit aucune contrainte et est à la même température que R_1 .

Dans certains capteurs (forces, pressions, couples, déplacements...) on utilise généralement quatre jauges judicieusement disposées.

Une jauge peut servir très longtemps, cependant il n'est pas possible de la décoller sans la détruire.

Elles sont souvent fabriquées de la même manière que les circuits imprimés et sont disponibles dans plusieurs formes et dans de nombreuses dimensions (0,1 mm à 10 cm et plus).

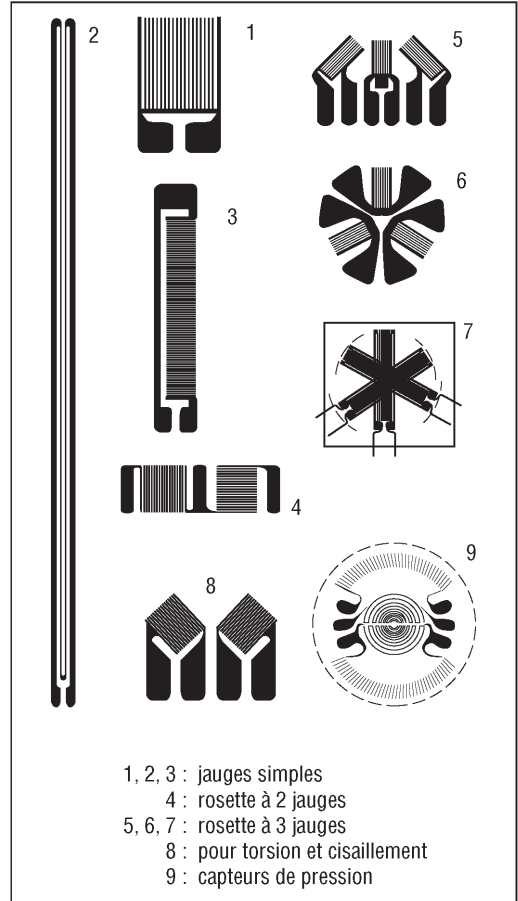
propriétés des jauges

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

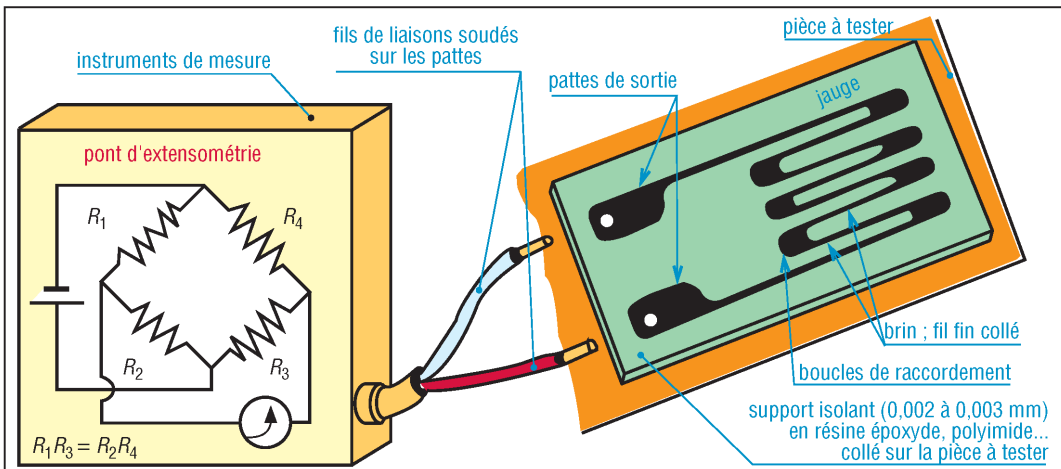
avec ΔR : variation de résistance
 ΔL : allongement du brin
 K : facteur de jauge

| | |
|-----------|------------|
| $K = 2$ | constantan |
| $K = 3,2$ | élinvar |
| $K = 0,5$ | manganin |

26. Propriétés des jauges.



27. Exemples de jauges.



28. Principes d'utilisation des jauges.

15

MÉTAUX FERREUX ASPECT MÉTALLURGIQUE

OBJECTIFS

- Indiquer les propriétés générales de l'alliage fer-carbone.
- Décrire le diagramme fer-carbone et les traitements thermiques dans la masse (trempe, revenu, recuit).
- Préciser l'influence des éléments d'addition.

Les aciers et les fontes sont les alliages du fer et du carbone avec éventuellement des éléments d'addition (aciers alliés). Ils sont peu coûteux (le fer, métal de base le moins cher, existe en grande quantité sur la planète) et sont facilement recyclable.

Traitements thermiques : vocabulaire : NF EN 10052.

I - Alliage fer-carbone

1. Fer

Le fer perd ses propriétés magnétiques au dessus de 768 °C, point de Curie, et existe sous plusieurs formes en fonction de la température (densité 7,88) :

Fer α (alpha) : il existe jusqu'à 912 °C. De structure cristalline à maille cubique centrée, il ne dissout pratiquement pas le carbone (0,022 % C à 727 °C, 0,008 % C à température ambiante). La solution fer α plus carbone dissous s'appelle la ferrite.

Fer γ (gamma) : il est stable entre 912 °C et 1 394 °C ; de maille cubique à faces centrées, il peut absorber, ou « dissoudre », beaucoup plus d'atomes de carbone que le fer α car les interstices sont plus nombreux entre les atomes. La proportion maximale est de 2,11 % à 1 148 °C. La solution fer γ plus carbone dissout s'appelle l'austénite.

Fer δ (delta) : il est stable entre 1 394 °C et 1 538 °C ; de maille cubique centrée, il a peu d'importance sur le plan industriel.

2. Carbone

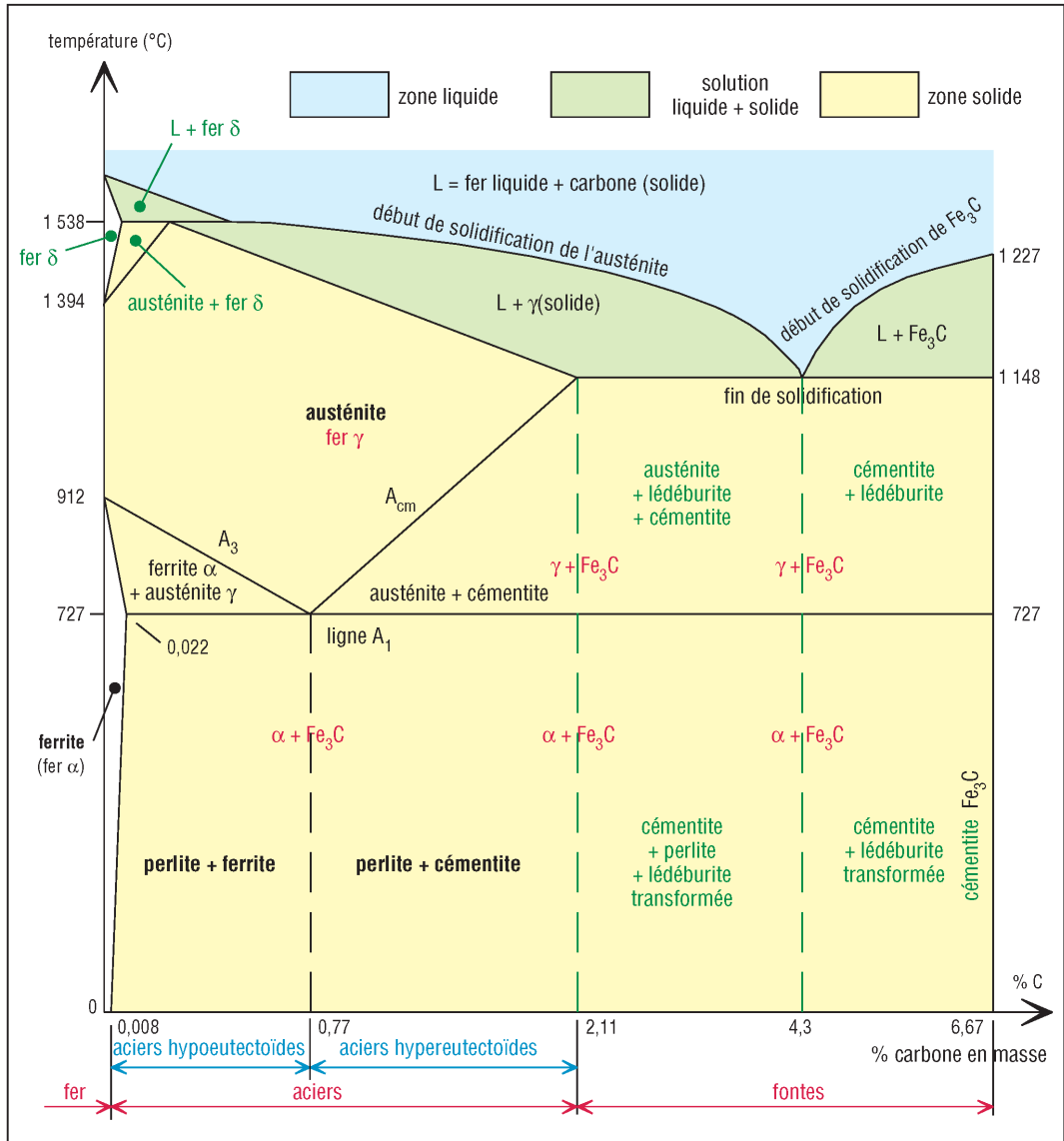
Il fond à 3 500 °C et cristallise sous trois formes possibles : le graphite, le diamant et le noir de fumée.

3. Alliage fer-carbone

Alliés avec le fer, les atomes de carbone remplissent plus ou moins les interstices, ou les vides, laissés entre les atomes de fer de chaque maille. Les caractéristiques de la structure de base sont modifiées, le fer devient acier ou fonte avec de meilleures propriétés.

Sous certaines conditions d'équilibre, le carbone peut s'amalamer, sans dissolution, au fer pour former du carbure Fe_3C ou cémentite qui contient 6,67 % C, pourcentage maximal d'absorption.

II - Diagramme fer-cémentite (Fe_3C)



1. Diagramme fer-carbone ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ ou fer-cémentite).

Ce diagramme est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques.

Il est limité à droite par la cémentite (6,67 % C, matériau fragile, cassant, très dur) et fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les aciers (entre 0,008 et 2,1 % C) et les fontes (de 2,1 % à 6,67 % C).

Ligne A_1 (727 °C) : elle marque la fin de la transformation de la perlite, mixture de fer contenant 0,77 % C, en austénite ; au-dessus de 727 °C la perlite n'existe plus.

Ligne A_3 : elle précise la fin de la transformation de la ferrite en austénite ; la ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

Ligne A_{cm} : elle indique la fin de la dissolution, après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.

Symboles A , r , et c : ils sont normalisés, aux normes internationales. Le symbole A est utilisé pour arrêt, r pour refroidissement et c pour chauffage.

Exemples : A_{r1} signifie passage de la ligne A_1 lors d'un refroidissement ; A_{c3} passage de A_3 lors d'un chauffage ; A_{ccm} passage de A_{cm} lors d'un chauffage...

III - Aciers au carbone

Lorsque les refroidissements sont suffisamment lents, l'austénite se transforme d'abord en ferrite qui, compte tenu des interstices plus petits de sa maille, ne peut pas absorber tous les atomes de carbone libérés. En conséquence, au fur et à mesure que la température diminue, une partie du carbone libéré se combine avec les atomes de fer pour produire de la cémentite. Cette cémentite s'agglomère avec la ferrite précédente pour donner la perlite. En fin de refroidissement on peut obtenir trois cas d'aciers.

1. Acier eutectoïde (0,77 % C)

Toute l'austénite initiale est précipitée en perlite : un seul constituant de base contenant 0,77 % C.

2. Aciers hypoeutectoïdes (0,008 à 0,77 % C)

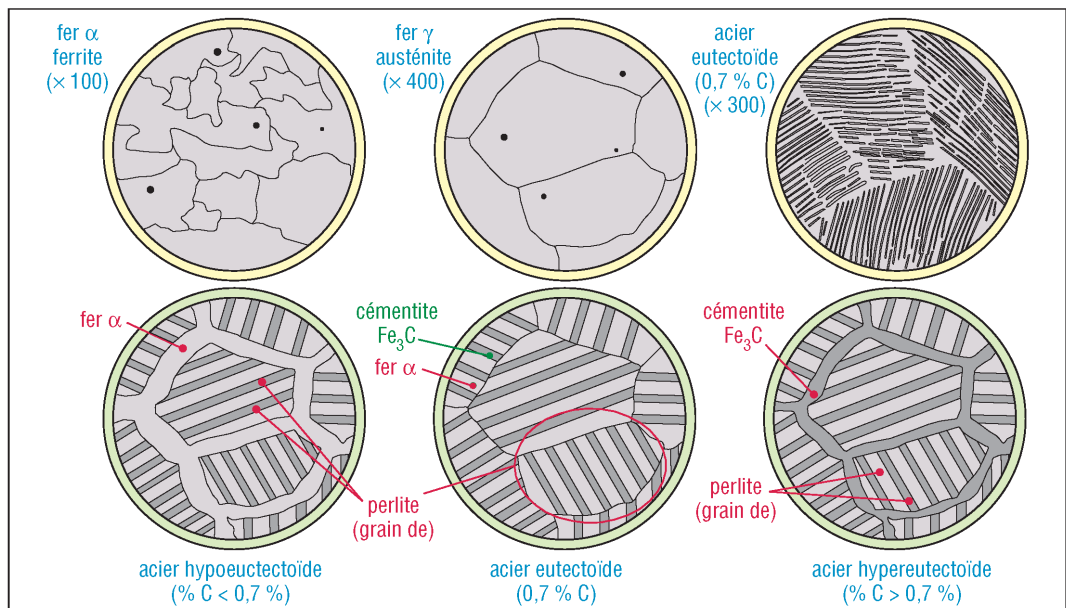
Ce sont les plus utilisés industriellement ; ils ont deux constituants de base, la perlite et la ferrite. Au refroidissement l'austénite se transforme d'abord en perlite, mais comme il n'y a pas assez d'atomes de carbone pour n'obtenir que de la perlite, il reste toujours une certaine quantité de ferrite dont la proportion est fonction du pourcentage de carbone initial.

Exemples : un acier à 0,4 % C contient 45 % de perlite et 55 % de ferrite ; un acier à 0,6 % C contient 79 % de perlite et 21 % de ferrite...

3. Aciers hypereutectoïdes (entre 0,77 et 2,11 % C)

Ils ont deux constituants de base, la perlite et la cémentite. Tout le carbone initial ne pouvant être dissous et consommé par la perlite, les atomes restants s'amalgament avec le fer pour former de la cémentite, dans des proportions qui sont fonction du pourcentage de carbone initial.

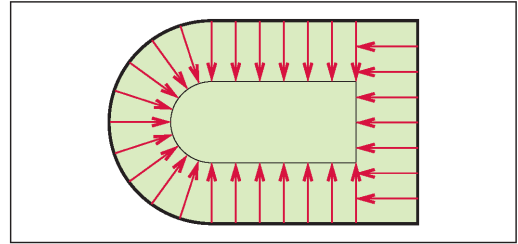
Exemples : un acier à 1,2 % C contient 6 % de cémentite et 94 % de perlite ; un acier à 1,4 % C contient 9,5 % de cémentite et 90,5 % de perlite...



2. Microstructures des aciers en fonction du pourcentage de carbone (grossissement $\times 400$).

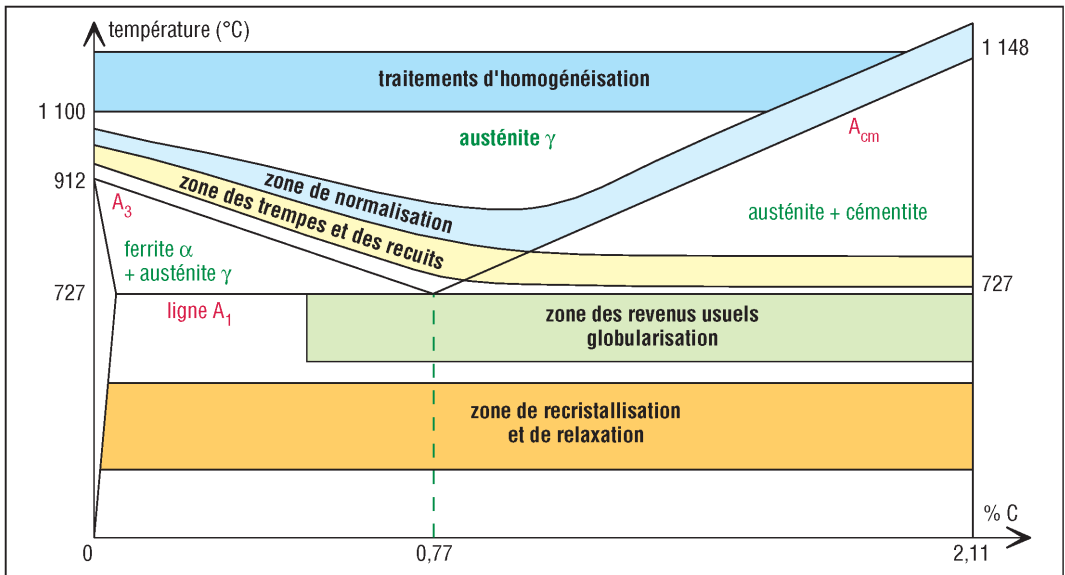
IV – Traitements thermiques dans la masse

La structure et les propriétés mécaniques (R_r , R_e , H, A%, K) des aciers peuvent être modifiées par un chauffage suivi d'un refroidissement à durée contrôlée. Ce sont les traitements thermiques dans la masse : trempes, revenus et recuits. Les transformations sont effectuées près des lignes A_1 , A_3 et A_{cm} du diagramme fer carbone.



3. Dans le cas des traitements thermiques dans la masse (trempe, revenu, recuit...), le traitement évolue de la surface jusqu'au cœur de la pièce.

Indications normalisées : NF ISO 15787.



4. Traitements thermiques des aciers et diagramme fer carbone ou fer cémentite ($Fe - Fe_3C$).

1. Trempe, ou durcissement par trempe

a) Principe

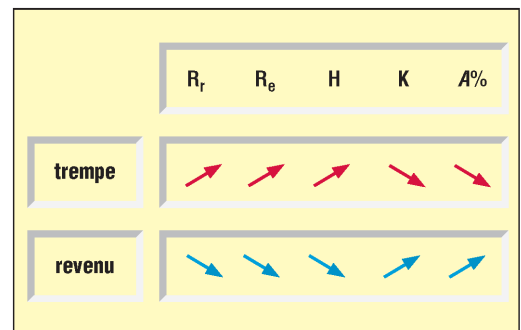
Lorsque la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide les atomes de carbone n'ont plus le temps de diffuser et les transformations décrites dans les paragraphes précédents n'ont plus le temps de se réaliser.

L'austénite n'a plus le temps de perdre son carbone et ne peut se transformer ni en ferrite ni en perlite. La solution de fer obtenue, sursaturée en carbone, est appelée martensite ; elle est très dure, $HB = 750$, et très fragile). C'est le constituant de base des aciers trempés.

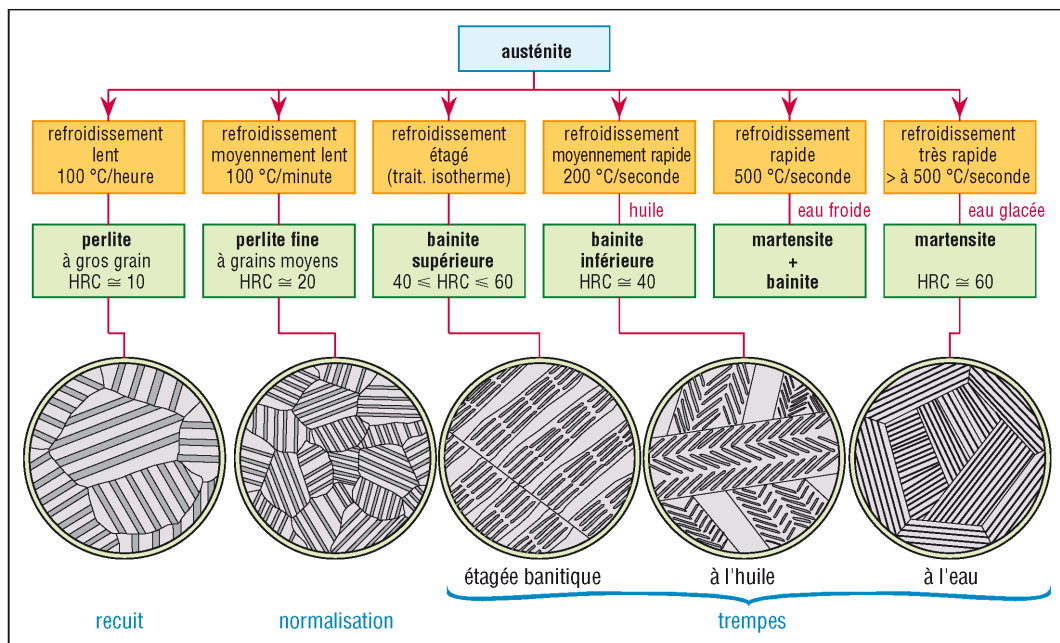
Procédé : on chauffe la pièce jusqu'à température d'austénisation suivi d'un maintien en température afin d'homogénéiser la structure, puis on refroidit rapidement (eau, huile...).

La transformation de toute l'austénite en martensite n'est possible que si la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide. Dans le cas contraire il y a formation d'autres constituants plus tendres : bainite, perlite...

Propriétés : elle augmente R_r , R_e et H mais diminue K et A%. Elle amène aussi l'apparition de tensions internes génératrices de criques et de déformations.



5. Évolution des caractéristiques après trempe ou revenu.



6. Constituants des aciers suivant la vitesse de refroidissement : cas de l'acier eutectoïde à 0,77 % de carbone.

Hypertrempe : elle se produit chaque fois que la température de trempe est trop élevée. La conséquence est la persistance, après refroidissement, d'une grande quantité d'austénite résiduelle adoucissant l'acier.

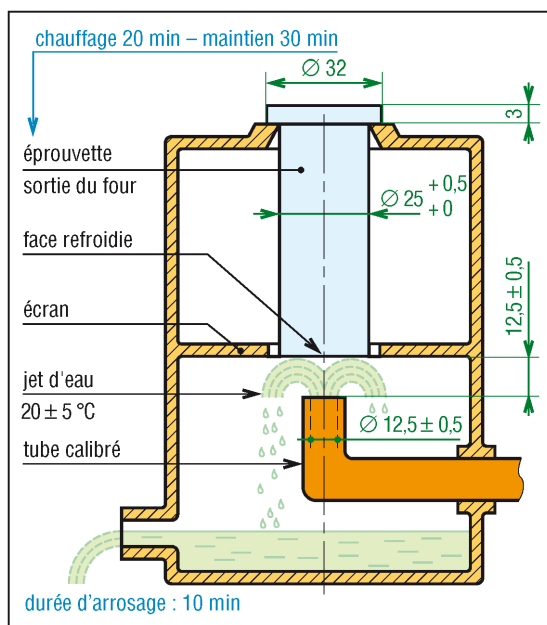
b) Trempes étagées

Si une trempe classique, refroidissement en une seule opération, est trop brutale (risques de déformations et de fissurations des pièces) on pratique une trempe étagée avec refroidissement en plusieurs étapes. Les trempes étagées martensitique et bainitique sont les plus utilisées.

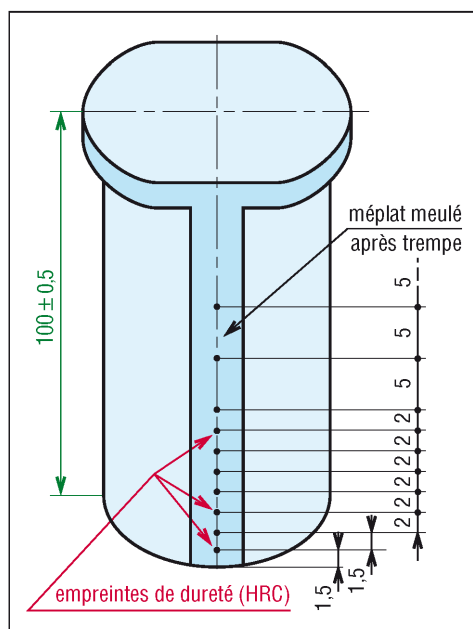
c) Recommandations pour la conception des pièces trempées

Éviter les arêtes vives, les brusques variations d'épaisseurs ou de sections (à l'origine de contraintes résiduelles, criques, fissures...). Ne pas perdre de vue que la transformation de l'austénite en martensite s'accompagne d'un accroissement de volume de 4 %.

d) Trempabilité



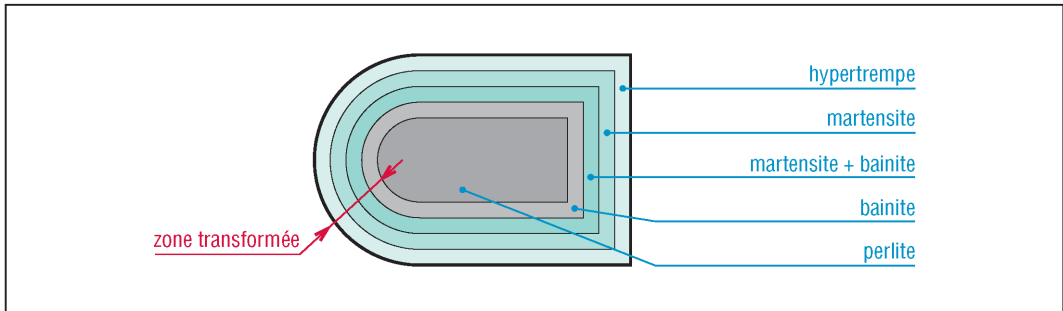
7. Essai Jominy de trempabilité. NF EN ISO 642.



8. Éprouvette Jominy avec préparation et mesures, après trempe.

Elle est mesurée par l'essai normalisé Jominy. Voir aussi NF EN ISO 642.

Lorsque les pièces sont massives elles sont difficiles à refroidir rapidement dans leur totalité. L'intérieur de la pièce, refroidi en dernier, plus lentement, est le plus difficile à tremper. Un acier a une bonne trempabilité s'il permet la trempe, même à cœur, des pièces massives.



9. Nature des constituants d'une pièce massive dans le cas d'une pénétration de trempe difficile.

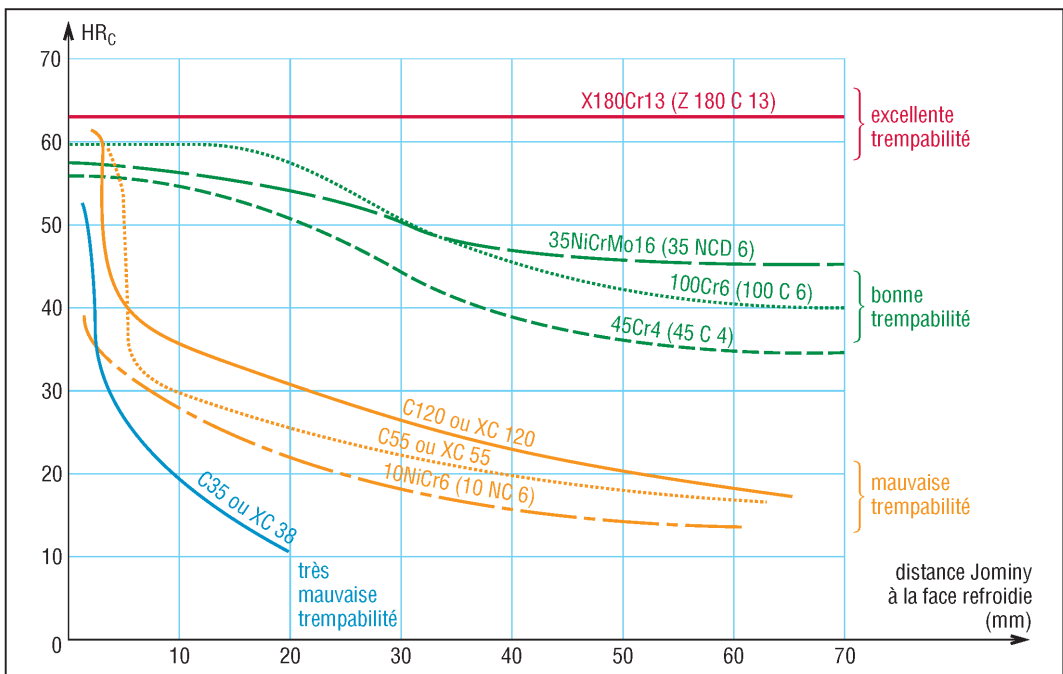
Cas des aciers au carbone non alliés, de type C ou XC : leur trempabilité varie du médiocre au mauvais si le pourcentage de carbone (% C) diminue. Entre 0,4 et 0,7 % C la pénétration de la trempe se limite à une profondeur de 20 mm environ. Ceux au-dessous de 0,35 % C ne sont pas considérés comme trempables.

Les pourcentages les plus favorables, de 0,35 à 0,7 % C, permettent une certaine dureté tout en conservant une ductilité et une résilience acceptables. Au-dessus de 0,7 % C les aciers, assez délicats à mettre en œuvre, sont moins utilisés. Les refroidissements rapides créent des contraintes internes très élevées, causes de criques, fissurations et déformations.

Les aciers XC sont plutôt utilisés pour des pièces « petites », de faibles volumes, ou minces.

Cas des aciers alliés : leur trempabilité est nettement supérieure aux précédents. Les éléments d'addition permettent, à résultat égal, de diminuer notablement les vitesses de refroidissement (vitesses critiques de trempe). Cette propriété favorise la pénétration de la trempe en profondeur. De plus, après un revenu, ces aciers peuvent avoir une bonne résilience, ce qui est impossible avec les aciers au carbone (de type C ou XC...).

Les éléments d'addition qui augmentent le plus la trempabilité sont : le bore, le manganèse, le molybdène, le chrome, le silicium, et le nickel.



10. Courbes de trempabilité de quelques aciers.

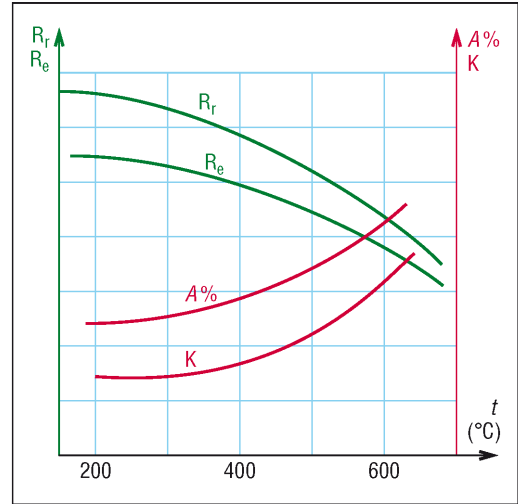
2. Revenu

a) Principe

Après trempe, la martensite, très dure et très fragile, est pratiquement inutilisable en l'état. Afin de corriger l'effet de fragilisation, tout en conservant un bon ensemble de caractéristiques (R_r , R_e , H), on pratique un revenu.

Procédé : il s'applique aux pièces trempées et consiste en un chauffage, à température inférieure à 700 °C, suivi d'un maintien en température pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement lent et contrôlé. Le traitement permet d'amener les caractéristiques mécaniques au niveau souhaité.

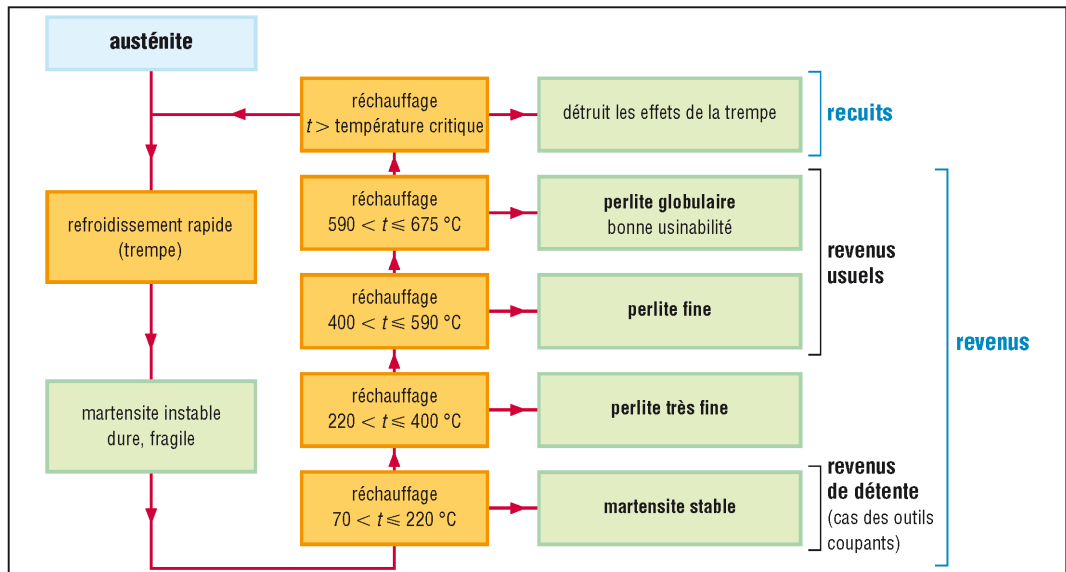
Propriétés : augmentation de K et de A% ; atténuation des contraintes internes. Inconvénients : diminution de H, de R_r et R_e . Les résultats dépendent essentiellement de la température de réchauffage.



11. Évolution typique des caractéristiques mécaniques en fonction de la température de revenu.

b) Principaux revenus

Un réchauffage jusqu'à 220 °C élimine les contraintes internes et est pratiquement sans effet sur la dureté. Un accroissement de la température amènera un adoucissement de plus en plus grand du métal, une dureté plus basse et une plus grande ductilité. Les températures de revenu les plus usuelles sont comprises entre 500 et 675 °C.



12. Structure schématique des aciers après trempe et revenu.

3. Recuit

a) Principe

Son effet est inverse de celui de la trempe. Le métal est amené au maximum de ses caractéristiques de ductilité : $A\%$ et K maximales, R_r et H minimales. La structure obtenue, perlite et ferrite, présente une meilleure usinabilité.

Procédé : Le procédé consiste en un chauffage au-dessus de la température d'austénisation suivi d'un maintien en température pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement lent.

b) Différents recuits

- Recuit d'homogénéisation : il détruit l'hétérogénéité chimique des aciers bruts de coulée.
- Recuit de régénération : il affine et uniformise le grain du métal.
- Recuit de détente : il fait disparaître les contraintes internes après moulage ou soudage.
- Recuit de recristallisation : pour les aciers forgés ou écrous.
- Recuit complet : il facilite l'usinage et la déformation à froid (en faisant disparaître les constituants les plus durs).

Sur le plan industriel une même opération de recuit peut englober les caractéristiques des cinq cas précédents.

V - Influence des éléments d'addition

Ajoutés en quantité suffisante, ils augmentent plus ou moins fortement la trempabilité et ont également une influence sur les caractéristiques mécaniques : (R_r , H, A%, K), la résistance à la corrosion, la soudabilité, la coulabilité, la forgeabilité, l'usinabilité, le magnétisme... La solubilité, pourcentage de dissolution admissible, dépend de la structure du fer.

| Influence des principaux éléments d'addition sur les caractéristiques des aciers | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------------|---------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|--------------|-------------|------------|---|-----------------------------|-----------------------------|
| élément | symbole chimique | trempabilité | durcissement à la ferrite | revenu ou détente | R_r et dureté | (ductibilité) A % | (résilience) K | soudabilité | forgeabilité | usinabilité | magnétisme | résistance à la corrosion et à la chaleur | solubilité | |
| | | | | | | | | | | | | | dans le fer α (en %) | dans le fer γ (en %) |
| chrome | Cr | ++ | + | - | ++ | - | + | - | - | + | ++ | ∞ | 12,8 20 si 0,5 C | |
| cobalt | Co | - | +++ | | + | | + | | | + | ++ | 75 | ∞ | |
| manganèse | Mn | +++ | ++ | | ++ | + | + | + | + | | | 3 | ∞ | |
| molybdène | Mo | +++ | + | - | ++ | + | + | + | + | | + | 3,5 | 3 ± 8 avec 0,3 C | |
| nickel | Ni | ++ | + | | + | + | + | | + | - | - | 10 | ∞ | |
| phosphore | P | + | ++ | | + | - | | | | + | | 2,8 | 0,5 | |
| silicium | Si | ++ | + | | + | - | | - | | - | - | 18,5 | 2 ± 9 avec 0,35 C | |
| titane | Ti | ++ | | | + | + | + | | + | | + | 6 | 0,75 1 avec $\pm 0,2$ C | |
| tungstène | W | +++ | | - | + | + | + | | | | ++ | 33 | 6 11 si 0,25 C | |
| vanadium | V | +++ | + | -- | + | + | + | + | + | | | ∞ | 1 4 si 0,2 C | |

+++ : très favorable ++ : assez favorable + : favorable - : négative -- : très négative

Symboles métallurgiques pages 137.

Aluminium : désoxydant, il diminue le grain et augmente légèrement la trempabilité. Il est l'élément d'addition des aciers de nitruration.
Bore : améliore la trempabilité des aciers à pourcentage de carbone faible et moyen.
Chrome : élément qui augmente le plus la résistance à la corrosion et à l'oxydation.
Cobalt : permet une grande dureté à chaud par durcissement de la ferrite.
Manganèse : neutralise la fragilité engendrée par les sulfures et augmente fortement la trempabilité.
Molybdène : augmente fortement la trempabilité, favorise un grain plus fin, neutralise en partie la fragilité due à la trempe, augmente la résistance et la dureté à chaud, la résistance à l'abrasion, la résistance à la corrosion des aciers inoxydables.

Nickel : renforce la résistance des aciers non trempés ou recuits, rend plus résilients les aciers ferritiques-perlitiques, surtout aux basses températures, rend austénitiques les aciers ayant un pourcentage de chrome élevé.
Phosphore : renforce la résistance des aciers à bas pourcentage de carbone.
Plomb (0,15 à 0,35 %) : améliore l'usinabilité.
Silicium : utilisé comme désoxydant, c'est l'élément d'alliage des aciers à vocation électrique (diminution du magnétisme). Il améliore la résistance des aciers faiblement alliés et la trempabilité des aciers sans trace de graphite.
Soufre : considéré en général comme une impureté (formation de sulfure de fer entraînant des ruptures).
Tungstène : entraîne la formation de particules très dures et très résistantes à l'abrasion (aciers à outil) et améliore la dureté et la résistance à température élevée.
Vanadium : favorise un grain plus fin, augmente la trempabilité, s'oppose fortement à la détente pendant le revenu.

16

ACIERS ET FONTES

OBJECTIFS

- Indiquer et décrire les principales familles d'aciers et de fontes.
- Retenir les désignations et les principales nuances normalisées (AFNOR).

Les aciers sont des matériaux contenant en masse plus de fer que tout autre élément et dont la teneur en carbone est inférieure à 2 % (ou 2,1 %), limite courante les séparant des fontes. La normalisation (NF EN 10020) retient trois familles principales d'aciers : les aciers non alliés (aucun élément d'alliage ne dépasse 0,6 % ; sauf 1,65 % pour Mn), les aciers inoxydables (10,5 % de chrome minimum et 1,2 % de carbone maxi) et les autres aciers alliés.

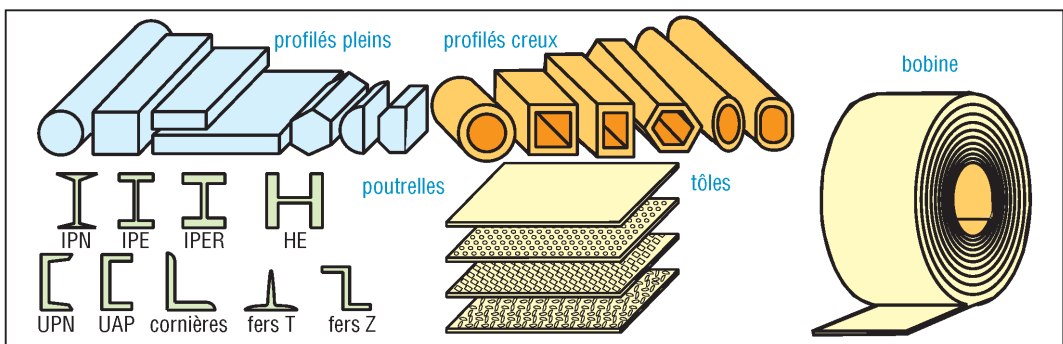
De prix compétitif, mieux adaptées au moulage que les aciers, du fait d'une plus grande fluidité à chaud et de températures de fusion inférieures ($\approx 1200^\circ\text{C}$ contre 1500°C), les fontes sont régulièrement utilisées. L'ordre des paragraphes prend en compte la désignation des matériaux. Voir aussi données environnementales pages 596 et 597.

I - Aciers non alliés (« Aciers au carbone »)

1. Aciers non alliés d'usage général (S, E, etc.)

Caractérisés par une faible teneur en carbone, ce sont les plus utilisés. Ils existent dans des qualités diverses (JR, JO, J2, K2...) et des variantes réservées à des usages particuliers (moulage, soudage...). Propriétés spécifiées : ténacité, formabilité, grosseur de grain...

La plupart sont disponibles sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, tôles...) aux dimensions normalisées. Certains sont proposés en semi-fini : prélaqués, galvanisés, nervurés, ondulés, etc. Normes : NF EN 10027 ; A02-005-3, etc.



1. Laminés marchands.

Applications (construction soudée, formage à froid ou à chaud, emboutissage, étirage, laminage, pliage...) : carrosseries, fers et profilés pour le bâtiment, construction navale, plate-forme pétrolière, trains, chaudronnerie, ameublement, électroménager, biens de consommation...

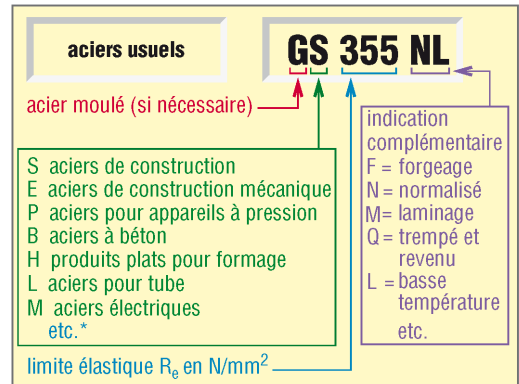
a) Désignation normalisée

Lettre (S, E, etc.) suivie de la limite élastique à la traction R_e en MPa ou N/mm^2 . S'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre G. Exemples : GE335, GS235.

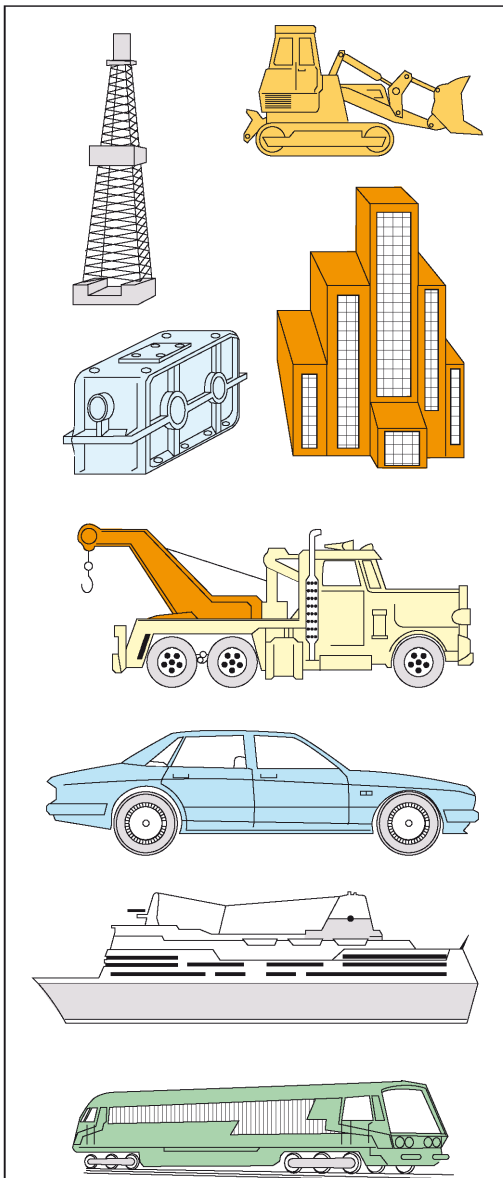
b) Principales nuances normalisées

Remarques : les valeurs de R_r , R_e , $A\%$ et KV indiquées varient d'une qualité à l'autre, dépendent des procédés de fabrication, des traitements, des épaisseurs d'un produit à l'autre.

* Autres familles (fig. 2) : D formage à froid ; Y pour béton précontraint ; R pour rail ; T fers.



2. Désignations des aciers au carbone (NF EN 10027-1).



3. Exemple d'objets utilisant des aciers au carbone.

Principaux aciers non alliés (1 Mpa = 1 N/mm²)

| nuances normalisées | R_r ou R_m MPa | R_e MPa | $A\%$ | KV (J) mini |
|--|---|-----------|---------|-------------|
| aciers de construction* | | | | |
| S185 (A33) | 290 à 540 | 175 à 185 | 8 à 18 | |
| S235 (E24) | 320 à 510 | 175 à 235 | 15 à 26 | 23 à 27 |
| S275 (E28) | 380 à 580 | 205 à 275 | 12 à 22 | 23 à 27 |
| S355 (E36) | 450 à 680 | 275 à 355 | 12 à 22 | 23 à 40 |
| S420 | 520 à 680 | 390 à 420 | 17 à 19 | 27 à 40 |
| S460 | 540 à 720 | 430 à 460 | 17 à 19 | 27 à 40 |
| aciers de construction mécanique | | | | |
| E295 (A50) | 440 à 660 | 225 à 295 | 10 à 20 | 27 à 39 |
| E335 (A60) | 540 à 770 | 255 à 335 | 6 à 16 | 27 à 39 |
| E360 (A70) | 640 à 900 | 285 à 360 | 3 à 11 | 27 à 39 |
| E420 | 540 à 900 | 380 à 420 | 3 à 10 | 27 à 39 |
| pour cémentation | | | | |
| C22 (XC18) | 470 à 650 | 290 à 340 | 20 à 22 | 50 |
| pour trempé + revenu et pour forgeage (caractéristiques après trempé) | | | | |
| C35 (XC38) | 550 à 780 | 320 à 430 | 17 à 19 | 35 |
| C40 (XC42) | 600 à 800 | 350 à 460 | 16 à 18 | 30 |
| C45 (XC48) | 630 à 850 | 370 à 490 | 14 à 16 | 25 |
| C50 (XC50) | 650 à 900 | 400 à 520 | 13 à 15 | - |
| C55 (XC55) | 700 à 950 | 420 à 550 | 12 à 14 | - |
| C60 (XC60) | 750 à 990 | 450 à 580 | 11 à 13 | - |
| pour trempé superficielle | | | | |
| C40 (XC42TS) | dureté de la couche trempée $\approx 55 HR_c$ | | | |

(Entre parenthèses : ancienne désignation).

* Constructions soudées...

2. Aciers spéciaux, non alliés, de type C

Destinés aux traitements thermiques (trempe, cémentation) des pièces petites ou moyennes, ils sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition, une plus grande pureté et des éléments d'addition en très faible quantité ($Mn < 1\%$; $Cr + Ni + Mo < 0,63\%$).

a) Désignation (fonction de la composition chimique)

Lettre C suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100 plus au besoin des indications complémentaires : E et R = teneur en soufre, C = formage à froid, S = ressort, D = Tréfilage...

Exemple : GC35E (0,35 % de carbone, G = acier moulé, E = teneur maxi en soufre).

b) Principales nuances normalisées (NF EN 10083-2)

Les caractéristiques mécaniques varient selon les traitements et les dimensions (voir tableau p. 162).

Aciers à faible teneur en carbone (< 0,3 %) : ils sont réservés à la cémentation et aux traitements de surface (catégorie des aciers "doux").

Aciers à teneur moyenne en carbone (0,3 à 0,5 %) : ils sont utilisés pour les trempes et les revenus, dans le cas d'applications exigeant une plus grande résistance et une certaine tenue à l'usure (catégorie des aciers "mi-dur").

Applications : pièces moulées et forgées, arbres, axes, engrenages, visserie...

Aciers à haute teneur en carbone (> 0,5 %) : ils sont employés pour des applications exigeant : grandes duretés, hautes résistances, tenue à l'usure. Ils ont tendance au gauchissement et aux déformations après trempe. Ils perdent leurs propriétés aux hautes températures. Ne durcissant pas en profondeur ils sont surtout utilisés pour des pièces « petites » en volume, ou minces. **Exemples de nuances** : C55 (XC55) ; C60 ; C65 ; C70 ; C80 (XC80).

Applications : pièces forgées, ressorts, lames, rasoirs, forets, matrices...

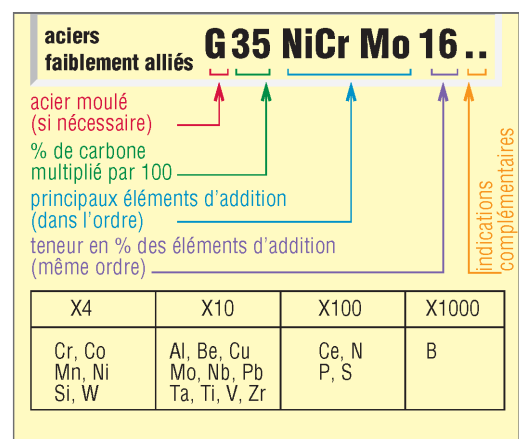
II - Aciers faiblement alliés, pour haute résistance

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5 % en masse ($Mn \geq 1\%$). Ils sont choisis chaque fois qu'une haute résistance est exigée. Ils sont utilisés en l'état ou avec traitement.

1. Désignation normalisée

Elle est fonction de la composition : pourcentage de carbone multiplié par 100, suivi des symboles chimiques des principaux éléments d'addition classés en ordre décroissant. Puis, dans le même ordre, les pourcentages de ces mêmes éléments multipliés par 4, 10, 100 ou 1000 (voir détails figure 4), plus au besoin des indications complémentaires.

Exemple : G35NiCrMo16 (0,35 % de carbone ; 4 % de nickel et des traces < 1% de chrome et de molybdène, G = acier moulé).



4. Désignation des aciers faiblement alliés (NF EN 10027-1).

2. Aciers de cémentation (% C < 0,2 %)

En plus de la cémentation, ils peuvent recevoir une trempe dans la masse : trempabilité fonction de la composition (Voir cémentation, chapitre 19 : traitements de surface).

Classement, par résistances « sous-couche » croissantes : 10NiCr6, (20NiCrMo2- 13NiCr14), (20NiCrMo7-20NiCrMo2), (16NiCrMo13-25MnCr5-20NiCr6). 10NiCr6 est un acier doux comparable à la nuance C22 mais en plus résilient. Voir les nuances NF EN 10084.

3. Aciers pour trempe dans la masse

Ils permettent la trempe en profondeur des pièces massives, et sont beaucoup plus performants que les aciers C.

Classement par résistances croissantes possibles : 28Mn6, (20MnCr5-38Cr2-46Cr2-20NiCr6-20CrMo4), (41Cr4-30NiCr11-34CrMo4-41CrAlMo7)-(55Si7-45SiCrMo6), (42CrMo4-51CrV4-50CrMo4), (34CrNiMo6-31CrMo12-30CrNiMo8-36NiCrMo16).

Remarques : 20Mn5 est un acier mi-doux semblable au C25 en plus trempant. L'acier pour roulements 100Cr6 existe dans les variantes 100CrMn6, 100CrMo7.2, 100CrMnMo8, etc.

| Principaux aciers faiblement alliés – NF EN 10083-2... | | | | | | | | | | |
|--|--------------|-------------------------|---|--|---------|------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---|
| nuances | | | caractéristiques mécaniques (1 daN/mm ² = 10 MPa) | | | | pour cémentation | trempe tabilité | taille des pièces | exemple d'utilisation propriétés |
| famille | désignation | ancienne désignation | R _r ou R _m (daN/mm ²) | R _e (daN/mm ²) | A% | KV (daJ/cm ²) | | | | |
| chrome | 38Cr2 | 38C2 | 60 - 95 | 35 - 55 | 14 - 17 | 3,5 | | + | P - M | ② |
| | 46Cr2 | 42C2 | 65 - 110 | 40 - 65 | 12 - 15 | 3,5 | | + | P - M | ② |
| | 34Cr4 | 34C4 | 70 - 110 | 46 - 70 | 12 - 15 | 4 | | ++ | P - M | ② |
| | 41Cr4 | 42C4 | 80 - 120 | 56 - 80 | 11 - 14 | 3,5 | | ++ | P - M | ① ② ③ ⑩ |
| | 100Cr6 | 100C6 | 85 - 125 | 55 - 85 | 10 - 13 | 3,5 | | ++ | P - M | ④ ⑤ HRc ≥ 62 |
| nickel-chrome | 10NiCr5-4 | 10NC6 | 60 - 115 | 42 - 62 | 10 - 12 | 8 - 10 | ● | + | P | aptitude croissance ↓ ① ② ③ ⑧ |
| | 20NiCr6 | 20NC6 | 70 - 110 | 70 - 95 | 8 - 10 | 6 - 8 | ● | ++ | P | |
| | 13NiCr14 | 14NC11 | 80 - 145 | 65 - 90 | 8 - 10 | 7 - 8 | ● | + | M | |
| | 30NiCr11 | 30NC11 | 70 - 110 | 45 - 70 | 12 - 16 | 7 | | ++ | M | |
| Ni + Cr + Mo | 20NiCrMo6-4 | 18NCD6-4 | 80 - 150 | 70 - 90 | 8 - 10 | 5 - 6 | ● | +++ | G | ① ② ⑧ ⑨ |
| | 20NiCrMo2-2 | 20NCD2 | 75 - 155 | 60 - 95 | 8 - 11 | 5 - 7 | ● | ++ | M | ① ② |
| | 16NiCrMo13 | 16NCD13 | 85 - 155 | 65 - 95 | 8 - 11 | 5 - 7 | ● | ++ | M | ① ④ |
| | 34CrNiMo6 | 35NCD6 | 80 - 140 | 60 - 100 | 9 - 13 | 4,5 | | +++ | G | ① ② ⑥ |
| | 36NiCrMo16 | 35NCD16 | 100 - 145 | 80 - 105 | 9 - 11 | 3 - 4,5 | | ++++ | G | trempeable à l'air ① ② ⑧ |
| | 30CrNiMo8 | 30CND8 | 90 - 145 | 70 - 105 | 9 - 12 | 3 - 4,5 | | ++++ | G | ① ② ③ |
| chrome- molybdène | 31CrMo12 | 30CD12 | 90 - 130 | 70 - 90 | 10 - 12 | 4,5 | | +++ | G | pour nitruration |
| | 25CrMo4 | 25CD4 | 65 - 110 | 40 - 75 | 12 - 16 | 4,5 | ● | ++ | M | soudabilité ② ③ |
| | 35CrMo4 | 35CD4 | 70 - 130 | 45 - 90 | 11 - 15 | 4,5 | | ++ | G | ① ② ③ ⑩ |
| | 42CrMo4 | 42CD4 | 75 - 130 | 50 - 90 | 10 - 14 | 3,5 | | +++ | G | ① ② ③ ⑩ |
| | 50CrMo4 | 50CD4 | 80 - 130 | 55 - 90 | 9 - 13 | 3 | | +++ | G | ① ② ③ |
| nuances diverses | 51CrV4 | 50CV4 | 80 - 130 | 60 - 90 | 9 - 13 | 3 | | +++ | G | ⑤ ① |
| | 41CrAlMo7-10 | 40CAD6-12 | 80 - 120 | 60 - 80 | 10 - 14 | 3 | | ++ | M | pour nitruration ⑥ ⑦ |
| | 28Mn6 | 20M6 | 50 - 75 | 35 - 45 | 19 - 21 | 4 | | + | P | soudabilité ② ⑦ |
| | 20MnCr5-5 | 20MC5 | 90 - 150 | 75 - 95 | 8 - 9 | 4 - 5 | ● | + | M | ① ② ⑦ ⑧ |
| | 55Si7 | 55S7 | 70 - 170 | 50 - 130 | 6 - 13 | 4 | | ++ | P | ⑤ ⑦ |
| | 45SiCrMo6 | 45SCD6 | 85 - 185 | 60 - 140 | 6 - 13 | 5 | | +++ | P - M | ⑤ ⑦ |
| | 13MnS4 | 13MF4 | 78 - 118 | 54 | 9 | 4 | | | | pour décolletage |
| | 35MnS6 | 35MF6 | 88 - 108 | 74 | 9 | 3,5 | | | | |

- ++++ : très forte
- +++ : forte
- ++ : moyenne
- + : limitée
- P : petite (∅ ≈ 50)
- M : moyenne (∅ ≈ 100)
- G : grosse (∅ ≈ 200)
- ① engrenage
- ② arbres, axes, tiges, leviers, fusées
- ③ boulonnerie haute résistance
- ④ roulements
- ⑤ ressorts
- ⑥ pièces de frottement
- ⑦ pièces d'usures
- ⑧ pièces de sécurité, résistance aux chocs
- ⑨ basses températures
- ⑩ pour trempe superficielle

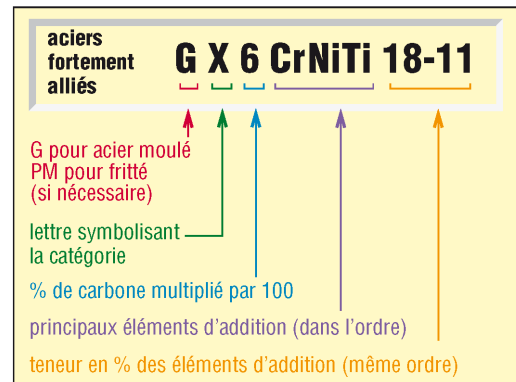
III - Aciers fortement alliés

Ils sont destinés à des usages particuliers (inoxydable...). Pour ces aciers au moins un élément d'addition dépasse la teneur de 5 % en masse.

1. Désignation

Lettre X, symbolisant la famille, suivie des mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés. Seule différence : pas de coefficient multiplicateur pour le pourcentage des éléments d'addition (ni 10, ni 4, ...).

Exemple : GX6CrNiTi18-11 (0,06 % C ; 18 % de chrome ; 11 % de nickel et des traces de titane (< 1%), G pour acier moulé).



5. Désignation des aciers fortement alliés (NF EN 10027-1).

2. Aciers inoxydables

Famille très importante, caractérisée par une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud, au fluage et subdivisée suivant la teneur en nickel (2,5 %). Liste : NF EN 10088-1.

a) Aciers inoxydables austénitiques [Cr+Ni]

Ces aciers, les plus utilisés, sont les plus résistants à la corrosion ($Ni \geq 7\%$).

Leurs caractéristiques sont : tenue aux températures élevées et à l'écaillage ; ductilité (A% élevé) ; résilience ; faciles à forger et à souder ; usinabilité médiocre. Ils peuvent être durcis par corroyage (écrouissage) mais pas par trempe. Leur degré de dilatation est élevé et leur conductibilité thermique assez basse. Environ 70 nuances courantes.

Applications (chimie, alimentaire, transports, nucléaire...) : pièces embouties, chaudronnées, cuves, réservoirs, armatures, conduites, vannes, visserie,...

b) Aciers inoxydables ferritiques [au Cr]

Ils sont toujours ductiles, ne durcissent ni par trempe ($C < 0,08\%$) ni par écrouissage ; ils sont faciles à étirer, former, plier, forger, rouler ($Ni < 1\%$) ; les moins résistants à la corrosion. Propriétés : les plus économiques, usinabilité médiocre, soudabilité faible ; peu résilients et faible résistance à la rupture (R_r) sous températures élevées (28 nuances courantes).

Applications : équipements ménagers, décoration intérieure, automobiles, mobiliers...

c) Aciers inoxydables martensitiques ($0,08 \leq C \leq 1\%$)

Résistent aux chocs, durcissent par trempe, sont soudables à chaud, faciles à forger, ont une bonne usinabilité et de bonnes caractéristiques mécaniques à température élevée ($Ni < 7\%$), et résistent moins à la corrosion que les précédents (environ 25 nuances courantes).

X30Cr13 existe en X12Cr13, X20Cr13, X39Cr13, X46Cr13 et X12CrS13.

Applications : composants divers (toutes industries), couteaux, ressorts...

d) Aciers inoxydables à durcissement par précipitation (7 nuances)

Comme les martensitiques en plus résistants à la corrosion et mécaniquement (après trempe).

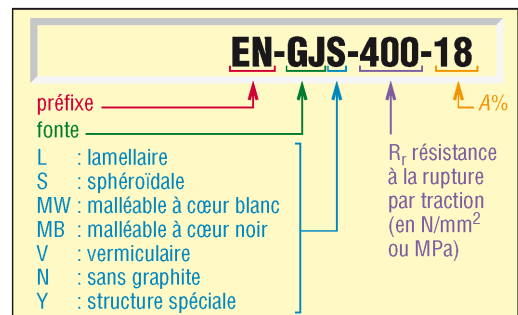
| Aciers inoxydables – extrait NF EN 10088 | | | | |
|--|---|--|-------|-----------|
| nuances | Re _{0,2} (daN/mm ²) | R _r (daN/mm ²) | A % | KV (J) |
| (état adouci) | ferritiques | | | |
| X2CrNi12 | 25-28 | 45-65 | 18-20 | – |
| X6Cr13 | 22-24 | 40-63 | 18-20 | – |
| X6Cr17 | 24-26 | 43-63 | 18-20 | – |
| X6CrMo17-1 | 26-28 | 45-66 | 18 | – |
| (état adouci) | austénitiques | | | |
| X2CrNi19-11 | 18-22 | 46-68 | 45 | 60-90 |
| X5CrNi18-10 | 21-26 | 50-75 | 45 | 60-100 |
| X6CrNiTi18-10 | 20-25 | 50-72 | 40 | 60-100 |
| X5CrNiMo17-12-2 | 22-27 | 50-70 | 40 | 60-100 |
| X6CrNiMoTi17-12-2 | 22-27 | 50-73 | 40 | 60-100 |
| X1CrNiMoN25-22-2 | 25-29 | 54-74 | 40 | 60-100 |
| (état traité) | martensitiques | | | |
| X12Cr13 | 40-45 | 55-85 | 12-20 | 25 |
| X30Cr13 | 60-65 | 80-100 | 10-15 | 20 |
| X3CrNiMo13-4 | 65-80 | 78-110 | 12-15 | 70 |
| X4CrNiMo16-5-1 | 55-70 | 75-100 | 14-15 | 60-100 |
| (état traité) | durcis par précipitations | | | |
| X5CrNiCuNb16-4 | 79 | 90-130 | 3-14 | 40 |
| X7CrNiAl17-7 | 130 | 99-145 | 2-19 | 40 |

3. Autres familles

- Aciers moulés (EN 10340) : GS200, GS240, G15Mn5, G20Mn5, G24Mn6 (non alliés) ; G10MnMoV6-3, G18NiMoCr3-6, CX4CrNiMo16-5-1, GX2CrNiMo19-11-2 (alliés)...
 - Aciers réfractaires (pour températures $650^\circ < t < 1\ 150^\circ$) : X12CrNi23-13, X8CrNi25-21, X8CrNiTi18-10, X15CrNiSi20-12 (austénitiques) ; X10CrAlSi13, X16Cr17 (ferritiques).
 - Aciers à outils : alliés pour travail à froid ou à chaud (usure, chocs, températures) ; aciers rapides (au Cr+W+Mo+V) : HS6-5-3 (surcarbure – 1,2 % C), HS18-0-2-9 (au Co– 9 %)...
 - Aciers Maraging : hautes résistances en aéronautique ; $R_r \approx 2\ 000$ MPa ; X2NiCoMo18...
 - Aciers Hadfields (au Mn) : grande résistance à l'usure, dureté ≈ 500 HB ; X120Mn12...
 - Aciers pour roulements (page 264), pour appareils à pression, pour ressorts...
- Voir aussi FDA 35-570 et aciers moulés NF EN 10293.

IV – Fontes

Leur grande coulabilité permet d'obtenir des pièces de fonderie aux formes complexes. À cause du pourcentage élevé de carbone qu'elles contiennent, entre 2 et 4 %, elles sont en général assez fragiles, peu ductiles (inadaptées aux déformations à froid : forgeage, laminage...) et difficilement soudables.



1. Fontes à graphite lamellaire EN-GJL (ex « FGL »)

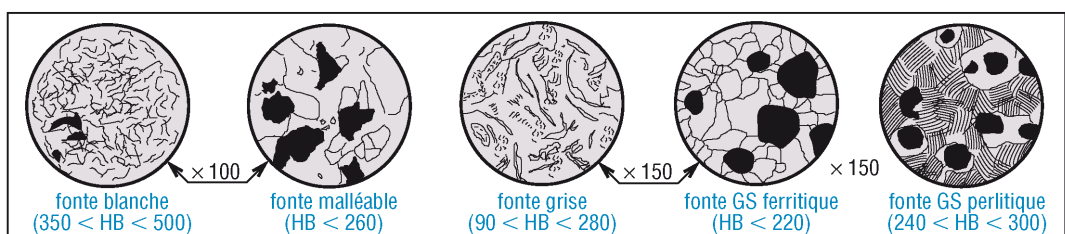
Les plus économiques, les plus utilisées, ce sont les fontes de moulage par excellence. Le carbone se présente sous forme de fines lamelles de graphite qui lui donne une couleur « grise ». *Propriétés* : bonne coulabilité ; bonne usinabilité ; grande résistance en compression et grandes capacités d'amortissement des vibrations. Norme NF EN 1561. *Applications* : bâtis de machine, supports, carters, blocs-moteurs...

2. Fontes à graphite sphéroïdal EN-GJS (ex « FGS »)

Ce sont les plus utilisées après les fontes à graphite lamellaire, obtenues par addition de petites quantités de magnésium juste avant moulage ; le graphite s'agglomère pendant le traitement sous forme de nodules ou sphères. Norme NF EN 1563. *Propriétés* : ductilité, résilience et usinabilité. Variantes : fontes vermiculaires (GJV). *Applications* : vilebrequins, arbres de transmission, pièces de voirie, tuyauteries...

3. Fontes malléables EN-GJMW et GJMB (ex « FMB et FMN »)

Elles sont obtenues par malléabilisation de la fonte blanche (paragraphe 4) – sorte de recuit – et ont des propriétés mécaniques voisines de celles de l'acier. Elles peuvent être moulées en faibles épaisseurs et sont facilement usinables. Applications : carters, boîtiers... NF EN 1562.



7. Microstructures des fontes usuelles.

4. Autres familles

Fontes blanches (GJN) : à base de perlite et de cémentite (carbures Fe_3C), elles sont très dures, fragiles ; elles résistent aux frottements et aux températures élevées. *Applications :* pièces résistant à l'usure par abrasion.

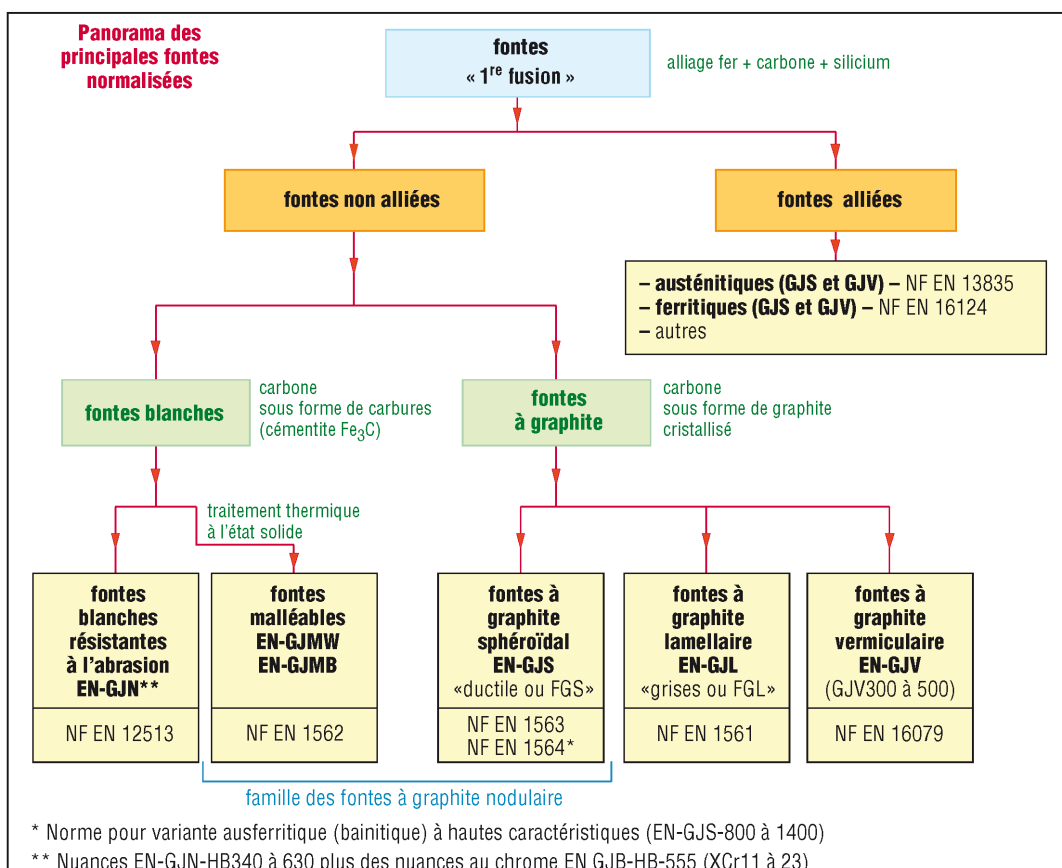
Fontes alliées : elles peuvent être à graphite lamellaire, sphéroïdal, blanches, etc. Principaux éléments d'addition : nickel, cuivre, chrome, molybdène et vanadium. Elles peuvent recevoir des traitements thermiques : trempe...

Applications : pièces d'usure (mines, génie civil, laminage...).

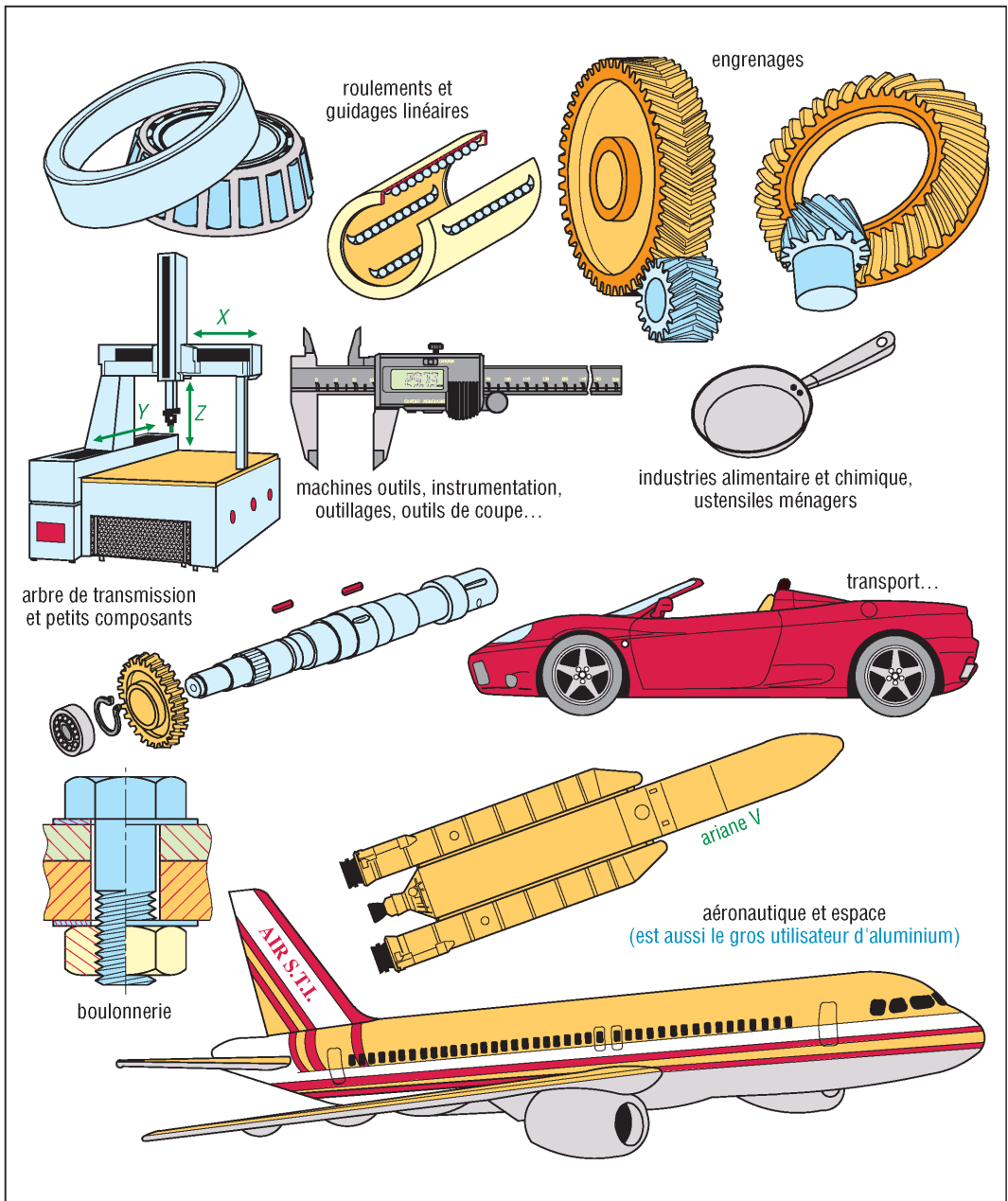
Désignation : EN-GJL-X300CrNi9-5 (3 % de carbone, 9 % de Cr et 5 % de Ni).

| Fontes alliées | | | | | |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|------------|-------|--|
| | éléments d'addition | matrice | HB | A% | propriétés caractéristiques |
| GJL ou GJS | Ni - Mo (Cr) | bainite | 250 350 | 1-2 | résistance mécanique résistance à l'usure capacité d'amortissement |
| | Ni - Cr (Mo) | martensite | 350 500 | < 1 | |
| | Ni-Si ou Ni-Si (Cr) | austénite | 120 250 | 12-25 | résilience résistance aux hautes et basses températures |
| | Si ou Si - Mo | ferrite | 180 340 | 1-10 | résistance à l'oxydation et déformations à T °C ↗ |
| GJN | Ni - Cr ou Cr (11 à 28 %) | carbures martensite austénite | 450 800 | - | résistance à l'abrasion et à l'oxydation |
| | Cr (28 à 34 %) | ferrite | 200 500 | - | résistance aux températures élevées et à la corrosion |

| Principales fontes | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|---------|------------|-----|
| désignation normalisée | R _e (MPa) | R _r (MPa) | E (GPa) | HBW dureté | A% |
| fontes à graphite lamellaire | | | | | |
| EN-GJL-150 | 100 | 150 | 80 | 160 | 0,8 |
| EN-GJL-200 | 130 | 200 | 90 | 190 | à |
| EN-GJL-250 | 170 | 250 | 100 | 210 | 0,3 |
| EN-GJL-300 | 200 | 300 | 110 | 230 | ↓ |
| EN-GJL-350 | 230 | 350 | 120 | 260 | ↓ |
| fontes à graphite sphéroïdal | | | | | |
| EN-GJS-350-22 | 220 | 350 | ↑ | 160 | 22 |
| EN-GJS-400-15 | 250 | 400 | 165 | 170 | 15 |
| EN-GJS-500-7 | 320 | 500 | ↑ | 210 | 7 |
| EN-GJS-600-3 | 370 | 600 | 168 | 230 | 3 |
| EN-GJS-700-2 | 420 | 700 | ↓ | 260 | 2 |
| EN-GJS-800-2 | 480 | 800 | ↓ | 300 | 2 |
| EN-GJS-900-2 | 600 | 900 | 170 | 330 | 2 |
| cœur blanc EN- fontes malléables | | | | | |
| GJMW-360-12 | 190 | 360 | ↑ | 200 | 12 |
| GJMW-400-5 | 220 | 400 | ↑ | 220 | 5 |
| GJMW-450-7 | 260 | 450 | ↑ | 220 | 7 |
| cœur noir EN- | | | | | |
| GJMB-350-10 | 200 | 350 | 170 | 150 | 10 |
| GJMB-450-6 | 270 | 450 | 170 | 180 | 6 |
| GJMB-550-4 | 340 | 550 | 170 | 210 | 4 |
| GJMB-650-2 | 430 | 650 | 170 | 240 | 2 |
| GJMB-800-1 | 600 | 800 | 170 | 300 | 1 |



| Principales fontes : teneur en % | | | | | |
|-----------------------------------|---|---|---|-------------------------------|--------------------------|
| éléments (teneur en %) | fontes à graphite lamellaire (EN-GJL) | fontes à graphite sphéroïdal (EN-GJS) | fontes malléables | | fontes blanches (EN-GJN) |
| | | | fontes à cœur noir (EN-GJMB) | fontes à cœur blanc (EN-GJMW) | |
| carbone | 2,5 - 4,0 | 3,0 - 4,0 | 2 - 2,8 | 2,7 - 3,2 | 1,8 - 3,6 |
| silicium | 1,0 - 4,0 | 1,8 - 2,8 | 0,9 - 1,7 | 0,6 - 0,9 | 0,3 - 2,6 |
| manganèse | 0,25 - 1,0 | 0,1 - 1,0 | 0,25 - 0,65 | 0,2 - 0,45 | 0,2 - 1,5 |
| soufre | 0,02 - ,01 | < 0,03 | 0,06 - 0,25 | 0,08 - 0,2 | 0,06 - 0,2 |
| phosphore | 0,04 - 1,0 | < 0,10 | 0,08 - 0,25 | 0,05 - 0,2 | 0,06 - 0,18 |
| structure dominante de la matrice | - ferrite - perlite + ferrite - perlite - perlite + carbures | - ferrite - perlite + ferrite - perlite + bainite - perlite + ferrite + martensite | ferrite | ferrite | - perlite - cémentite |
| | | | perlite pour la structure perlitique MP | | |



8. Exemple d'objets utilisant des aciers faiblement et fortement alliés ainsi que des fontes alliées.

17

MÉTAUX NON FERREUX

OBJECTIFS

- Indiquer et décrire les caractéristiques des principaux métaux non ferreux et de leurs alliages.
- Retenir les désignations et les principales nuances normalisées (AFNOR).

Les principales familles, avec leurs alliages sont : l'aluminium, le cuivre, le magnésium, le zinc, le titane et le nickel. La plupart de ces matériaux sont commercialisés sous plusieurs formes ou dans des états métallurgiques différents (brut, recuit, écroui, durci), l'utilisateur choisissant l'état de livraison qui lui convient. Voir données environnementales pages 596 et 597.

I - États métallurgiques

Les états métallurgiques, « ou de livraison », sont normalisés pour certains alliages. Leur désignation est effectuée par une lettre (F, O, H, W ou T) suivi par un ou plusieurs chiffres. Le premier chiffre indique un cycle de traitements thermiques ou mécaniques (écrouissage...), les chiffres suivants précisent les variantes possibles du cycle. Les remarques sont les mêmes dans le cas des pièces moulées. Normes : NF EN 515 ; NF EN 1173 ; NF A 57-702...

| États métallurgiques de base | | Subdivisions de l'état T | | | |
|---|-----------------------|--|--------------------|--------------------------------|-----------------------|
| F = État brut de fabrication O = État recuit H = État écroui T = Traitement thermique autre que F, O ou H W = Pour Al, mis en solution (trempé) | | O ₁ = recuit + refroidi O ₂ = traitement thermomécanique O ₃ = homogénéisé | | | |
| | | aluminium et alliages – ISO 2107 | | | |
| | | vieillessement | écrouissage | refroidi après transf. à chaud | mise en solution |
| | | naturel | non | T1 | T4 |
| | | | oui | T2 | T3 |
| | | artificiel | non | T5 | T6 et T7 |
| | | | oui - avant revenu | T10 | T8 |
| | | | oui - après revenu | | T9 |
| États de livraison des produits non ferreux moulés | | Cuivre et alliages NF EN 1173 | | | |
| symbole | procédé d'obtention | A : allongement (fil, EN ... -Cu-Of-A007) B : limite de flexion (bande EN 1654-CuSn8-B410) D : brut d'étirage sans spécification (tube EN...-Cu-ETP-D) G : grosseur du grain (bande EN 1652-CuZn37-G020) H : dureté Brinell ou Vickers (tôle EN 1652-CuZn37-H150) M : brut sans spécification (barre creuse EN 12168-CuZn36Pb3-M) R : résistance à la traction (barre EN 12164-CuBe2R1200) Y : limite élastique à 0,2 % (bande EN 1654-CuZn30-Y460) | | | |
| symbole | traitement | Subdivisions de l'état H | | | |
| 0 | Aucun traitement | état niveau de dureté | écroui seul (H1) | écroui recuit (H2) | écroui stabilisé (H3) |
| 1 | Recuit | 1/4 dur | H12 | H22 | H32 |
| 2 | Trempé | 1/2 dur | H14 | H24 | H34 |
| 3 | Trempé + revenu | 3/4 dur | H16 | H26 | H36 |
| 4 | Trempé + mûri | 4/4 dur | H18 | H28 | H38 |
| 5 | Stabilisé | | | | |
| 6 | Trempé et stabilisé | | | | |
| 9 | Suivant prescriptions | | | | |

Exemple : EN AC [Al Si 7 Mg] Y33 (A-S7G moulé en coquille, trempé et revenu)

II - Aluminium et alliages

Fabriqués industriellement depuis 1886 à partir des bauxites et de la cryolithe, ces métaux sont les plus utilisés juste après les fontes et les aciers. Normes NF EN 485, 515, 573, 603...

1. Principales caractéristiques

- Bas point de fusion (658 °C) ; ductilité élevée (A% ≈ 40%) ; assez léger (densité 2,7) ; bonne conductivité électrique ; bonne conductibilité thermique (5 fois celle des aciers) ; coefficient de dilatation thermique 1,5 fois celui des aciers, propriétés réfléchissantes.
- Bon rapport résistance/poids, ce qui explique les nombreuses applications dans le domaine des transports, comme l'aéronautique, par exemple.
- Résistance à la corrosion élevée. Le métal se couvre, au contact de l'air, d'une couche d'oxyde protectrice, les éléments d'addition diminuent plus ou moins cette résistance.
- Résistance mécanique : elle peut être modifiée par écrouissage ou par recuit (adoucissement).
- Inconvénients : faibles résistances à l'usure et à la fatigue.

2. Mise en œuvre

Elle est assez facile par un grand nombre de procédés : laminage, moulage, forgeage, formage, étirage, extrusion, métallurgie des poudres... L'élasticité élevée peut gêner certains usinages. Le coefficient de dilatation important et la grande conductivité thermique imposent, à cause des dilatations, certaines précautions en soudage et en usinage.

La soudabilité dépend de la trempe et du revenu pratiqués sur l'alliage.

Revêtements décoratifs et protecteurs par anodisation, nombreux procédés (EN 12373).

3. Traitements thermiques

Ils sont tout à fait différents de ceux des aciers. Après trempe, le durcissement est obtenu par vieillissement naturel, ou maturation, à température ambiante ou par revenu à température élevée.

Les alliages avec le cuivre, le silicium, le zinc et ceux avec le magnésium plus le silicium sont trempants ; ils sont dits avec durcissement structural.

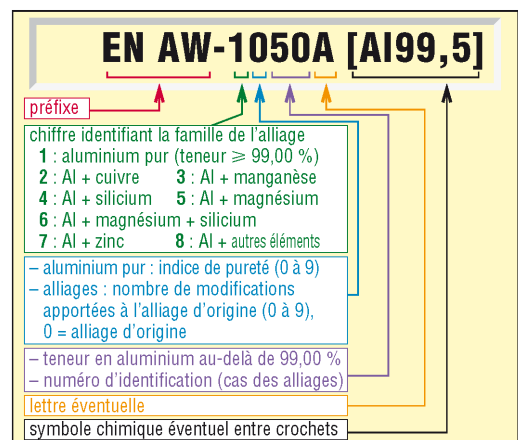
L'aluminium pur, les alliages avec le manganèse et le magnésium ne sont pas trempants ; ils sont dits sans durcissement structural.

4. Aluminium et alliages corroyés

Cette famille, la plus utilisée, comprend tous les produits laminés d'usage courant (barres, profilés, tôles...).

Désignation (norme internationale) : elle est effectuée par un nombre à quatre chiffres, avec EN AW - comme préfixe (A pour aluminium, W pour corroyé), éventuellement suivi par le symbole chimique de l'alliage placé entre crochets (**fig. 1**).

Exemple : EN AW-5086 [Al Mg 4] est un alliage d'aluminium avec 4% de magnésium ; EN AW-1050A [Al 99,5] est un aluminium pur à 99,5 %.



1. Désignation des produits laminés - NF EN 573.

| Aluminium et alliages : produits laminés (extrait NF EN 485-2) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|---|--|-------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------------|-------------|-----------------------------|----------------------|---------|-------|----|-----|-----|-----|---|--------|
| nuances | | état métallurgique | caractéristiques mécaniques (1 daN/mm ² = 10 MPa) | | | | résistance à la corrosion | aptitude à l'anodisation | soudabilité à l'arc | soudabilité aux gaz + brasage | usinabilité | aptitude au travail à froid | exemples d'emploi | | | | | | | | |
| | | | R _r (daN/mm ²) mini | R _e (daN/mm ²) mini | A % maxi | E (daN/mm ²) | | | | | | | | | | | | | | | |
| sans traitements thermiques (sans durcissement structural) | aluminium pur | EN AW-1050A[Al 99,5] (1050A) | O | 6,5 | 2 | 32 | 6 700 | ++ | +++ | +++ | +++ | - | +++ à + | ① ③ ⑤ ⑨ | | | | | | | |
| | | | H14 | 10,5 | 8,5 | 6 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | H18 | 14 | 12 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | EN AW-1070A[Al 99,7] EN AW-1080A[Al 99,8] (1070A et 1080A) | O | 6 | 1,5 | 32 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | H14 | 10 | 7 | 7 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | H18 | 12,5 | 10,5 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | EN AW-1100[Al 99,0Cu] EN AW-1200[Al 99,0] (1100 et 1200) | O | 7,5 | 2,5 | 30 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | H14 | 11,5 | 9,5 | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | H18 | 15 | 13 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Al + Mn | EN AW-3003[AlMn1Cu] (3003) | O | 9,5 | 3,5 | 23 | 6 700 | ++ | ++ | +++ | +++ | + | +++ ++ + | ① ③ ⑤ ⑥ | | | | | | | |
| | | | H14 | 14,5 | 12,5 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | H18 | 19 | 17 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| EN AW-5005[AlMg1] (5005) | | O | 10 | 3,5 | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | H14 | 14,5 | 12 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | H18 | 18,5 | 16,5 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Al + magnésium | EN AW-5052[AlMg2,5] (5052) | O | 17 | 6,5 | 18 | 7 000 | +++ | +++ | +++ | +++ | + | +++ + | ① ⑤ ⑥ ⑫ | | | | | | | | |
| | | H34 | 23 | 15 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | H38 | 27 | 21 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EN AW-5086[AlMg4] (5086) | O | 24 | 10 | 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | H22 | 27,5 | 18,5 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | H24 | 30 | 22 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| avec traitements thermiques (avec durcissement structural) | Al + cuivre | EN AW-2014[AlCu4SiMg] (2014) | O | 22 | 14 | 16 | 7 400 | - | + | ++ | + | ++ ++ | ② ⑦ ⑧ | | | | | | | | |
| | | | T4 | 40 | 25 | 14 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | T6 | 46 | 40 | 6 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | EN AW-2017A[AlCu4MgSi] (2017) | O | 22,5 | 14,5 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T4 | 39 | 25 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | EN AW-2024[AlCu4Mg1] (2024) | O | 22 | 14 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T4 | | 43 | 28 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Al + Si + Mg | | EN AW-6061[AlMg1SiCu] (6061) | O | 15 | 8,5 | | | | | | | | 16 | 7 000 | ++ | +++ | +++ | +++ | + | à + |
| | | T4 | | 20,5 | 11 | 16 | | | | | | | | | | | | | | | |
| T6 | | 29 | | 24 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EN AW-6082[AlSi1MgMn] (6082) | | O | 15 | 8,5 | 16 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T4 | 20,5 | 11 | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T6 | 31 | 26 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Al + zinc | EN AW-7020[AlZn4,5Mg1] (7020) | T4 | 32 | 21 | 14 | 7 200 | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ + | ② ⑥ ⑦ | | | | | | | | | |
| | | T6 | 35 | 28 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | EN AW-7075[AlZn5,5MgCu] (7075) | O | 27,5 | 14,5 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | T6 | 54 | 46 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | |

(entre parenthèses : ancienne désignation) — R_r, R_e et A% varient avec la forme et l'épaisseur des profilés.

+++ : excellente
++ : bonne
+ : moyenne
- : faible

① : chaudronnerie, emboutissage
② : pièces forgées
③ : pièces filées : boîtes, aérosols ...
④ : boulonnerie
⑤ : chimie, alimentaire
⑥ : bâtiment

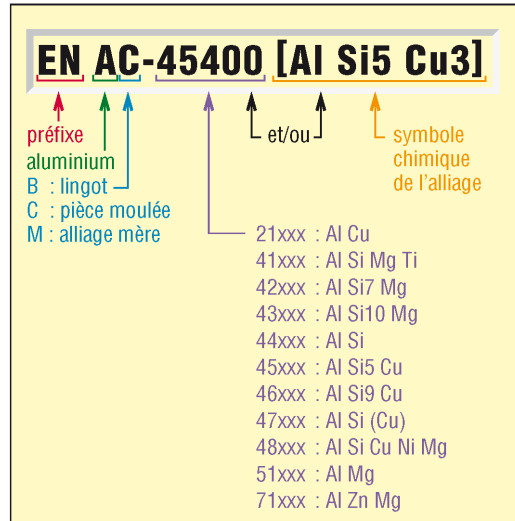
⑦ : mécanique, transport
⑧ : aéronautique
⑨ : décoration
⑩ : marine
⑪ : emballage
⑫ : ustensiles de cuisine ...

5. Aluminium et alliages pour la fonderie

La plupart des nuances sont faciles à mouler (moule métallique permanent ou moulage sable) en moyenne ou en grande série et en pièce unitaire. Élément d'addition type : Si.
Inconvénient : grand retrait au moulage (3,5 à 8,5 % en volume) qui peut être minimisé par un bon tracé de la pièce.

Désignation : préfixe EN ; espace ; lettre A pour aluminium ; lettre B ou C (pièce moulée) ou M ; tiret ; 5 chiffres donnant la composition et/ou les symboles chimiques de l'alliage ordonnés par teneurs décroissantes.

Exemple : EN AC - 45400 ou fig. 2 ou EN AC-AISi5Cu3 pour un alliage avec 5 % de silicium et 3 % de cuivre.



2. Désignation des produits de fonderie NF EN 1780.

| Aluminium et alliages : produits de fonderie (extrait NF EN 1706 et ISO 3522) | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|---|--|----|-----|---------------------|-------------------------|---------------------------|-------------|-------------|--------------------------|--------------------------|
| nuances | mode de coulée | caractéristiques mécaniques (1 daN/mm ² = 10 MPa) | | | | aptitude au moulage | aptitude à l'étanchéité | résistance à la corrosion | usinabilité | soudabilité | aptitude à l'anodisation | exemples d'emploi |
| | | R _r (daN/mm ²) | R _e (daN/mm ²) | A% | HBW | | | | | | | |
| EN AC-AISi12Cu NiMg (48000) | Y20 | 15 | 8 | 1 | 50 | A | A | C | C | A | E | travail à chaud, pistons |
| | Y36 | 28 | 24 | <1 | 100 | | | | | | | |
| EN AC-AISi7Mg0,6 (42200) | Y26 | 25 | 21 | 1 | 85 | B | B | B | B | B | D | ① haute * résistance |
| | Y36 | 32 | 24 | 3 | 100 | | | | | | | |
| EN AC-AlCu4MgTi (21000) | Y24 | 30 | 20 | 5 | 90 | D | D | D | A | D | C | ① haute résistance |
| | Y34 | 32 | 20 | 8 | 90 | | | | | | | |
| EN AC-AISi5Cu1Mg (45300) | Y26 | 23 | 20 | <1 | 100 | B | B | D | B | C | D | ①② |
| | Y36 | 28 | 21 | <1 | 110 | | | | | | | |
| EN AC-AISi12 (44200) | Y20 | 15 | 7 | 5 | 50 | A | A | B | C | A | E | ①③④ |
| | Y30 | 17 | 8 | 6 | 55 | | | | | | | |
| | Y40 | 24 | 13 | 1 | 60 | | | | | | | |
| EN AC-AISi7Mg (42000) | Y26 | 22 | 18 | 1 | 75 | B | B | B | B | B | D | ①③ |
| | Y36 | 26 | 22 | 1 | 90 | | | | | | | |
| EN AC-AlZn10Si8Mg (71100) | Y21 | 21 | 19 | 1 | 90 | A | B | B | A | A | C | ①③⑤⑥ |
| | Y31 | 26 | 21 | 1 | 100 | | | | | | | |
| EN AC-AIMg5 | Y20 | 16 | 9 | 4 | 55 | C | D | A | A | C | B | ① |
| EN AC-AISi9Cu3 | Y40 | 24 | 14 | 1 | 80 | B | B | D | B | B | E | ②* |
| EN AC-AISi9 | Y40 | 22 | 12 | 2 | 55 | A | C | C | C | D | E | ④① |
| EN AC-AISi12Cu1 | Y40 | 24 | 14 | 1 | 70 | A | C | C | C | F | E | ①①* |
| EN AC-AIMg9 | Y40 | 20 | 13 | 1 | 70 | C | D | A | A | C | B | ⑥ |
| EN AC-AISi10Mg | Y40 | 24 | 14 | 1 | 70 | A | B | B | B | A | E | ④①* |

Y20 : moulage sable ; Y30 : moulage coquille ; Y40 : moulage sous pression (page 169). * Très utilisé.

- | | | | |
|---------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| A : excellent | D : médiocre | ① : pièces mécaniques diverses | ④ : appareils ménagers |
| B : bon | E : éviter | ② : pièces mécaniques complexes | ⑤ : bâtiment et travaux publics |
| C : correct | F : incompatible | ③ : alimentaire, chimie, robinetterie | ⑥ : marine |

III - Cuivre et alliages

Il existe plus de 200 alliages de cuivre. Les principales familles sont : les laitons (Cu + Zn), les bronzes (Cu + Sn), les cupronickels (Cu + Ni), les cupro-aluminums (Cu + Al) et les maillechorts (Cu + Ni + Zn).

Inventaire des produits XP CEN/TS 13388

Désignation : symbole du cuivre Cu suivi des symboles et teneurs des principaux éléments d'addition, en ordre décroissant.

Exemple : Cu Zn 27 Ni 18 (maillechort avec 27 % de zinc et 18 % de nickel).

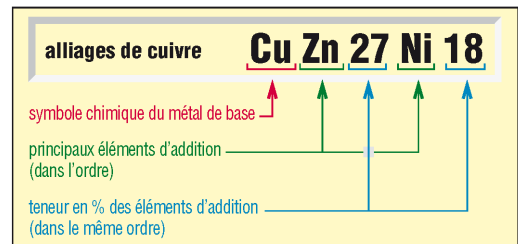
1. Principales caractéristiques du cuivre

Plus lourd que l'acier, de densité 8,9 ; fond à 1 083 °C ; grande résistance à la corrosion ; plasticité ou ductilité élevée (A% jusqu'à 50 %) ; grande conductivité électrique qui le rend indispensable dans les industries électriques et électroniques ; grande conductibilité thermique (atout pour la transmission de la chaleur) ; couleur rouge plus ou moins foncée devenant « jaune » avec addition de zinc.

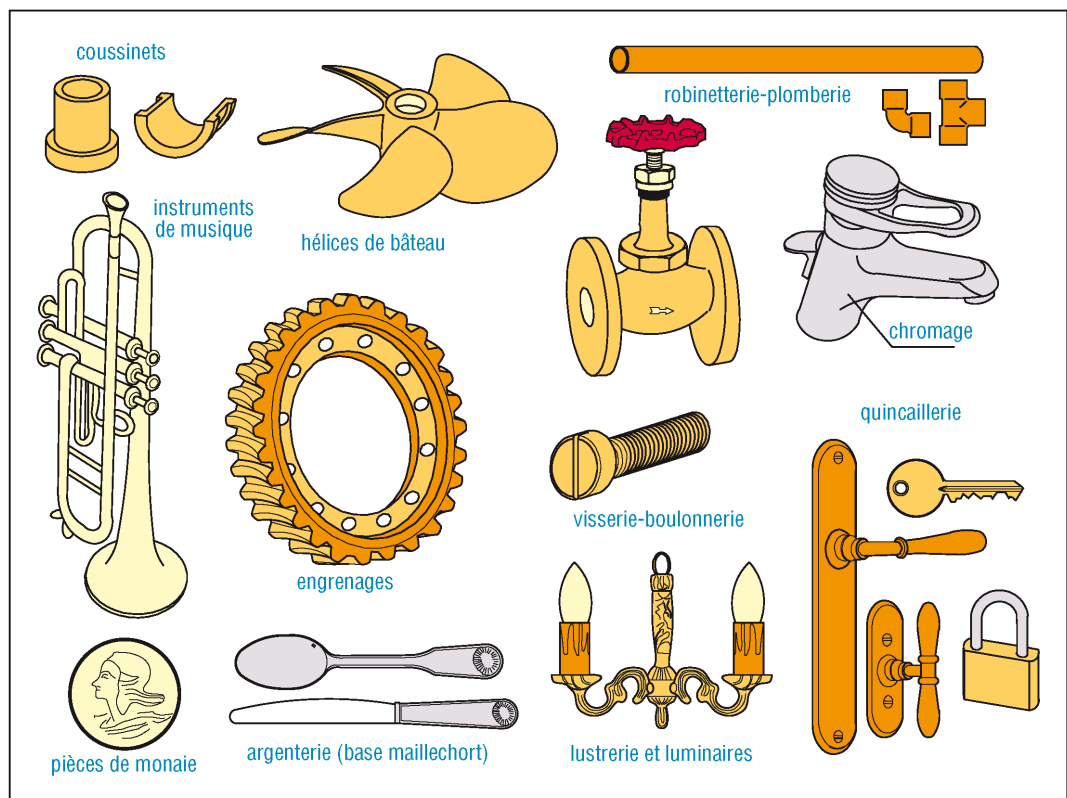
Les cuivres et les alliages ne peuvent pas être traités thermiquement, sauf ceux au béryllium. Cependant, la résistance (R_p) peut être augmentée par écrouissage à froid et la ductilité restaurée par un revenu. La trempe augmente la plasticité (cas inverse des aciers).

| | | |
|------------------------|---|-----------------|
| cuivre + étain | = | bronze |
| cuivre + zinc | = | laiton |
| cuivre + aluminium | = | cupro-aluminium |
| cuivre + nickel | = | cupronickel |
| cuivre + nickel + zinc | = | maillechort |

3. Principaux alliages du cuivre.



4. Désignation des alliages du cuivre.



5. Exemples de pièces en cuivre et alliages, alliages peu utilisés pour faire des bâtis (non structuraux).

2. Cuivres purs

Le cuivre utilisé pur (usages électriques, thermiques, chaudronnerie...) est soit un cuivre affiné (endurant, plus fragile, plus cassant), soit un cuivre désoxydé ou débarrassé de toute trace d'oxygène (moins fragile et très haute conductivité).

| type | taux d'écroissage (%) | R _r (daN/mm ²) | R _e (daN/mm ²) | A % | HB |
|---------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----|----|
| recuit | 0 | 23 | 7 | 45 | 50 |
| 1/4 dur | 10 | 27 | 21 | 25 | 70 |
| 1/2 dur | 25 | 30 | 25 | 14 | 87 |
| 4/4 dur | 50 | 35 | 32 | 6 | |

6. Caractéristiques du cuivre pur. 1 daN/mm² = 10 MPa.

| Cuivres purs non alliés : désignations* Symbole Cu + tiret + lettre d'indications | Cuivres et alliages-NF EN 1173 désignation des états métallurgiques |
|---|--|
| <p>Cu-ETP : affiné électrolyt., non désoxydé, à conductivité garantie Cu-FRHC : affiné thermiq., non désoxydé, à conductivité garantie Cu-FRTP : affiné thermiquement, à conductivité non garantie Cu-DHP : affiné thermiq. ou électrolyt., à fort phosphore résiduel Cu-DLP : affiné thermiq. ou électrolyt., à faible phosphore résiduel Cu-OF : désoxydé Cu-OFE : désoxydé, à haute pureté Autres : Cu-PHC ; Cu-PHCE ; Cu-HCP ; Cu-DXP ; Cu-ETP1 ; Cu-OF1 : cuivres argentifères (< 0,12 %) pour usage électrique (moins ductiles)</p> | <p>A : allongement (Fil EN 13602-Cu-OF-A007-...) B : limite de flexion élastique (bande EN1654-CuSn8-B410-...) D : brut d'étirage, sans spécification. (Tube EN 13600-Cu-ETP-D-...) G : grosseur de grain (Bande EN 1652-CuZn37-G020-...) D : dureté Brinell ou Vickers (Tôle EN1652-CuZn37-H150-...) M : brut fabricat., sans spécification (Barre EN...-CuZn37-M-...) R : résistance à la traction (Barre EN12164-CuZn39Pb3-R500...) Y : limite d'élasticité à 0,2% (Bande EN1654-CuZn30-Y460-...)</p> |

* Cuivre pour usages électriques (composition, caractéristiques) : NF EN 13601 – NF EN 13605 – NF EN 13599...

3. Laitons

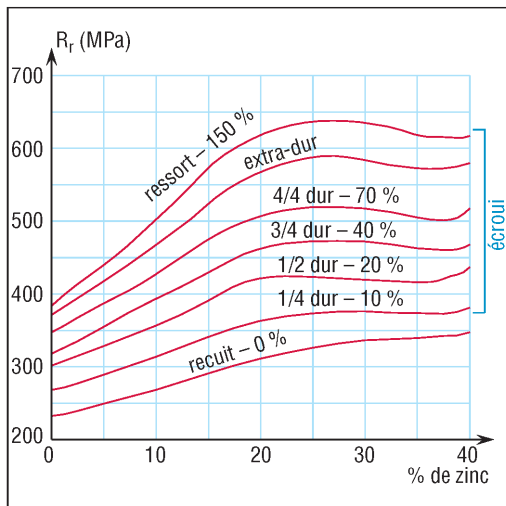
C'est la famille la plus utilisée. L'addition de zinc (jusqu'à 42 %) diminue le prix de base, augmente R_r et A%, ce qui favorise l'emboutissage (A% = 60 % avec 31 % de Zn), et diminue la température de fusion, ce qui facilite le moulage. Une addition supplémentaire de plomb, de 2 à 3 %, augmente considérablement l'usinabilité. Les laitons ainsi obtenus (laitons de décolletage) servent de référence pour évaluer l'usinabilité des autres matériaux.

| Alliages de cuivre : produits laminés | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------|---------|------------------------|---------------|
| nuances | état métall. | R _r daN/mm ² | A% | HV | emplois | |
| laitons | Cu Zn 10 (CW 501 L) | H11 H14 | 27 - 34 39 - 45 | | 67 - 95 118 - 135 | ① |
| | Cu Zn 33 (CW 506 L) | H11 H14 | 33 - 40 47 - 54 | 64 7 | 85 - 120 140 - 160 | ② |
| | Cu Zn 40 (CW 509 L) | H11 H14 | 36 - 43 51 - 59 | | 105 - 135 150 - 175 | ③ |
| | Cu Zn 39 Pb 2 (CW 612 N) | H12 H14 | 40 - 50 50 - 60 | 2 - 20 | 135 - 160 150 - 180 | ④ ⑦ |
| | Cu Zn 40 Pb 3 (CW 617 N) | laitons de décolletage | 37 - 50 | 4 - 22 | | ⑤ |
| | Cu Zn 36 Pb 3 (CW 603 N) | | 32 - 45 | 7 - 28 | | ⑤ |
| bronzes | Cu Sn 6 P (CW 452 K) | O H14 | 33 - 42 62 - 70 | 50 5 | 90 - 120 190 - 220 | ⑥ |
| | Cu Sn 3 Zn 9 (CW 454 K) | O H14 | 31 - 40 61 - 66 | 40 4 | 75 - 105 190 - 210 | ⑦ |
| | Cu Sn 4 Zn 4 Pb 4 (CW 456 K) | H12 H14 | 40 - 46 50 - 60 | 25 3 | 125 - 155 160 - 195 | ⑥ ⑧ |
| | Cu Ni 10 Zn 27 (CW 401 J) | H11 | 42 | 27 | 105 | ③ |
| maillechorts | Cu Ni 18 Zn 20 (CW 409 J) | H14 | 58 | 5 | 180 | |
| | Cu Be 2 (CW 101 C) | - | 14 à 120 | 2 à 35 | 90 à 330 | haute résist. |

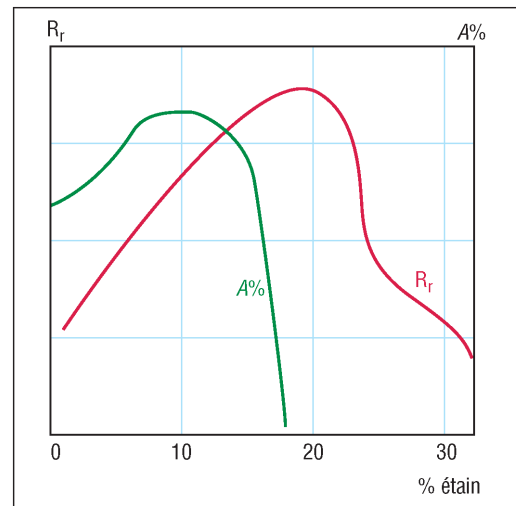
- ① bijouterie, quincaillerie
- ② douilles, lustrerie, musique
- ③ serrurerie, orfèvrerie, lustrerie
- ④ engrenages, horlogerie
- ⑤ pièces décolletées
- ⑥ ressorts
- ⑦ visserie
- ⑧ joints, membranes

| Alliages de cuivre : produits de fonderie | | | | | | |
|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|----------|------------|
| nuances | état métall. | R _r daN/mm ² | R _e daN/mm ² | A% | emplois | |
| cupro-aluminiums | Cu Al 10 Fe 2 (CC 331 G) | Y 20 Y 30 | 50 65 | 18 25 | 18 20 | ⑥ ⑤ ⑦ |
| | Cu Al 10 Ni 5 Fe 5 (CC 333 G) | Y 20 Y 30 | 63 60 | 25 30 | 12 7 | ⑧ ⑥ |
| | Cu Sn 12 (CC 483 K) | Y 20 Y 30 | 24 27 | 13 15 | 5 3 | ① ③ |
| | Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5 (CC 491 K) | Y 20 Y 70 | 20 25 | 9 10 | 12 12 | ① ⑤ ② ⑤ |
| bronzes | Cu Pb 20 Sn 5 (CC 497 K) | Y 20 Y 30 | 15 18 | 6 8 | 5 7 | ① ④ |
| | Cu Zn 19 Al 6 | Y 20 | 75 | 50 | 8 | ⑥ ⑦ |
| laitons | Cu Zn 20 | Y 20 | 18 | | 12 | ② |
| | Cu Zn 40 | Y 30 | 34 | | 8 | ② ⑤ |

- ① pièces frottantes
- ② pièces courantes, robinetterie
- ③ robinetterie haute pression
- ④ coussinets
- ⑤ chimie : robinets
- ⑥ hélices mer, turbines, engrenages
- ⑦ pièces méca. de résistance
- ⑧ roue et vis sans fin



7. Résistance des laitons en fonction du pourcentage de zinc.



8. Caractéristiques mécaniques du bronze.

| Principales caractéristiques des autres familles d'alliages de cuivre | | |
|---|---|---|
| familles | propriétés | observations |
| Bronzes (Cu + Sn) | <ul style="list-style-type: none"> - résistance à la corrosion - qualités frottantes - aptitude au moulage (meilleurs que les laitons) - se travaillent moins bien que les laitons : usinage, emboutissage... | L'addition (4 à 22 %) d'étain a un rôle comparable au zinc avec une action plus forte ; il est aussi plus coûteux. Une addition supplémentaire de phosphore ($P < 1\%$; bronzes phosphoreux) améliore les caractéristiques mécaniques, les propriétés antifriction et l'aptitude au moulage. Une addition de plomb (Pb) améliore l'usinabilité et celle de zinc diminue le prix de revient (bronzes chrysocoles). |
| Cuproaluminiums (Cu + Al) | <ul style="list-style-type: none"> - caractéristiques mécaniques - résistance à la corrosion | Surtout utilisés en fonderie. Addition d'aluminium entre 10 et 11 %. Ils sont souvent utilisés avec une addition de fer. Applications en génie maritime. |
| Cupronickels (Cu + Ni) | <ul style="list-style-type: none"> - très malléables - résistance à la corrosion | Couleur blanche à partir de 20 % de Ni. Le nickel améliore les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion et la résistivité électrique. Pièces de monnaie, condensateurs... |
| Mallechort (Cu + Ni + Zn) | plus résistants que les laitons à la corrosion et mécaniquement | Moins coûteux que le cupronickel, on peut les considérer comme des laitons avec une addition de nickel. Utilisations : articles ménagers, orfèvrerie, décoration, électricité... |

Inventaire des produits et compositions : XPCEN/TS13388 ; pièces forgées NF EN 12420...

IV - Titane et alliages

Le titane est abondant dans la nature, environ 1 % de la croûte terrestre (contre 8 % pour l'aluminium). Il fond à 1 668 °C et est presque deux fois plus léger que l'acier (densité $\approx 4,5$ contre 7,8 pour l'acier et 2,7 pour l'aluminium) avec des caractéristiques mécaniques comparables, cependant ses alliages sont plus coûteux.

Principales caractéristiques : relative légèreté ; bon rapport résistance/poids ; bonne résistance à la corrosion (\approx aciers inox) ; grande malléabilité ($A\% \approx 35\%$; bonne résistance mécanique à température élevée ($< 550\text{ °C}$) ; coefficient de dilatation thermique assez bas ; ne se fragilisent pas aux basses températures. $E \approx 110\text{ GPa}$. Les alliages se travaillent bien à froid et à chaud (forgeage...), ont une bonne soudabilité mais une mauvaise usinabilité.

Il existe en maille α à basse température (maille hexagonale compacte) et en famille β au-dessus de 882 °C (maille cubique centrée) ; V, Ta, Mo et Mb diminue cette température.

Utilisations : métal structural (bâtis...) régulièrement utilisé en aéronautique et espace (pièces forgées...), en génie chimique, équipements sportifs, prothèses médicales et génie maritime ; oxyde de titane (TiO_2) pour peintures, carbures de titane (TiC) pour outils coupants...

| Alliages de magnésium (fonderie), de titane et de zinc | | | | | | |
|--|---|---------------|--|--|---|--|
| base | nuances | mode de coulé | caractéristiques mécaniques | | | observations |
| | | | R _r (daN/mm ²) | R _e (daN/mm ²) | A % | |
| * magnésium EN MC- | MgAl8Zn1 (G-A8Z1) | Y20 | 22-27 | 10-14 | 4-8 | alliage polyvalent ; bonne coulabilité à 450 °C |
| | MgAl9Zn (G-A9Z) | Y20 | 16 | 8 | 2 | carters, roues, pièces aéronautiques |
| | | Y24 | 23 | 11 | 7 | fusion à 470 °C. Adapté au moulage sous pression. |
| | | Y30 | 17-22 | 9-12 | 2-5 | Bonnes caractéristiques mécaniques |
| | MgZn5Th2Zr | Y25 | 24-28 | 15-18 | 5-12 | carters complexes, tous types de moulages ; d = 1,87 ; fusion 520 °C |
| MgZr | Y25 | 16 | 5 | 15 | machines d'essais, bureautique ; d = 1,75 | |
| titane | T-A5E ou TiAl5Sn | T5 | 90 | 80 | 20 | malléabilité élevée ; pièces forgées |
| | T-A6V ou TiAl6V | T3 | 115 | 105 | 12 | le plus utilisé ; pièces de structure d'avion, visserie |
| | T-A6V6E ou TiAl6V6Sn | T1 | 105 | 95 | 12 | variante du T-A6V |
| | | T3 | 125 | 111 | 10 | traitements thermiques possibles |
| zinc | Z-A4 (zamak 3) ZnAl4 ou ZP3 | Y4 | 28 | 20 | 10 | carters, poignées, carburateurs, micromécanique |
| | Z-A4U1 (zamak 5) ZnAl4Cu1 ou ZP5 | Y4 | 33 | 25 | 5 | bagues, engrenages... fusion à 380 °C |
| | Z-A4U3 (zamak 2) ZnAl4Cu3 ou ZP2 | Y4 | 36 | 27 | 5 | variante plus dure |

Entre parenthèses : ancienne désignation. Y4 : moulage sous pression (page169). 1 daN/mm² = 10 MPa. * NF EN 1754.

| Principales autres familles de métaux non ferreux et leurs alliages | | | | | |
|---|-----------|------------|----------|--|---|
| métaux | symbole | densité | fusion | observations | |
| magnésium | Mg | 1,74 | 650 °C | C'est le plus léger des métaux structuraux (bâti...) classé dans la catégorie des alliages légers ; rapport résistance/poids élevé ; grande capacité d'amortissement ; résistance moyenne à la corrosion. Deux familles : les alliages avec zirconium (meilleures plasticité et résistance à la corrosion) et ceux sans. L'Al favorise R _r , Zn le moulage et Th les propriétés à température élevée... Désignation (NF EN 1754) analogue à l'aluminium : EN-M... | |
| zinc | Zn | 7,13 | 420 °C | Bonne résistance à la corrosion, mise en œuvre facile en fonderie (basse température de fusion, retrait très faible, pièces complexes à parois minces, avec tolérances serrées « 0,01 à 0,1 mm », sans reprise d'usinage et sous cadences élevées). Principales nuances (fonderie) : zamaks (2, 3, 5) et kayems (1 et 2). Désignations (NF EN 12844) : ZP2, ZP3, ZP5, ZP6, ZP8, ZP12, ZP16, ZP27 pour pièces moulées. Autres utilisations : zinc laminé pour le bâtiment (couverture), poudres et revêtements contre la corrosion (métallisation, galvanisation, zingage, shérardisation, peintures...) | |
| nickel | Ni | 8,9 | 1 453 °C | Métal blanc brillant, propriétés analogues à l'acier avec une meilleure résistance à la corrosion. Les alliages résistent à la corrosion, sont résiliants et supportent des températures élevées (superalliages pour l'aviation...) en résistant au fluage. | |
| cobalt | Co | 8,8 | 1 495 °C | Métal blanc, reflet bleuté ; alliages nombreux et complexes : superalliages réfractaires, stellites pour outils, invar, vitalium... | |
| métaux réfractaires | molybdène | Mo | 10,22 | 2 610 °C | Avec le rhénium qui fond à 3 170 °C ; densités élevées ; températures de fusion très élevées. Ils sont adaptés à un service ou un travail à très haute température (1 600 °C...). |
| | tantale | Ta | 16,6 | 2 996 °C | |
| | tungstène | W | 19,25 | 3 410 °C | Applications : outils de coupe ; moteurs d'avions ; engins spatiaux ; énergie nucléaire ; écrans, trépan, électrodes... |
| | niobium | Nb | 8,66 | 2 468 °C | |
| métaux précieux | or | Au | 19,3 | 1 063 °C | Facile à former ; c'est le plus malléable de tous les métaux (1 gramme d'or peut être étiré en un fil de plusieurs kilomètres). L'or en vente est généralement allié au cuivre ou titré. L'or à 24 carats (ou 1 000/1 000) est sans cuivre, celui à 22 carats contient 92,0 % d'or ; à 20 carats, 84 % ; 18 carats, 75 %. Une once vaut 31,1 g. |
| | argent | Ag | 10,5 | 961 °C | De tous les éléments c'est le meilleur conducteur de la chaleur et de l'électricité. Sa malléabilité est comparable à celle du cuivre. |
| | platine | Pt | 21,5 | 1 769 °C | Bijouterie, pots catalytiques, chirurgie dentaire, thermocouples... |
| étain | Sn | 5,7 ou 7,3 | 231,9 °C | Basse température de fusion ; résistance et dureté faibles ; très malléables ; résiste à la corrosion. Il existe sous forme d'étain gris (d = 5,75) et d'étain blanc (d = 7,31). L'étain blanc se transforme en étain gris si t < 13,2 °C. | |

18

MATIÈRES PLASTIQUES ET ÉLASTOMÈRES

OBJECTIFS

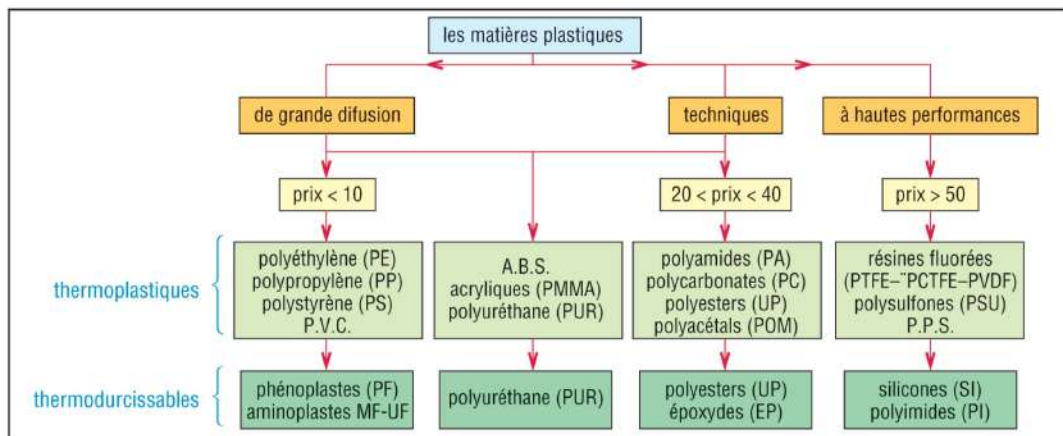
- Indiquer les propriétés et décrire les caractéristiques des principales familles de matières plastiques et d'élastomères.
- Retenir les désignations et les principales nuances normalisées.

Produites essentiellement à partir du pétrole, les matières plastiques sont l'un des symboles du XX^e siècle et sont présentes partout : automobile, aéronautique, biens de consommation et d'équipement, bureautique, audiovisuel, emballages, ... Vocabulaire : NF ISO 472.

La bakélite (1909) est le plus ancien plastique entièrement synthétique.

Le terme « plastique » décrit une grande variété de composés organiques obtenus par synthèse chimique. Il existe également des plastiques naturels : poix, bitume, brai, résines, laques, ambre, écaille, corne... Symboles, termes abrégés ; NF EN ISO 1043-1 et 2.

Voir aussi données environnementales page 596 et 597.



1. Principales matières plastiques.

I - Propriétés générales et structures

1. Principales caractéristiques

Faible densité (0,9 à 2,2), bonnes qualités d'isolation électrique et thermique, bonne résistance à un grand nombre de produits chimiques, pas d'oxydation comme certains métaux et ont un rapport volume/prix intéressant.

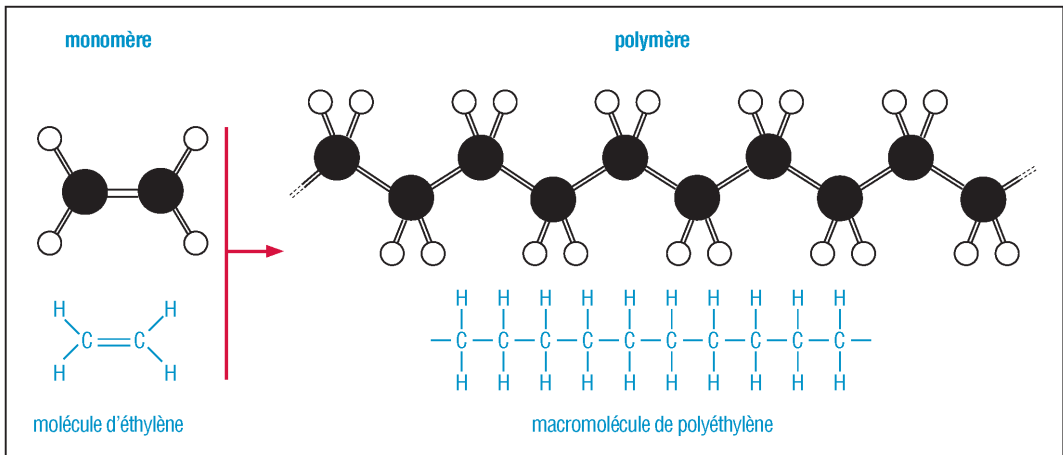
Inconvénients : parfois inflammables ; sensibles aux rayons ultra violets ; à l'humidité et non facilement recyclables.

2. Structures moléculaires

Les plastiques, ou « polymères », sont élaborés par synthèse chimique (construits chimiquement) à partir de molécules de base, appelées monomères.

Monomères : ce sont les unités chimiques de base, ou molécules, des matières plastiques. Ils sont construits autour des atomes de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N), chlore (Cl), soufre (S), fluor (F)...

Polymères : sous l'action de la pression, de la chaleur et d'un catalyseur, les molécules, ou monomères, se regroupent entre elles pour former de longues chaînes appelées polymères, ou macromolécules. Une macromolécule peut contenir de plusieurs centaines à plusieurs millions de monomères.



2. Structure moléculaire du polyéthylène.

Polymérisation : l'opération chimique liant les monomères entre eux, pour obtenir un polymère, est appelée polymérisation.

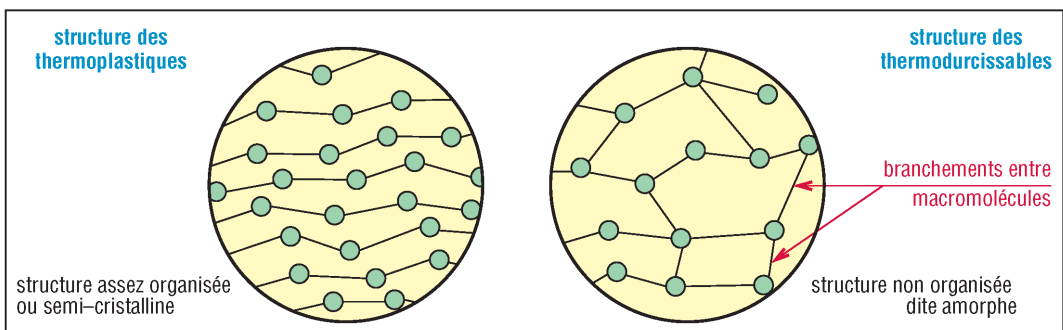
Copolymérisation : lorsque deux ou plusieurs polymères, de même nature ou non, sont liés entre eux chimiquement (branchements) l'opération est appelée copolymérisation.

Structure des thermoplastiques : le nombre des branchements entre macromolécules est faible ; celles-ci restent linéaires et séparées après moulage.

La structure obtenue, très serrée (forces élevées entre molécules et atomes) est semi-cristalline, bien organisée et proche de celle des métaux.

Structure des thermodurcissables : les branchements entre macromolécules, très nombreux, solidarisent irréversiblement les macromolécules entre elles (copolymérisation créant un réseau tridimensionnel). Dans la mesure où les branchements se font de manière aléatoire, au hasard, le matériau obtenu est dit amorphe ou « désorganisé », différent d'un réseau cristallin très organisé, avec des couches d'atomes bien rangés et empilées les unes sur les autres.

Remarques : certains plastiques, comme le polyester, existent dans les deux structures, thermodurcissable et thermoplastique.



3. Structure des matières plastiques.

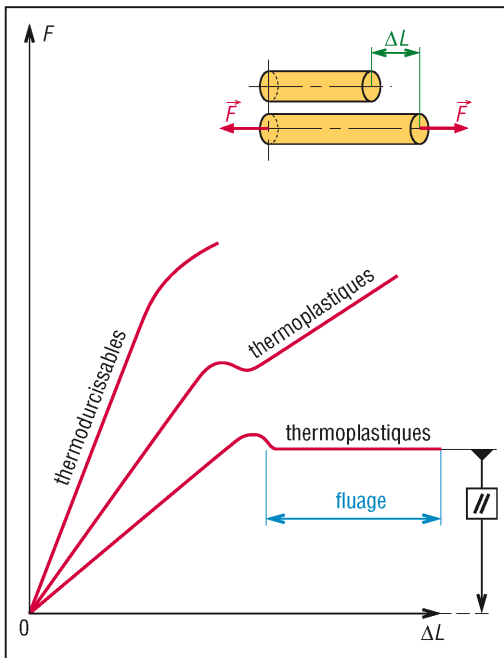
3. Propriétés mécaniques

Le comportement mécanique des plastiques est différent de celui des métaux. Il dépend de la structure, de la composition, du mode de fabrication, de la forme de la pièce, de la température, du temps et de l'humidité.

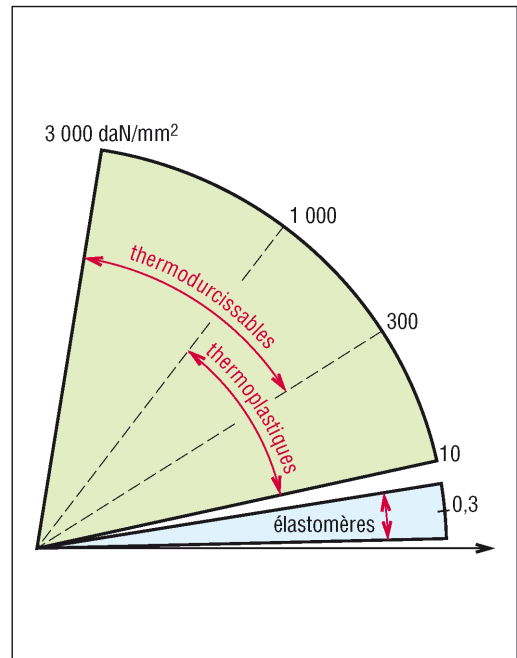
Le pourcentage d'allongement ($A\%$) est plus faible pour les thermodurcissables ($< 1\%$, se déforment peu avant rupture, sont plus fragiles et plus sensibles aux chocs) qui présentent aussi, en général, une dureté plus élevée.

La résistance en compression est souvent plus élevée que la résistance en traction : 50 à 100 % pour les thermoplastiques, parfois plus de 100 % pour les thermodurcissables.

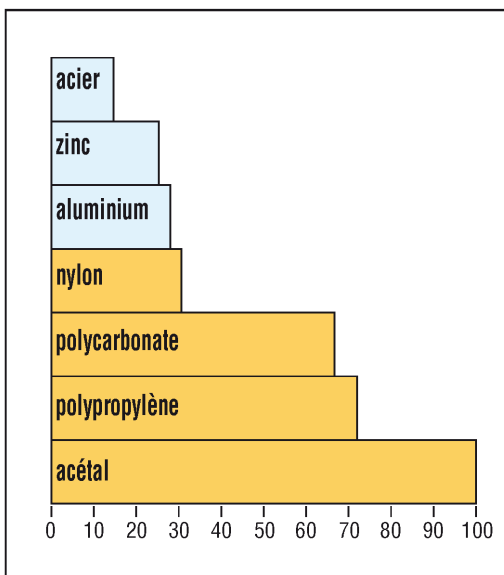
Sous charge, les plastiques se déforment instantanément dans un premier temps, comme un ressort, puis, contrairement au ressort, continuent à se déformer progressivement au cours du temps (« déformation retardée »). C'est le fluage, sorte d'écoulement très visqueux qui dure autant que la charge.



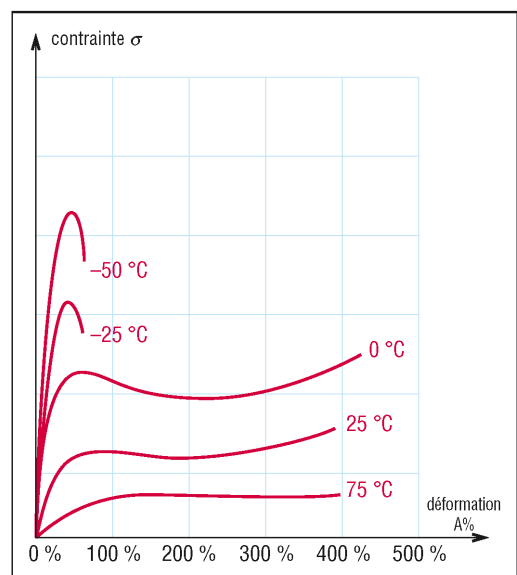
4. Phénomène de fluage au cours du temps.



5. Valeurs de E , module d'élasticité longitudinal.



6. Comparaison des dilatations thermiques entre métaux et plastiques.



7. Comparaison des courbes contraintes /déformation du polyéthylène.

4. Phénomène de fluage

Le fluage est l'une des caractéristiques essentielles des matières plastiques. Il peut être mis en évidence par un essai de traction.

À la mise en charge de l'éprouvette, un allongement dL_0 se produit instantanément. Si la charge (F) est maintenue, l'éprouvette continue progressivement de s'allonger au cours du temps (allongement retardé).

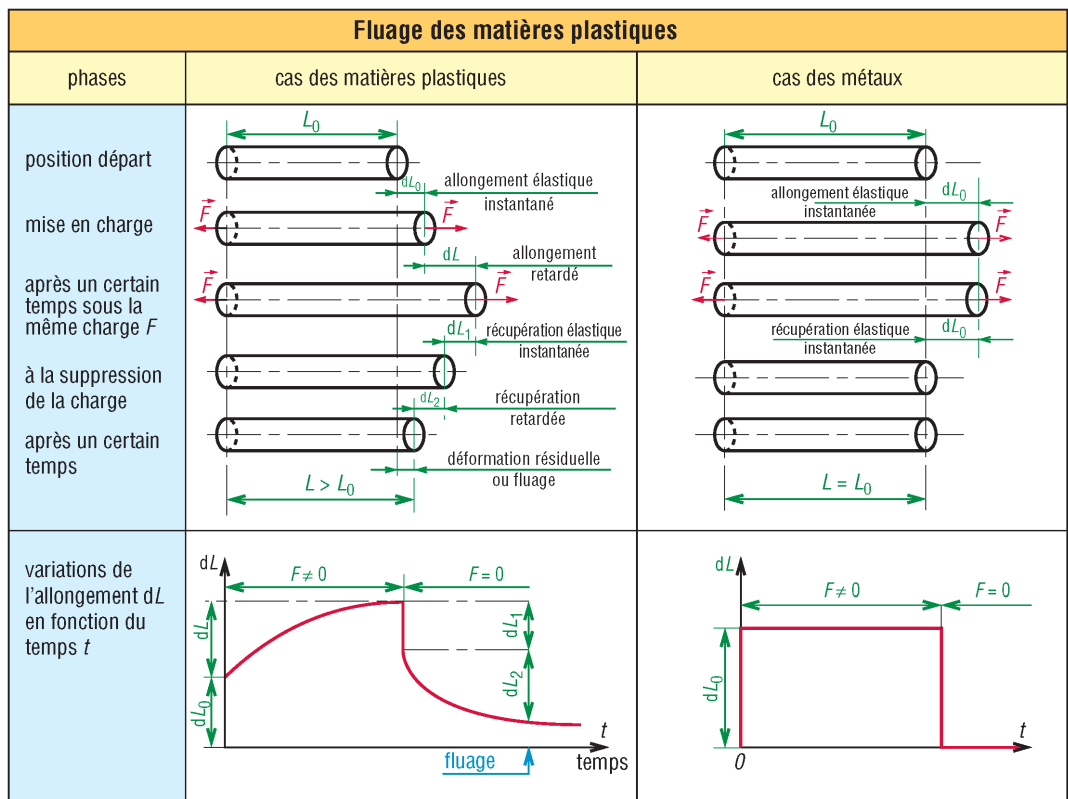
Plus la température est élevée, plus le phénomène est accentué.

Si la charge F est supprimée, le phénomène s'inverse, l'éprouvette récupère rapidement une partie de l'allongement réalisé (récupération instantanée), puis progressivement et plus lentement une autre partie (récupération retardée).

La déformation résiduelle qui subsiste mesure le fluage.

La destruction des liaisons, le glissement entre les macromolécules, le frottement interne retardant les déformations sont les principales causes du fluage. Le phénomène apparaît également pour des métaux travaillant sous charge à de hautes températures (fours, moteurs, réacteurs...).

Remarque : les fibres de renforcement (verre, kevlar, carbone...) permettent de corriger le phénomène de fluage (Voir chapitre 13, généralités matériaux, paragraphes composites).



8. Principe du fluage, comparaison avec les métaux se déformant élastiquement.

II - Thermoplastiques

C'est de loin la famille la plus utilisée : ils représentent près de 90 % des applications des matières plastiques. Ils sont moins fragiles, plus faciles à fabriquer (machine à injecter et cadences élevées) et permettent des formes plus complexes que les thermodurcissables.

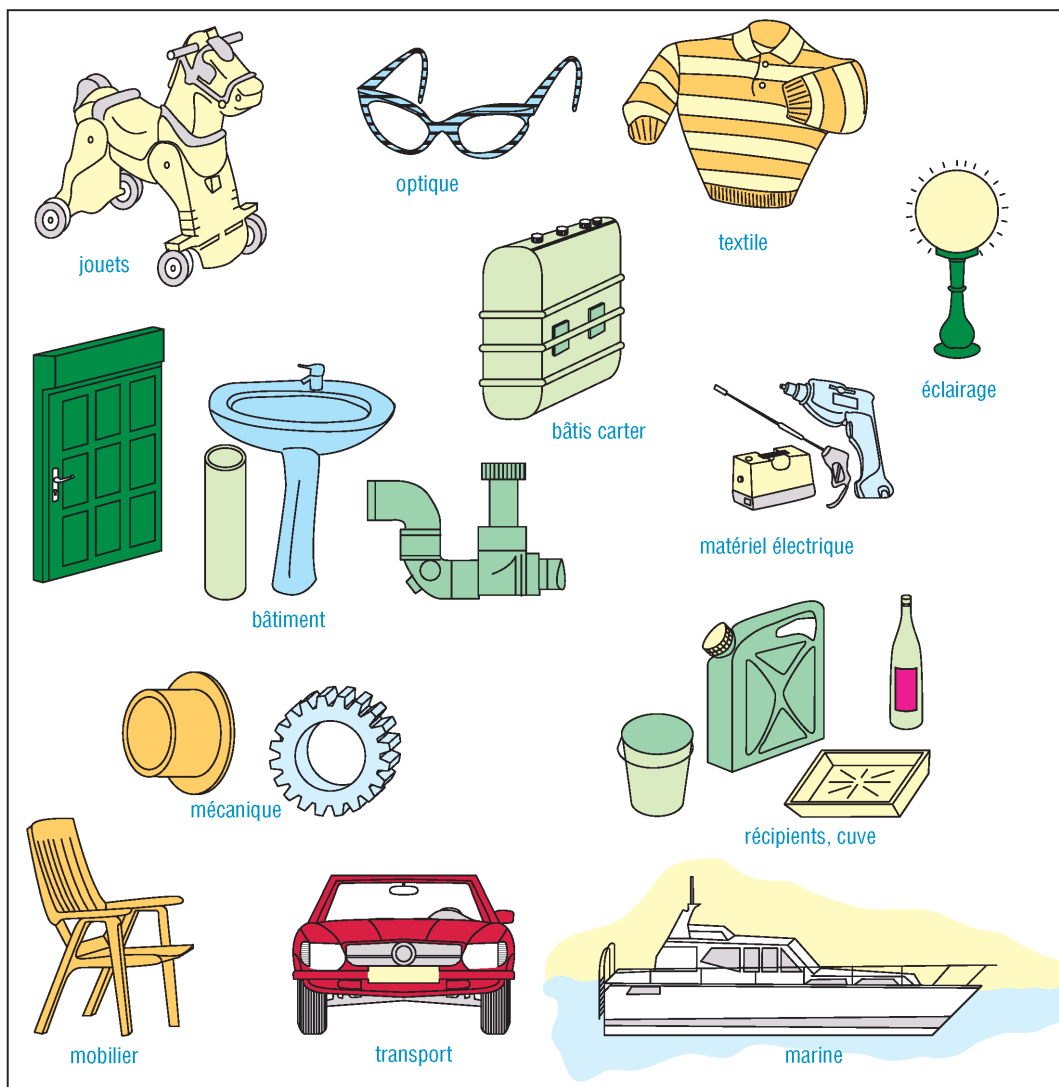
Ils existent sous forme rigide ou souple, compact ou en faible épaisseur, sous forme de feuille très mince (film...), de revêtement, expansé ou allégé...

1. Propriétés principales

Ils ramollissent et se déforment sous l'action de la chaleur. Ils peuvent, en théorie, être refondus et remodelés un grand nombre de fois tout en conservant leurs propriétés ; ils sont comparables à la cire ou à la paraffine.

Insensibles à l'humidité, aux parasites, aux moisissures (sauf polyamides) ils peuvent être fabriqués dans une gamme de couleurs très étendue.

Inconvénients : fluage élevé ; coefficient de dilatation linéaire élevé, entraînant un retrait important au moment du moulage ; combustible ; sensibles aux ultraviolets ; électrostatiques, qui « attirent les poussières » ; pas toujours agréables au toucher.



9. Familles d'objets utilisant des matières plastiques.

2. Principales familles

(Figure 1 : principales matières plastiques.)

a) Thermoplastiques de grande diffusion

À eux seuls, ils représentent de 70 à 80 % du total des plastiques mis en œuvre. On y trouve les polyéfines (polyéthylène, polypropylène), le polystyrène et les PVC (polychlorure de vinyle).

Remarque : les ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène) et les acryliques (polyméthacrylate de méthyle) sont, par leur prix et leur diffusion, à mi-chemin entre les précédents et les plastiques techniques.

b) Thermoplastiques techniques

Les polyamides, proche du nylon textile, sont les plus utilisés du groupe : ils comportent de nombreuses variantes, de bonnes caractéristiques mécaniques, et une bonne tenue aux températures.

Les polycarbonates sont transparents et résistants aux chocs (verres correcteurs, vitrage anti-effraction...).

Les polyesters, voisins des fibres textiles polyesters, sont transparents et imperméables aux gaz (applications voisines des polyamides).

Les polyacétals résistent à la fatigue, à l'eau et aux solvants (lave-linge, lave-vaisselle...).

c) Thermoplastiques hautes performances

Plus coûteux, ils sont caractérisés par leur résistance à la chaleur et par des propriétés électriques élevées. Les résines fluorées (PTFE, PCTFE, PVDF) sont les plus classiques ; elles résistent à presque tous les agents chimiques, ne vieillissent pas, ne brûlent pas, ont de bonnes qualités frottantes. Les polysulfones et les polysulfones de phénylène (PPS), plus récents, transparents, allient résistance à la température, propriétés mécaniques et électriques élevées.

| Principales matières plastiques | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|---------------|---------|-------------------------------|--|-----------------------------|-----------|------------------------|---------------------|----------------|------------------|----------------|----------|--------|---------|---------|-----------------------------|---------|-----|
| | symbole | (1) aspect | densité | températures limitées (°C) | caractéristiques mécaniques | | | | résistance chimique | | | | solvants | huiles | usinage | moulage | (3) exemples d'emploi | | |
| | | | | | R _r (daN/mm ²) | E (daN/mm ²) | A% (%) | chocs IZOD entallés | acides | | bases alcalis | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | (2) forts | (2) faibles | (2) forts | (2) faibles | | | | | | | |
| thermoplastiques | polyéthylène | basse densité | PE-LD | TRL-OQ | 0,92 | 100 | 0,5-3 | 20-40 | 200-600 | ne casse pas | F | B | B | B | B | B | B | B | ① ② |
| | | haute densité | PE-HD | TRL-OQ | 0,96 | 120 | 2-4 | 80-180 | 20-80 | | F | B | B | B | B | B | B | B | ③ ④ |
| | polypropylène | PP | TRP-OQ | 0,91 | 130 | 3-7 | 140-200 | 250-600 | 7-25 | F | B | B | B | B | B | B | B | ① ③ ⑥ | |
| | polychlorure de vinyle | rigide | PVC | TRP-OQ | 1,38 | 70 | 4-6 | 150-350 | 5-80 | 2-100 | | B | B | B | S | B | B | B | ① ③ |
| | | souple | | TRP-OQ | 1,20 | 70 | 1-3 | 1-4 | 150-450 | | | | | | | | | | ① |
| | polystyrène | PS | TRL-OQ | 1,05 | 80 | 3-7 | 200-320 | 5-75 | 3-20 | F | B | B | B | S | B | F | B | ① ② ③ ⑤ | |
| | ABS* | ABS | TRL-OQ | 1,10 | 110 | 3-6 | 200-250 | 10-50 | 10-50 | F | B | B | B | S | B | B | F | ① ② ③ | |
| | poly (méthacrylate de méthyle) | PMMA | TRP-OQ | 1,20 | 85 | 5-9 | 220-320 | 4-10 | 2-3 | F | B | S | F | F | B | B | S | ② ③ ⑤ ⑥ | |
| | acétate de cellulose | CA | TRP-OQ | 1,30 | 90 | 3-6 | 80-250 | 20-50 | 6-45 | S | F | F | F | | B | B | B | ① ② ③ ⑤ | |
| | polyamide | PA | TRP-OQ | 1,15 | 160 | 5-10 | 90-280 | 15-300 | 3-50 | S | B | B | B | B | B | B | B | ① ③ ④ | |
| | polycarbonate | PC | TRP-OQ | 1,20 | 130 | 5-7 | 240-280 | 80-120 | 65-100 | F | B | S | F | F | B | B | B | ① ② ⑤ | |
| | polyoxyméthylène*** | POM | TRL-OQ | 1,40 | 90 | 6-7 | 300 | 35-75 | 5-15 | S | B | F | F | B | B | B | B | ① ③ ④ | |
| polytétrafluoroéthylène | PTFE | OQ | 2,20 | +260 -200 | 2-4 | 35-80 | 250-500 | 16 | B | B | B | B | B | B | B | - | ④ ⑥ | | |
| thermodurcissables | phénoplastes** | PF | TRP-OQ | 1,3 | 190 | 3-6 | 270-800 | 1-3 | | S | F | S | S | S | | B | B | ① ② | |
| | polyesters non saturé | UP | TRP-OQ | 1,2 | 190 | 5-15 | 280-400 | 1-3 | 8-100 | S | F | S | F | F | | F | B | ② ③ | |
| | polyépoxydes | EP | TRL-OQ | 1,5 | 280 | 2-12 | 250-400 | 2-15 | 2-50 | F | B | F | B | B | B | B | B | ② ③ ⑥ | |
| | polyimides | PI | | 1,6 | 250 | 2-10 | 250-500 | 2-10 | | B | B | B | B | B | B | B | B | ① ⑦ | |
| | silicones | SI | OQ | 1-2 | 230 | 2-5 | 350-800 | 1-5 | | F | B | F | F | F | F | F | B | ⑦ | |

(1) TRL : translucide
TRP : transparent
OQ : opaque

(2) B : bon
F : faible à moyen
S : mauvais (soluble)

(3) ① : pièces mécaniques (engrenages, cames, rotors)
② : petits carter, boîtiers, jouets, petit outillage
③ : grands bâtis, cuves, containers, réservoirs, coques
④ : pièces de frottement (coussinets, paliers, glissières)
⑤ : pièces pour l'optique (vitres, luminaires, diffuseurs)
⑥ : applications chimiques, thermiques
⑦ : enrobage, étanchéité, isolant

* acrylonitrile butadiène styrène

** résine phénol formaldéhyde

*** polyoxyméthylène, polyacétal, polyformaldéhyde

III – Thermodurcissables

Ils ne ramollissent pas et ne se déforment pas sous l'action de la chaleur. Une fois créés il n'est plus possible de les remodeler par chauffage.

Au moment de la mise en œuvre, ils ramollissent dans un premier temps, puis durcissent de manière irréversible sous l'action prolongée de la chaleur (comparable à la cuisson du blanc d'œuf).

1. Propriétés principales

Ils présentent une bonne tenue aux températures élevées ($> 200\text{ °C}$), aux attaques chimiques, une meilleure résistance au fluage que les thermoplastiques (conservent une meilleure stabilité dimensionnelle dans le temps), une bonne rigidité pour un prix de matière première peu élevé et faible retrait au moulage.

Inconvénients : mise en œuvre moins pratique et plus lente que les thermoplastiques ; pas de moulage par injection et cadences de fabrication assez faibles.

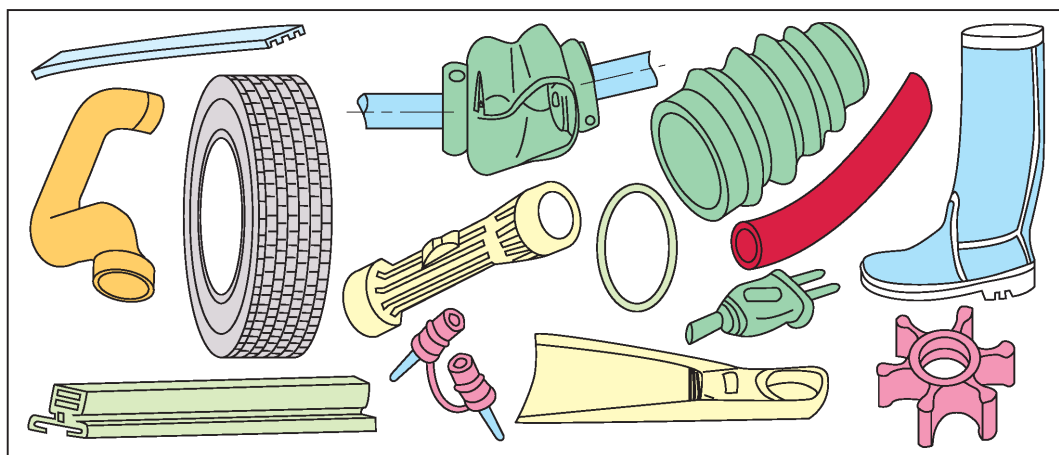
2. Principales familles

- Les phénoplastes (PF) noirs ou bruns (« bakélite ») et les aminoplastes blancs ou crème (urée formaldéhyde UF, mélamine-formol MF) sont les plus courants et les moins coûteux.
- Les époxydes (EP), les polyesters (UP) et les polyuréthanes (PUR) peuvent être classés dans le groupe des plastiques techniques.
- Pour les hautes performances, plus coûteux, on a les polyimides PI, qui conservent leurs propriétés mécaniques et électriques au delà de 300 °C , et les silicones SI, qui résistent à la chaleur et ont des propriétés mécaniques élevées.

IV – Élastomères ou caoutchoucs

Ils sont obtenus par synthèse chimique, comme les plastiques, et possèdent des propriétés comparables à celles du caoutchouc naturel. Le néoprène (1930) fut le premier caoutchouc de synthèse.

Applications : pneumatiques, courroies, tapis, tuyaux, amortisseurs, joints d'étanchéité, revêtements divers, pièces mécaniques, chaussures...



10. Exemples d'objets en élastomères ou en caoutchoucs.

1. Principales caractéristiques

La propriété la plus remarquable est l'élasticité ou la capacité à s'allonger sans se rompre ($A\%$ très élevé, jusqu'à 1 000 %). À l'opposé le module d'élasticité longitudinal E reste très petit ($< 10 \text{ N/mm}^2$: près de 200 000 pour les aciers) traduisant une faible rigidité.

2. Caoutchoucs vulcanisés (réticulés)

Ce sont les plus traditionnels. La vulcanisation consiste à incorporer du soufre au caoutchouc afin d'améliorer la résistance tout en maintenant l'élasticité. Ils peuvent être extrudés ou moulés.

Principales nuances : caoutchouc naturel, nitrile (NBR), butyl, chloroprène, EPDM (éthylène propylène), SBR (styrène-butadiène), Fluorés (FKM, ancien FPM).

| | | Principaux caoutchoucs vulcanisés | | | | | |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------|---------------------------|-----------------------------|
| | | caoutchouc naturel NR | butadiène styrène SBR | acrylonitrile butadiène NBR | butyl IIR | chloroprène (néoprène) CR | éthylène propylène EPM-EPDM |
| propriétés mécaniques | traction | +++ | ++ | ++ | + | ++ | + |
| | déchirement | ++ | + | 0 | 0 | + | ++ |
| | abrasion | +++ | ++ | ++ | + | + | ++ |
| | compression | ++ | ++ | +++ | + | + | ++ |
| | résilience | +++ | ++ | 0 | 0 | ++ | 0 |
| résistance au vieillissement | flexion | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | 0 |
| | ozone-intempéries | + | + | + | ++ | ++ | +++ |
| | chaleur | + | + | + | ++ | + | +++ |
| | froid | +++ | ++ | 0 | + | 0 | +++ |
| résistance chimique | flamme | 0 | 0 | 0 | 0 | ++ | 0 |
| | huiles et graisses minérales | + | + | +++ | + | ++ | + |
| | solvants | 0 | 0 | +++/0 | 0/+ | 0 | 0 |
| | eau | ++ | ++ | +++ | +++ | + | +++ |
| | imperméabilité aux gaz | + | + | ++ | +++ | + | 0 |
| | acides | ++ | ++ | + | +++ | ++ | +++ |
| | carburants pétroliers | + | + | +++ | + | ++ | + |

3. Caoutchoucs thermoplastiques

Plus récents, ils ont les qualités des élastomères vulcanisés haut de gamme avec en plus la simplicité de mise en œuvre des plastiques thermoplastiques (moulage par injection, pas de vulcanisation). Voir aussi NF EN ISO 18064.

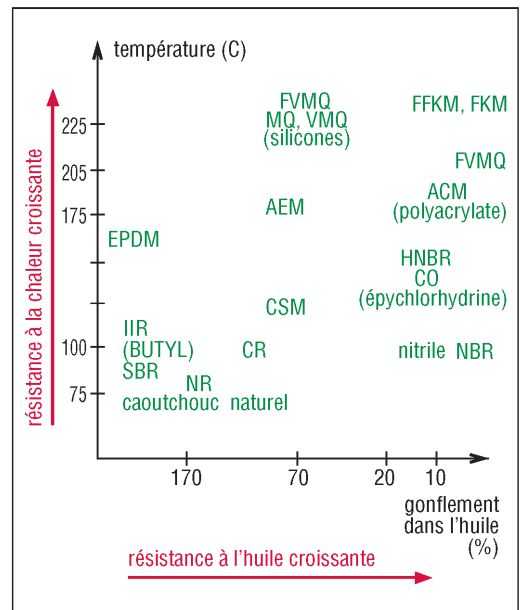
Principales nuances (NF ISO 1629) :

Polyuréthane (AU) : grande dureté, résistance à l'abrasion et au déchirement, faible tenue à la chaleur et à l'humidité.

Polyacrylates (ACM) : résistance aux températures, à l'huile et à l'ozone de l'air, faible tenue à l'eau, acides et bases.

Silicones (VMQ et PVMQ) : résistent aux hautes et basses températures tout en conservant une bonne résistance mécanique, mais tenue moyenne à l'huile.

Fluorosilicones (FMQ et FVMQ) : mêmes caractéristiques que les silicones avec une meilleure résistance à l'huile.



11. Résistance à l'huile et à la chaleur des principaux élastomères.

Remarques : les élastomères fluorés présentent une des meilleures résistances à la chaleur, aux hautes températures et aux fluides, particulièrement dans l'air et dans l'huile. Voir page 416.

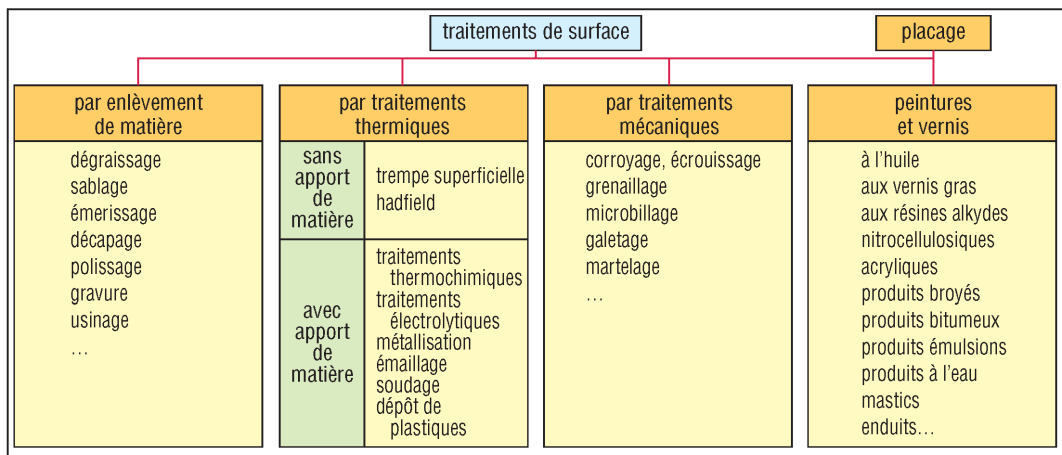
19

TRAITEMENTS DE SURFACE

OBJECTIFS

- Indiquer les principaux traitements de surface et donner les caractéristiques des traitements thermiques de surface, des traitements électrolytiques, de la métallisation...
- Fournir des éléments sur les peintures et les vernis.

Les traitements de surface sont utilisés pour modifier les caractéristiques de la surface d'une pièce dans le but de lui donner des qualités nouvelles : améliorer les propriétés mécaniques (dureté, frottement, résistance à l'usure, au grippage, à la fatigue...), la résistance à la corrosion, l'esthétique et certains comportements (conductivité électrique, réflexion de la lumière, conduction de la chaleur, isolation thermique ou aux rayonnements...).



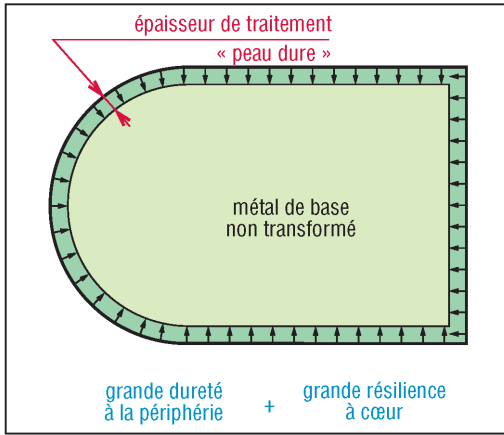
1. Traitements de surface (vocabulaire revêtements défini par l'ISO 2080). Voir aussi NFA 91-010.

I - Traitements thermiques de surface

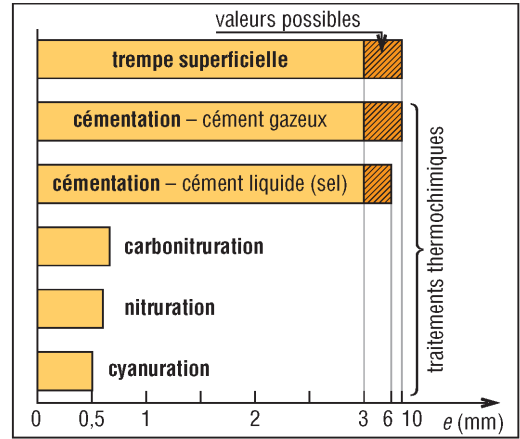
Les traitements se développent de la surface vers l'intérieur de la pièce sur une couche de faible épaisseur. Prescriptions NF A 02-052 ; Indications NF ISO 15787 (page 76).

Le plus souvent ces traitements sont des durcissements superficiels permettant de conserver à cœur les propriétés du métal de base, avec une ductilité et une résilience plus élevées : « peau dure et cœur tendre ».

Ils évitent l'emploi d'aciers fortement alliés en rendant possible l'utilisation d'aciers moins coûteux comme certains C et certains aciers faiblement alliés.



2. Principe des traitements de surface.



3. Épaisseurs traitées possibles suivant le procédé.

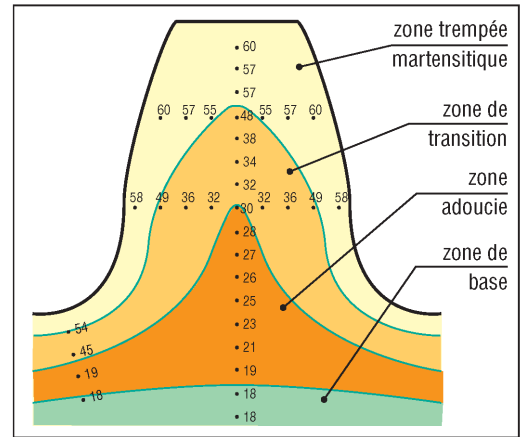
1. Trempe superficielle

C'est une trempe réalisée uniquement en surface. Le chauffage est effectué par induction (traitements locaux, formes irrégulières : cames, dents...) ou au chalumeau (grandes pièces) et le refroidissement par aspersion ou immersion.

Le procédé est bien adapté à la fabrication en série : portées de vilebrequin, arbres à cames, dents d'engrenage...

Matériaux utilisés :

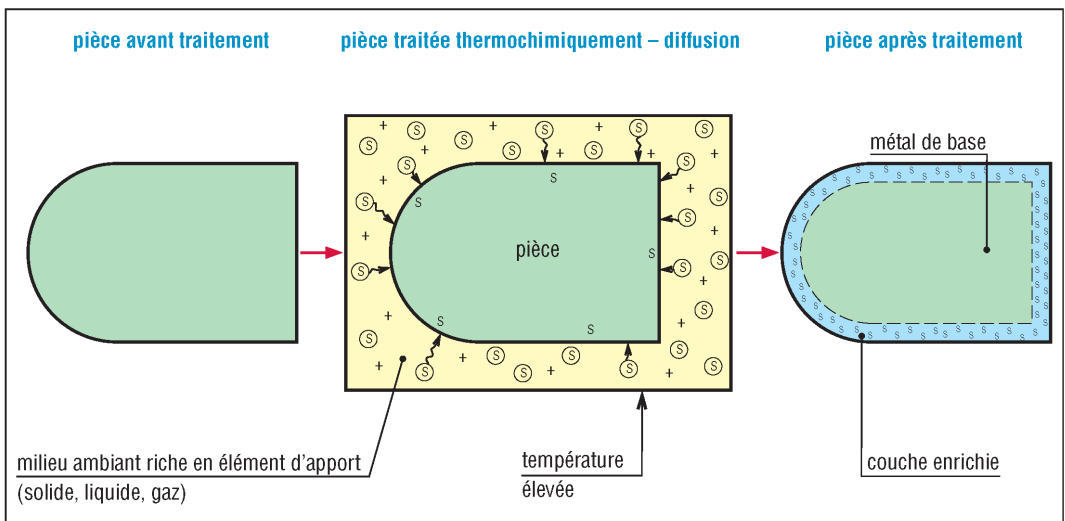
aciers (3C42 (XC42), 35CrMoS4, 42CrS4, 42CrMoS4, 45MnS4, 52MnS4...) et fontes (GJL300, GJS600-3).



4. Évolution de la dureté (HRC) d'une dent d'engrenage trempée superficiellement par induction.

2. Traitements thermochimiques

Les traitements sont obtenus avec apport en surface par diffusion chimique, sous l'action de la chaleur, d'un ou plusieurs éléments d'addition comme le carbone, l'azote, le soufre...



5. Principe des traitements thermochimiques.

a) Cémentation

Traitement le plus classique, il consiste en un apport de carbone dans la surface de la pièce, suivi d'un durcissement par trempe. Pendant le traitement, la pièce est maintenue en contact avec un corps, solide, liquide ou gazeux, riche en carbone.

L'enrichissement de la surface en carbone rend possible la trempe des aciers utilisés, non trempables au départ. Duretés atteintes : 800 à 850 HV.

Aciers utilisés : 2C10, 2C22 (températures de cémentation élevées $\approx 925\text{ }^{\circ}\text{C}$) ; 10NiCr6, 16NiCr6, 20 NiCr6, 18NiCrMo6, 16MnCr5, 20MnCr5, 18CrMo4 (températures plus basses et caractéristiques à cœur supérieures)...

Inconvénient : les pièces traitées ont tendance à se déformer et à gauchir.

Procédés dérivés : shéardisation (apport de zinc protégeant contre la corrosion), calorisation (apport d'aluminium, utilisé en décoration), boruration (B), aluminisation (Al)...

b) Nitruration

Elle donne une plus grande dureté que la cémentation et amène moins de risques de déformations et de gauchissement des pièces traitées.

Elle est obtenue par diffusion d'azote (N) en surface (pièce en contact avec de l'ammoniaque craquée NH_3 vers $560\text{ }^{\circ}\text{C}$), suivi d'un refroidissement lent.

Le durcissement n'est pas obtenu par trempe superficielle mais par formation de nitrures (fer, chrome et aluminium). Duretés atteintes : 1 100 à 1 200 HV.

Aciers traités : aciers faiblement alliés (généralement trempés et revenus à cœur) : 31CrMo12 ; 32CrAlMo7-10 ; 33CrMoV12-9 ; 41CrAlMo7-10 ; ... NF EN 10085.

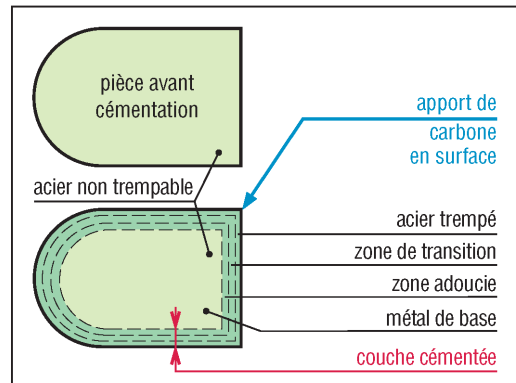
Variantes : nitrocarburation (N+C), oxynitruration (N+O), sulfonitrocarburation (N+C+S)...

c) Carbonitruration

Le traitement est un mélange de cémentation et de nitruration. Il y a apport, en surface, de carbone et d'azote par chauffage dans une atmosphère gazeuse, entre 600 et $900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

L'opération est généralement suivie par une trempe, parfois par un refroidissement lent ; avec 15 % d'ammoniaque, la trempe n'est pas nécessaire ; elle l'est avec 1 %. Duretés atteintes : 900 à 950 HV.

Procédés dérivés : cyanurisation (carbone remplacé par le cyanure), sulfocarbonitruration (apport de soufre et de carbone)...



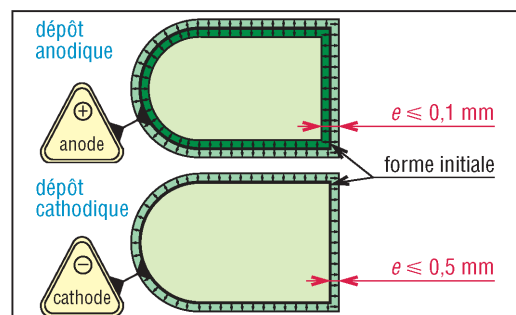
6. Principe de la cémentation.

II - Traitements électrolytiques

Dépôts par voie humide, deux cas possibles : dépôt anodique et dépôt cathodique. Voir aussi NF EN ISO 27830, NF A 91-010.

1. Dépôt anodique (électrolyse anodique)

La pièce est liée à l'anode et la formation du composé en surface se développe à la fois vers l'intérieur et vers l'extérieur de la surface traitée (épaisseur 0,01 à 0,1 mm environ).



7. Principe de déposition des traitements électrolytiques.

2. Dépôt cathodique (électrolyse cathodique)

La pièce est liée à la cathode et le dépôt de matière (métal d'apport) se développe uniquement de la surface vers l'extérieur (épaisseur 0,5 mm environ).

Autres cas que ceux du tableau, protégeant contre la corrosion et pour décoration : chromage (non dur dépôt $\leq 1 \mu\text{m}$ si couche intermédiaire (cd...)), nickelage, zingage, étamage, cuivrage (sert de « sous couche »), cadmiage (pour visserie et boulonnerie), dorure (or)...

| Traitements de surface par traitements thermiques | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------|----------|
| traitement | élément d'apport | matériaux traités | épaisseur traitée (mm) | température (°C) | propriétés principales : amélioration de | | | | | | | (*) exemples d'emploi | | |
| | | | | | densité en surface | résistance à l'usure - abrasion | résistance au grippage | résistance à la corrosion | résistance à la fatigue | pression de contact admissible | diminution du frottement | | | |
| transformation de structure | trempe superficielle | aucun | ferreux | | $A_3 + \theta$ $50 < \theta < 200$ | + | + | | | | + | + | ① ② ③ | |
| | hadfield-HEF | aucun | aciers au manganèse | | 190 | + | + | | | | | + | ② ③ ④ | |
| traitements thermochimiques | cémentation | carbone | aciers de cémentation | 0,5 à 1 | 925 à 950 | + | + | | | | + | + | ① ② ③ ④ | |
| | shéardisation NF EN 13811 | zinc | ferreux | 0,01 à 0,08 | 320 à 419 | | + | | + | | | | ① ② ④ ⑤ | |
| | nituration NF A 02-052 | azote | aciers de nutrition + fontes | 0,1 à 0,7 | 550 | + | + | | + | + | | | ① ② ③ ④ ⑥ | |
| | carbonituration | carbone + azote | aciers cém. et nitur. | 0,05 à 0,5 | 600 à 900 | + | | | + | + | | | ① ② ⑤ | |
| | sulfonituration (haute température) | soufre + azote | tous les ferreux | 0,02 à 0,03 | 570 | | + | + | + | | | + | ① ② ④ ⑤ | |
| | phosphatation NF EN 12476 | phosphates | ferreux aluminium | 0,003 à 0,015 | 40 à 90 | | + | + | + | | | + | ④ ⑧ ⑤ | |
| | boruration | borures | ferreux | 0,05 à 0,35 | 800 – 1050 | | + | + | | | | | ⑥ ⑦ | |
| traitements électrolytiques | anodiques | chromisation | chromes (carbures) | aciers fontes | 0,01 à 1 | 1075 | | + | + | | | | ⑥ ⑦ | |
| | | anodisation ISO 10074 (**) | alumine Al_2O_3 | aluminium | 0,05 à 0,06 | -5 à 98 | + | + | | | | + | ② ③ ⑥ | |
| | cathodiques | cadmiage NF EN 2133 | cadmium Cd | acier Cu, Ni | 0,005 à 0,03 | | | | + | + | | | | ② ⑤ etc. |
| | | sulfination (basse température) | FeS | ferreux | 0,007 à 0,008 | 190 | | + | + | | | | + | ① ② ③ |
| | | chromage dur ISO 6158 (**) | chrome | aciers, alu. cuivreux, zinc | 0,01 à 0,5 | < 100 | | + | + | + | | | + | ⑨ ② ④ ⑩ |
| | | forez | [Cu + Sn] | ferreux | 0,03 à 0,15 | 550 | | + | | + | | | + | ① ② ④ ⑥ |
| | | stanal (étamage) | Sn | ferreux | 0,01 à 0,03 | 570 | | + | + | + | | | | ② ④ |
| | | delsun | étain (Sn) | cuivreux | 0,015 | 420 | | + | + | | | | + | ④ ⑧ |

- (*) ① : engrenages
 ② : axes, arbres, broches
 ③ : cames
 ④ : bagues, paliers, galets
 ⑤ : visserie

- ⑥ : glissières
 ⑦ : outils coupants
 ⑧ : bâtis, carters, matrices
 ⑨ : pièces de frottements
 ⑩ : restauration de surfaces

(**) Non décoratif, à usage industriel (usure, abrasion...), pas de couche intermédiaire (sur métal de base)

III – Métallisation – Dépôts par voie sèche

Elle consiste en un dépôt de métal fondu (zinc, étain, aluminium, plomb...) ou de céramiques sur la surface à traiter. Il existe de nombreux procédés (NF EN 657, etc.). Voir aussi normes sur la projection thermique NF EN ISO 14920 à 14923.

1. Métallisation par trempage

La pièce à traiter est trempée dans un bain de métal fondu. **Exemples** : galvanisation ou dépôt de zinc, étamage à chaud, aluminage, plombage...

2. Métallisation au pistolet, vers 2 760 °C

Le métal d'apport (barre, fil, poudre...) est fondu (résistance, flamme...), puis projeté sur la pièce par soufflage (air comprimé). **Exemples** : Zinc, cuivre, bronze, laiton, Al, Sn...

3. Métallisation au plasma d'arc, vers 16 700 °C

Elle permet des dépôts de céramique, tungstène, carbure, molybdène, nickel, chrome... Un arc électrique entre deux électrodes chauffe un gaz (argon, ...); il en résulte une accélération des particules du gaz (éjection supersonique). Une poudre de la matière à déposer est injectée dans le gaz puis projetée sur la pièce à traiter.

4. Métallisation en chambre fermée (vide...)

Le dépôt est effectué en phase gazeuse, par condensation ou vaporisation (plasma) et ionisation de très petites particules dans un milieu gazeux raréfié ou sous vide selon plusieurs techniques. Il est possible de revêtir pratiquement tous les matériaux, les installations sont coûteuses.

Exemples : CVD (Chemical Vapor Deposition : dépôt après réaction chimique à température élevée entre plusieurs substances gazeuses) ; PVD (Physical Vapor Deposition : dépôt par condensation après vaporisation de la substance).

Applications : semi-conducteurs, outils de coupe, verre, textile, matières plastiques, verre, papier...

IV – Dépôts particuliers

Émaillage : dépôt (≈ 800 °C) sur métal ou céramique. L'émail est un composé de verre, flux, opacifiant et colorants. Caractéristiques : grande durabilité ; résistance aux rayures, aux agents chimiques, à la chaleur et facile à nettoyer. Essais : NF EN ISO 4528. Applications : sanitaire, électroménager, chimie, carrelages, panneaux décoratifs...

Vitrification (glaçage) : semblable à l'émaillage avec présence d'agents de renforcement et d'agents matifiants pour réduire le brillant. La surface est dure, facile à nettoyer, étanche à l'eau et décorative. Applications : vaisselle, objets d'art, carrelage, instruments scientifiques, sanitaire...

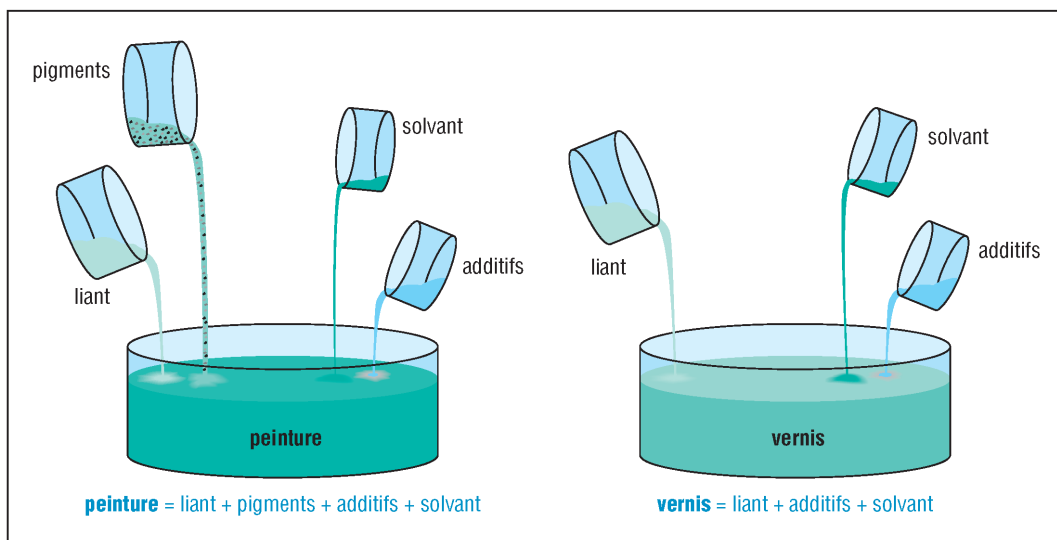
Dépôts chimiques : par réaction chimique ou électrochimique (sans apport de courant électrique) dans un bain approprié. **Exemples** : Ni, Sn, Cu, Cr (chromatation ou chromatage).

V – Revêtements organiques ; peintures et vernis

Couramment utilisés, leur rôle est essentiellement protecteur (corrosion, humidité, agents chimiques...), décoratif (couleur, brillance...) et lié à l'assainissement (anti-salissures, moisissures...).
Essais de séchage : NF EN ISO 9117-1 à 3.

1. Constitution des peintures et des vernis

Une peinture se compose de liants, de pigments et d'additifs, destinés à améliorer les caractéristiques, le tout étant mélangé avec un solvant. Définitions : NF EN ISO 4618.



8. Principaux constituants des peintures et des vernis.

Liants : naturels ou synthétiques, ils durcissent la peinture. Leur action est comparable à celle du ciment. Ils donnent ses principales propriétés au revêtement et classent les peintures.

Principaux liants : huiles, oléorésines et résines : alkydes, phénoliques, époxydes, à l'eau, polyuréthanes, vinyliques, acryliques, cellulosiques...

Pigments : matières colorantes d'origine métallique, minérale ou organique ; ce sont des poudres fines insolubles ayant un pouvoir opacifiant et assurant la cohésion du film. Leurs propriétés sont très diverses : protection (anticorrosion, anti-moisissures...), optique (luminosité, phosphorescence...) et décoration.

Exemples : dioxyde de titane, oxyde de zinc, oxyde de plomb...

Remarque : les peintures mates ont beaucoup plus de pigments que les peintures brillantes et les vernis.

Solvants : ils donnent sa fluidité (« amincissent ») à la peinture, la rende plus facile à poser et accroissent le pouvoir de pénétration. Ils se présentent sous la forme d'un liquide volatil ayant la propriété de dissoudre totalement le liant. Ils s'éliminent au séchage ; aussi appelés diluants.

Principaux solvants : white-spirit, eau, alcool, essence de térébenthine, etc.

Additifs (colorants, plastifiants, adjuvants, matières de charge...) : ils complètent et améliorent les caractéristiques finales du produit : couleur, séchage, anti-rayures, anti-oxydation, anti-mousses, fongicides, résistance au feu, isolation acoustique, épaissi ou allégé, diminue le prix...

2. Film organique, revêtement ou feuil

La couche « de peinture », ou feuil, peut être obtenue de trois manières au moment du séchage.

a) Par polymérisation, à partir du liant

Après application « le séchage » est obtenu sans évaporation du solvant. Les molécules s'agglomèrent les unes aux autres en créant de longues chaînes de polymères ou macromolécules (analogie avec les matières plastiques). Beaucoup de vernis sèchent de cette façon.

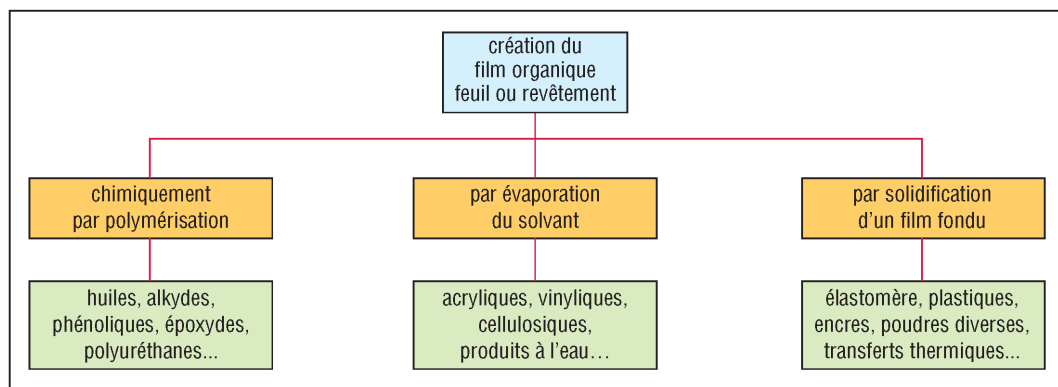
b) Par évaporation du solvant

Les polymères, ou macromolécules, existent déjà en suspension (mêlés) dans le solvant qui s'évapore après application. La plupart des peintures sèchent de cette façon.

c) Par solidification d'un film fondu

Les polymères sont d'abord fondus par chauffage puis déposés sur la pièce à traiter. Le séchage s'obtient, au refroidissement, par solidification du film (analogie avec certaines colles).

Remarque : dans tous les cas, la taille, la croissance, la vitesse de formation des polymères et le séchage sont contrôlables en utilisant un catalyseur et/ou un chauffage.



9. Modes d'obtention du film organique ou de la « couche ».

3. Principaux produits

Un film ou feuil de peinture se compose de plusieurs couches compatibles, de nature et fonction différentes, complémentaires (protection, couleur...) et déposée l'une après l'autre.

Primaires : produits de première couche appliqués directement sur le support ou subjectile, ils assurent le contact et l'adhérence avec éventuellement d'autres propriétés (anticorrosion...); sur un support absorbant (bois, maçonnerie...) on parle aussi d'impression.

Produits acryliques : en suspension ou en émulsion dans un solvant (eau...), ils sèchent rapidement, avec peu d'odeurs, par évaporation de celui-ci. Ils sont faciles d'emploi, durables, résistent bien aux intempéries et au soleil (ultraviolets). Ils sont plus stables que les vinyliques.

Les peintures et laques acryliques sont parmi les plus utilisées pour le bâtiment, l'habitat, l'automobile et l'aéronautique, en extérieur et en intérieur.

Produits cellulosiques : c'est un mélange de nitrocellulose, résines diverses, plastifiants et solvant à séchage rapide. Utilisations : laques à séchage rapide, peintures à effets craquelés et martelés, peintures pour retouches...

Produits à l'huile : les liants (huiles de lin, oléorésines...) polymérisent sous l'action de l'oxygène de l'air et assurent une bonne étanchéité. Le temps de séchage est long, plusieurs jours avec des odeurs. Les couleurs claires ont tendance à jaunir. Font partie des résines alkydes.

Applications : grandes surfaces (bois, plâtre, ferreux) où le séchage n'est pas une priorité.

Produits phénoliques : résistent à l'humidité et aux intempéries. Ils sont le plus souvent mélangés avec des huiles siccatives pour produire des vernis (bateaux, ponts...).

Produits au polyuréthane : la polymérisation, réalisée avec un catalyseur, est activée par l'humidité de l'air. Ils résistent aux frottements, aux intempéries et aux attaques chimiques.

Utilisations : produits de finition (vernis, vitrificateurs, peintures pour sols...).

Produits aux résines alkydes : ce sont les produits de polymérisation les plus utilisés (peintures, laques, vernis). Ils sont obtenus par polycondensation de polyacides, d'acides gras (huiles) avec des polyalcools (exemples : peintures glycérophtaliques...).

Les produits ont une durabilité moyenne, résistent assez bien à l'humidité, au soleil et aux intempéries ; leur temps de séchage est de quelques heures.

Applications très diverses : peintures pour bois, métaux, déco, produits antirouille, etc.

Produits vinyliques : ils sèchent par évaporation du solvant. Les finitions sont intéressantes pour les applications en milieux humides ; les résines polyvinyliques sèchent mal en air sec.

Produits aux silicones : les silicones utilisés avec d'autres résines résistent à des températures élevées (≈ 370 °C). Leur prix est élevé. Utilisations : peintures pour fours, étuves...

Produits bitumeux : à base de résines synthétiques, bitumes, brais de pétrole, ils résistent à l'humidité, à la corrosion et sont peu décoratifs. Utilisations : étanchéité, isolation, protection des alliages ferreux, des murs, des fondations...

| Principaux produits de peintures – Définitions- (NF DTU 59.1, NF EN ISO 4618, NF T 36-005...) | | |
|---|--|--|
| Types de produits | Subdivisions ou catégories | Utilisation |
| Peintures (en général) en feuil mince ou semi-épais | produits à l'eau, les alkydes, polyesters et polyéthers, celluloseux, vinyliques, acryliques, élastomères, bitumeux... | peintures à l'eau (silicatées, chaulées...); à l'huile ou vernis gras; alkydes modifiés ou non (glycéro...); anticorrosion; primaires; les pigmentées; vernis... |
| Lasures | comme les peintures en peu pigmentées et presque transparentes. | lasures pour le bois: menuiseries (intérieures ou extérieures), pour bardage, pour clôture... |
| Feuil épais ou semi-épais | e > 0,400 mm; produits vinyliques; acryliques et autres (silicates...) | revêtements et peintures pour façades de bâtiment, d'ouvrages, enduits... |
| Enduits de peintures préparatoires et/ou décoratifs | enduits gras, maigres, de résine; enduits à base de chaux, ciment, plâtre, colle, caséine, liants organiques; enduits en solvant ou à l'eau... | pour intérieur (pièce sèche ou humide) ou extérieur (façades...); rebouchage; ragréage, réparation; dégrossissage, surfacage; décoration |
| Autres enduits et mastics | à l'huile, aux vernis gras, liants organiques, chaux, ciment, plâtre... | mastics de vitrerie; enduits divers pour carrosserie, pour bois, pour extérieurs... |
| Produits bitumeux | à base de bitume (naturel, pétrole...), de brai (houille, modifié aux résines...) | enduits et mastics applicables à froid; applicables à chaud... |

– **Subjectile** : surface sur laquelle est appliquée ou doit être appliquée un produit de peintures (liquide ou en pâte ou en poudre).
 – **Feuil (ou revêtement)**: dépôt continu constitué de plusieurs applications (couches) d'un produit de peinture appliqué sur un subjectile.
 – **Couche** : dépôt continu d'un produit de peinture effectué au cours d'une seule opération.
 – **Peinture** : produit de peinture pigmenté formant sur le subjectile un feuil opaque ayant des qualités protectrices, décoratives ou techniques.
 – **Lasure** : peinture très peu pigmentée, utilisée pour former un feuil transparent ou semi-transparent pour la décoration et/ou la protection.
 – **Vernis** : produit de peinture transparent séchant exclusivement par oxydation.
 – **Enduit** : produit de peinture fortement chargé ou pigmenté destiné à niveler les irrégularités du subjectile à peindre.
 – **Mastic** : produit organique qui forme une barrière imperméable et souple entre deux surfaces adjacentes.

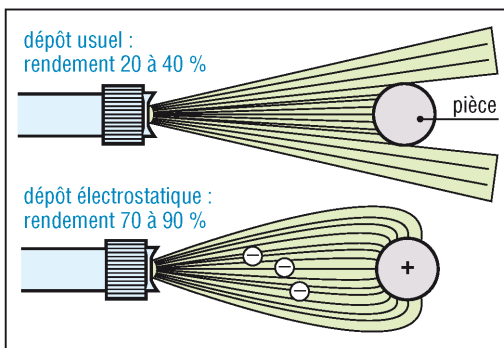
4. Mise en œuvre ; principales techniques d'application

Séchage : la plupart des produits nécessitent entre 2 et 24 heures de séchage à température ambiante, en air naturel ou sec. Le processus peut être accéléré en utilisant des fours, étuves, tunnels à lampes infrarouges, ultraviolets, hautes fréquences... Par exemple, entre 135 et 235 °C, le temps de séchage passe de 24 heures à moins d'une heure.

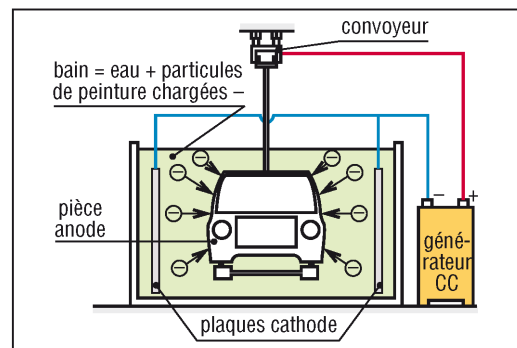
Contrôle de qualité : il existe de nombreux essais et tests normalisés (viscosité, chocs, rayures, abrasion, pliage, emboutissage, dureté...).

| | | |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 1 – manuelle (brosse, rouleau) | 5 – machine à rouleau | 9 – électrolytiques |
| 2 – pistolet pneumatique | 6 – machine à rideau | 10 – impression |
| 3 – pistolet sans air | 7 – par trempage | 11 – transfert thermique |
| 4 – pistolet électrostatique | 8 – par aspersion | 12 – thermique avec poudres... |

10. Principales techniques d'applications.



11. Peinture au pistolet.



12. Dépôt électrolytique par trempage.

20

ÉLÉMENTS D'ASSEMBLAGE ET DE FIXATION

OBJECTIFS

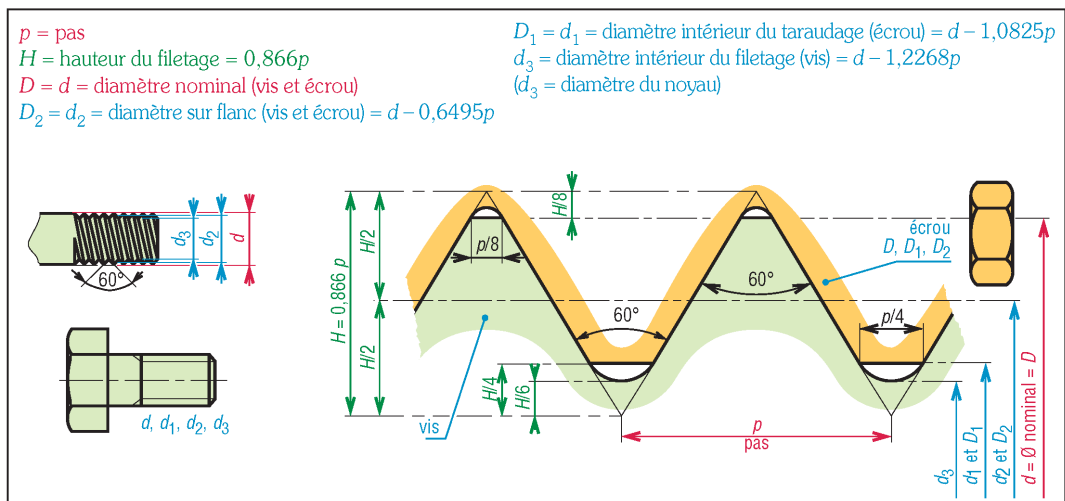
- Décrire les principaux organes d'assemblage (filetages, visserie, boulonnerie, rivets, goupilles, organes élastiques...).
- Indiquer les principales dimensions normalisées (ISO et AFNOR) et les domaines d'emploi respectifs.
- Fournir des éléments de calcul.

Visserie : description et symboles : NF EN ISO 225 ; Terminologie : NF ISO 1891; traitements électrolytiques (anticorrosion) NF EN ISO 4042 ; Revêtements : NF EN ISO 1891-2.

I - Filetages

1. Filetage métrique ISO à filet triangulaire

Ce filetage est le plus utilisé en visserie-boulonnerie. Son profil est défini à partir d'un triangle équilatéral. Dimensions de base : NF ISO 724. Panorama des filetages : FD E 003-002.



1. Filetage métrique ISO à filet triangulaire.

Recommandations : pour un diamètre donné, choisir de préférence le pas gros correspondant ou, à défaut, le plus fort pas fin ; plus le pas est fin, plus les tolérances sont réduites, plus la fabrication est onéreuse. Pas gros ou fin n'implique aucune notion de qualité.

Les pas fins sont recommandés dans le cas de filetage sur tube mince, d'écrou de faible hauteur, de chocs, de vibrations et lorsque les constructions sont coûteuses.

| Filetage métrique à pas gros (extrait) | | | | | | |
|--|-------------|---|---------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| d (mm) | pas gros | S_{eq} en mm ² section résistante | D_1 (mm) | $D_2 = d_2$ (mm) | d_3 (mm) | pas fins recommandés |
| 1 | 0,25 | 0,460 | 0,729 | 0,838 | 0,693 | |
| (1,1) | 0,25 | 0,588 | 0,829 | 0,938 | 0,793 | |
| 1,2 | 0,25 | 0,732 | 0,929 | 1,038 | 0,893 | |
| (1,4) | 0,30 | 0,983 | 1,075 | 1,205 | 1,032 | 0,2 |
| 1,6 | 0,35 | 1,27 | 1,221 | 1,373 | 1,171 | 0,2 |
| (1,8) | 0,35 | 1,70 | 1,421 | 1,573 | 1,371 | 0,2 |
| 2 | 0,4 | 2,07 | 1,567 | 1,740 | 1,509 | 0,25 |
| (2,2) | 0,45 | 2,48 | 1,713 | 1,908 | 1,648 | 0,35 |
| 2,5 | 0,45 | 3,39 | 2,013 | 2,208 | 1,948 | 0,35 |
| 3 | 0,5 | 5,03 | 2,459 | 2,675 | 2,387 | 0,35 |
| (3,5) | 0,6 | 6,78 | 2,850 | 3,110 | 2,764 | 0,35 |
| 4 | 0,7 | 8,78 | 3,242 | 3,545 | 3,141 | 0,5 |
| (4,5) | 0,75 | 11,3 | 3,688 | 4,013 | 3,580 | 0,5 |
| 5 | 0,8 | 14,2 | 4,134 | 4,480 | 4,019 | 0,5 |
| 6 | 1 | 20,1 | 4,918 | 5,350 | 4,773 | 0,75 |
| (7) | 1 | 28,9 | 5,918 | 6,350 | 5,773 | 0,75 |
| 8 | 1,25 | 36,6 | 6,647 | 7,188 | 6,466 | 1 - (0,75) |
| 10 | 1,5 | 58,0 | 8,376 | 9,026 | 8,160 | 1,25 - (1 - 0,75) |
| 12 | 1,75 | 84,3 | 10,106 | 10,863 | 9,853 | 1,5 - (1,25 - 1) |
| (14) | 2 | 115 | 11,835 | 12,701 | 11,546 | 1,5 - (1,25 - 1) |
| 16 | 2 | 157 | 13,835 | 14,701 | 13,546 | 1,5 - (1) |
| (18) | 2,5 | 192 | 15,294 | 16,376 | 14,933 | 2 - (1,5 - 1) |
| 20 | 2,5 | 245 | 17,294 | 18,376 | 16,933 | 2 - (1,5 - 1) |
| (22) | 2,5 | 303 | 19,294 | 20,376 | 18,933 | 2 - (1,5 - 1) |
| 24 | 3 | 353 | 20,752 | 22,051 | 20,319 | 2 - (1,5 - 1) |
| (27) | 3 | 459 | 23,752 | 25,051 | 23,319 | 2 - (1,5 - 1) |
| 30 | 3,5 | 561 | 26,211 | 27,727 | 25,706 | 2 - (1,5 - 1) |
| (33) | 3,5 | 694 | 29,211 | 30,727 | 28,706 | 2 - (1,5) |
| 36 | 4 | 817 | 31,670 | 33,402 | 31,093 | 3 - (2 - 1,5) |
| (39) | 4 | 976 | 34,670 | 36,402 | 34,093 | 3 - (2 - 1,5) |
| 42 | 4,5 | 1 121 | 37,129 | 39,077 | 36,479 | 4 - (3 - 2 - 1,5) |
| (45) | 4,5 | 1 306 | 40,129 | 42,077 | 39,479 | 4 - (3 - 2 - 1,5) |
| 48 | 5 | 1 473 | 42,587 | 44,752 | 41,866 | 4 - (3 - 2 - 1,5) |
| (52) | 5 | 1 758 | 46,587 | 48,752 | 45,866 | 4 - (3 - 2 - 1,5) |
| 56 | 5,5 | 2 030 | 50,046 | 52,428 | 49,252 | 4 - (3 - 2 - 1,5) |
| (60) | 5,5 | 2 362 | 54,046 | 56,428 | 53,252 | 4 - (3 - 2 - 1,5) |
| 64 | 6 | 2 676 | 57,505 | 60,103 | 56,639 | 4 - (3 - 2 - 1,5) |

() les valeurs entre parenthèses correspondent à un 2ème choix.

| Filetage métrique à pas fin (extrait) | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|---|-------------|-------------------|-------------|
| d mm | pas fins | S_{eq} en mm ² section résistante | D_1 mm | $D_2 = d_2$ mm | d_3 mm |
| 8 | 1 | 39,2 | 6,917 | 7,350 | 6,773 |
| 10 | 1 | 64,5 | 8,917 | 9,350 | 8,773 |
| 10 | 1,25 | 61,2 | 8,647 | 9,188 | 8,466 |
| 12 | 1,25 | 92,1 | 10,647 | 11,188 | 10,466 |
| 12 | 1,5 | 88,1 | 10,376 | 11,026 | 10,160 |
| (14) | 1,5 | 125 | 12,376 | 13,026 | 12,376 |
| 16 | 1,5 | 167 | 14,376 | 15,026 | 14,160 |
| (18) | 1,5 | 216 | 16,376 | 17,026 | 16,160 |
| 20 | 1,5 | 272 | 18,376 | 19,026 | 18,160 |
| 20 | 2 | 258 | 17,835 | 18,701 | 17,546 |
| (22) | 1,5 | 333 | 20,376 | 21,026 | 20,160 |
| 24 | 1,5 | 401 | 22,376 | 23,026 | 22,160 |
| 24 | 2 | 384 | 21,835 | 22,701 | 21,546 |
| (27) | 2 | 496 | 24,835 | 25,701 | 24,546 |
| 30 | 2 | 621 | 27,835 | 28,701 | 27,546 |
| (33) | 2 | 761 | 30,835 | 31,701 | 30,546 |
| 36 | 3 | 865 | 32,752 | 34,051 | 32,319 |
| (39) | 3 | 1 028 | 35,752 | 37,051 | 35,319 |

| Classes de tolérances recommandés | | | | | | | |
|------------------------------------|---------|-------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|
| tolérances de filetage qualités | | vis | | | taroudage | | |
| | | fine | moyenne | grossière | fine | moyenne | grossière |
| longueur en prise | courte | 3h 4h | 5g 6g | | 4H | 4H 5H | |
| | normale | 4h | 6g | 8g | 4H 5H | 6H | 7H |
| | longue | 5h 4h | 7g 6g | 9g 8g | 6H | 7H | 8H |

Exemple de désignation : M 20 - 5g 6g (pour vis M 20 à pas gros)

M 20 × 1,5 - 4H 5H (pour taroudage M 20 à pas fin de 1,5)

La lettre M (symbolise le filetage ISO) est suivie par les valeurs du diamètre nominal d en mm, du pas en mm (facultatif pour un pas gros) et de la classe de tolérance du filetage. Le pas et d sont séparés par le signe \times ; le pas (ou d) et la tolérance par un tiret.

2. Profils spéciaux

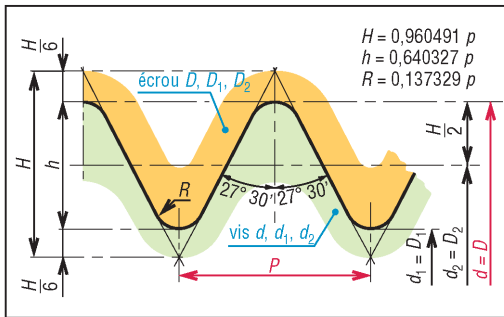
Plus coûteux que le profil triangulaire ISO, ils répondent à des usages particuliers.

a) Filet gaz ou filetage pas du gaz

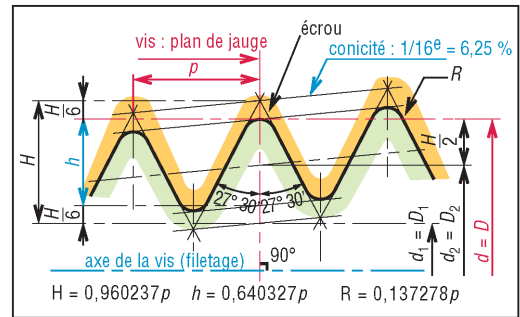
Il est utilisé dans les installations utilisant des fluides. Deux cas peuvent se présenter :

- Assemblages sans étanchéité : vis et écrou ont un profil cylindrique. NF EN ISO 228-1.
- Assemblages étanches : vis à profil conique et écrou à profil cylindrique ou conique ; l'étanchéité dans le filet est assurée par le serrage métal sur métal et, au besoin, par interposition d'une pâte à joint insensible à la nature du gaz. Norme NF EN 10226-1 et 2.

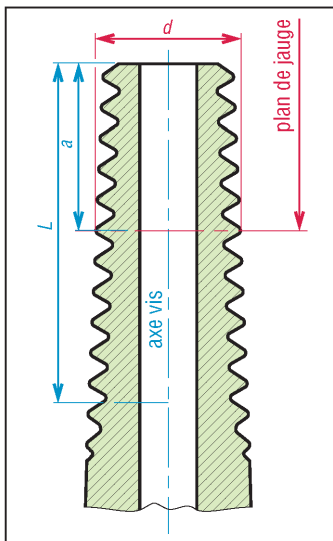
| Cas | Filetages (normes de référence) | Désignation « filetage de tuyauterie suivi de... » | Exemple de désignation |
|--------------------------|--|---|--|
| Assemblages étanches | extérieur conique NF EN 10226-1 et 2 | EN 10226 ; symbole R ; dénomination ; LH si filet à gauche. | filetage de tuyauterie EN 10226 R 1½ |
| | intérieur cylindrique NF EN 10226-1 | EN 10226 ; symbole R _p ; dénomination ; LH si filet à gauche. | filetage de tuyauterie EN 10226 R _p 1½ |
| | intérieur conique NF EN 10226-2 | EN 10226 ; symbole R _c ; dénomination ; LH si filet à gauche. | filetage de tuyauterie EN 10226 R _c 1½ |
| Assemblages non étanches | extérieur cylindrique NF EN ISO 228-1 | ISO 228 ; symbole G ; dénomination ; classe de tolérance A (la plus précise) ou B. | filetage de tuyauterie ISO 228 G 2½ B |
| | intérieur cylindrique NF EN ISO 228-1 | ISO 228 ; symbole G ; dénomination ; | filetage de tuyauterie ISO 228 G 2½ |



2. Profil gaz cylindrique. NF EN ISO 228-1.



3. Profil gaz conique. NF EN 10226-1 et 2.

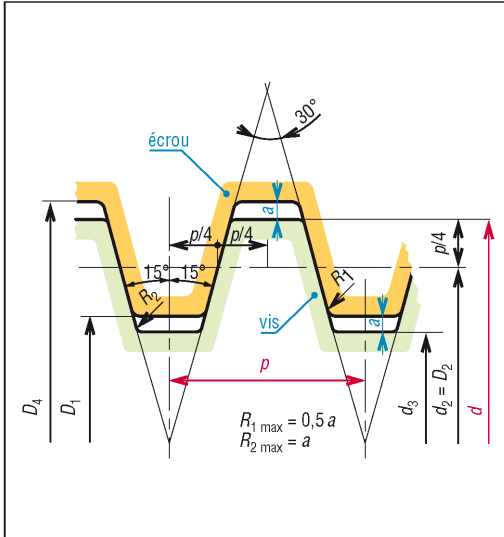


4. Vis à profil conique pour filetages étanches. 5/8-7/8-3 ½ : filetages cylindriques uniquement.

| Filetages pas du gaz (1 pouce = 25,4 mm) | | | | | | | |
|--|----------------|-------------|----------------------------------|--------------|---------------------------------|--------------------|-----------|
| dénomination | d = D en mm | pas p mm | nombre de filets par pouce | hauteur h | longueur de jauge a en mm | tolérance sur a | L mini |
| 1/16 | 7,723 | 0,907 | 28 | 0,581 | 4 | ±0,9 | 2,5 |
| 1/8 | 9,728 | 0,907 | 28 | 0,581 | 4 | ±0,9 | 2,5 |
| 1/4 | 13,157 | 1,337 | 19 | 0,856 | 6 | ±1,3 | 3,7 |
| 3/8 | 16,662 | 1,337 | 19 | 0,856 | 6,4 | ±1,3 | 3,7 |
| 1/2 | 20,955 | 1,814 | 14 | 1,162 | 8,2 | ±1,8 | 5,0 |
| 5/8 | 22,911 | 1,814 | 14 | 1,162 | - | - | - |
| 3/4 | 26,441 | 1,814 | 14 | 1,162 | 9,5 | ±1,8 | 5,0 |
| 7/8 | 30,201 | 1,814 | 14 | 1,162 | - | - | - |
| 1 | 33,249 | 2,309 | 11 | 1,479 | 10,4 | ±2,3 | 6,4 |
| 1 ¼ | 41,910 | 2,309 | 11 | 1,479 | 12,7 | ±2,3 | 6,4 |
| 1 ½ | 47,803 | 2,309 | 11 | 1,479 | 12,7 | ±2,3 | 6,4 |
| 2 | 59,614 | 2,309 | 11 | 1,479 | 15,9 | ±2,3 | 7,5 |
| 2 ½ | 75,184 | 2,309 | 11 | 1,479 | 17,5 | ±3,5 | 9,2 |
| 3 | 87,884 | 2,309 | 11 | 1,479 | 20,6 | ±3,5 | 9,2 |
| 3 ½ | 100,330 | 2,309 | 11 | 1,479 | - | - | - |
| 4 | 113,030 | 2,309 | 11 | 1,479 | 25,4 | ±3,5 | 10,4 |
| 5 | 138,430 | 2,309 | 11 | 1,479 | 28,6 | ±3,5 | 11,5 |
| 6 | 163,830 | 2,309 | 11 | 1,479 | 28,6 | ±3,5 | 11,5 |

b) Filet trapézoïdal

Il permet de réaliser des vis de manœuvre ou de transmission d'efforts et accepte mieux les traitements thermiques que le filet triangulaire. Il existe une variante à hauteur de filet réduite. Les vis à un filet sont généralement irréversibles. Dimensions NF ISO 2904.



| Profil trapézoïdal : principales dimensions | | | | | |
|--|----------|----------------------------|----------|--------|--------|
| $d_2 = D_2 = d - 0,5p$ | | $D_4 = d + 2a$ | | | |
| $d_3 = d - p - 2a$ | | $D_1 = d - p$ | | | |
| $d = \text{diamètre nominal}$ | | $p = \text{pas du profil}$ | | | |
| $p_h = \text{pas axial ou hélicoïdal (avance par tour)}$ | | | | | |
| d (mm) | p (mm) | a (mm) | d (mm) | p (mm) | a (mm) |
| 8 | 1,5 | 0,15 | 32 | 6 | 0,5 |
| 10 | 2 | 0,25 | 40 | 7 | 0,5 |
| 12 | 3 | 0,25 | 48 | 8 | 0,5 |
| 16 | 4 | 0,25 | 60 | 9 | 0,5 |
| 20 | 4 | 0,25 | 80 | 10 | 0,5 |
| 24 | 5 | 0,25 | 100 | 12 | 0,5 |
| 28 | 5 | 0,25 | 120 | 14 | 1 |
| tolérances | écrou | | vis | | |
| | normal N | long L | normal N | long L | |
| qualité moyenne | 7H | 8H | 7e | 8e | |
| qualité grossière | 8H | 9H | 8c | 9c | |

5. Profil trapézoïdal : NF ISO 2901 à 2904.

Tolérances NF ISO 2903. Dimensions NF ISO 2904.

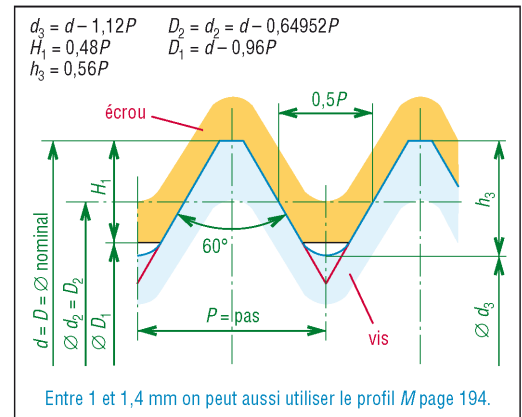
Exemples de désignation (NF ISO 2901) :

Tr 24 · 5 – 7e (vis à 1 filet d = 24, qualité moyenne) ; Tr 24 · 5 LH (idem avec pas à gauche)
 Tr 24 · 15 (P5) – 7e (vis à 3 filets Ph = 15 et p = 5, qualité moyenne)

c) Filetage ISO miniature – NF ISO 1501

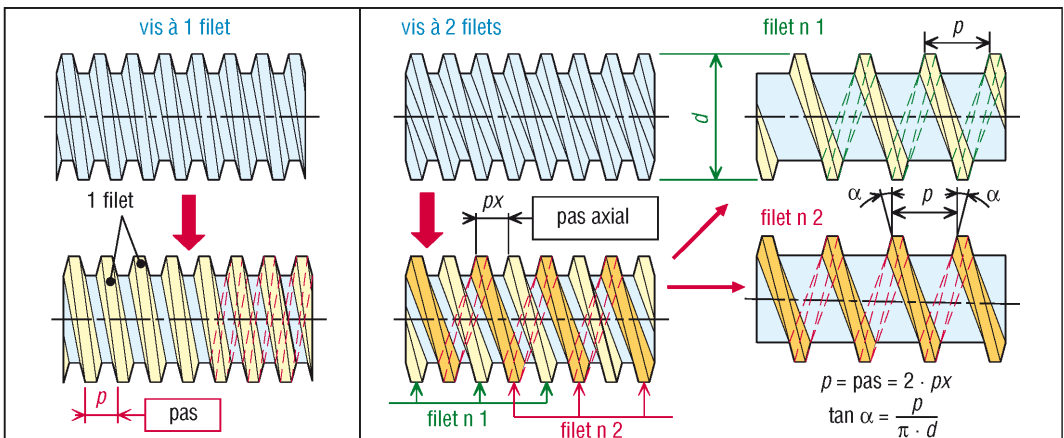
Pour l’horlogerie, optique, compteurs, instrumentation.

| D – d (mm) | Pas P (mm) | D ₁ (mm) | D ₂ = d ₂ (mm) | d ₃ (mm) | |
|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------|----------------|
| 0,3 | 0,08 | 0,223 | 0,248 | 0,210 | |
| (0,35) | 0,09 | 0,264 | 0,292 | 0,249 | |
| 0,4 | 0,1 | 0,304 | 0,335 | 0,288 | |
| 0,5 | 0,125 | 0,380 | 0,419 | 0,360 | |
| 0,6 | 0,15 | 0,456 | 0,503 | 0,432 | |
| 0,8 | 0,2 | 0,608 | 0,670 | 0,576 | |
| 1 | 0,25 | 0,760 | 0,838 | 0,720 | |
| 1,2 | 0,25 | 0,960 | 1,038 | 0,920 | |
| Tolérances | Écrou (filetage intérieur) | Vis (filetage extérieur) | | | |
| diamètre | D et D ₂ | D ₁ | d | d ₂ | d ₃ |
| écarts | G – H | H | h | h | h |
| degrés | 3 – 4 | 5 – 6 | 3 | 5 | 4 |



6. Filetages miniatures ISO : Profil nominal.

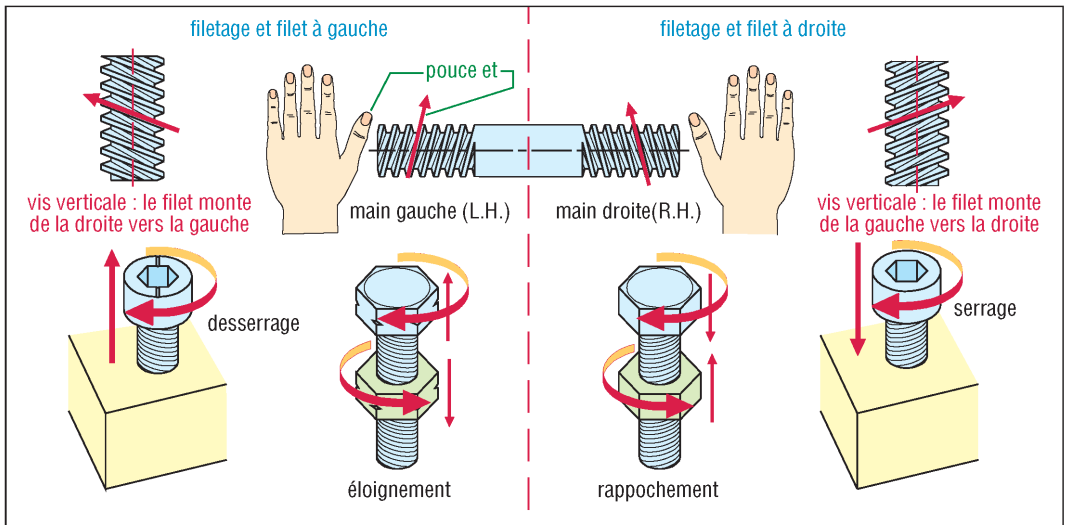
3. Filetage à droite - Filetage à gauche - Vis à un ou plusieurs filets



7. Vis à un et deux filets ; pas.

Si on observe une vis avec filetage à droite, le filet monte en allant de la gauche vers la droite et inversement pour un filetage à gauche.

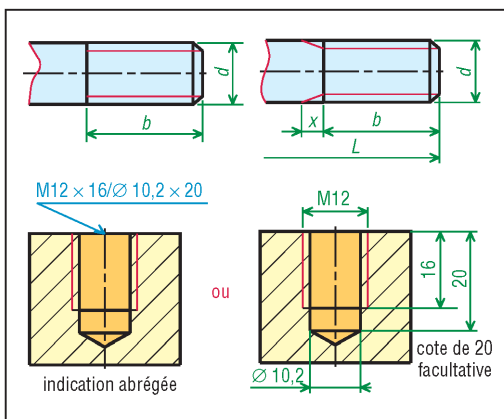
Le serrage d'une vis à droite est réalisé en tournant la tête dans le sens des aiguilles d'une montre (sens inverse trigo) et inversement pour une vis à gauche.



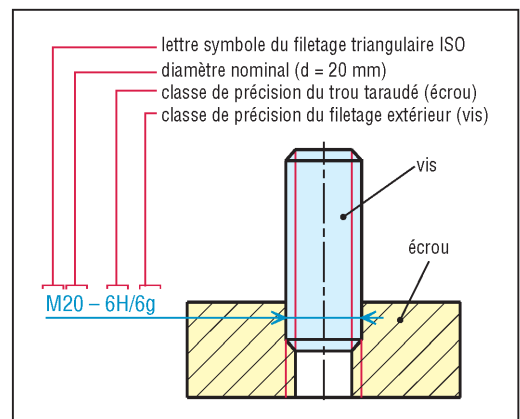
8. Propriétés des filets à droite et à gauche.

4. Représentation normalisée des filetages

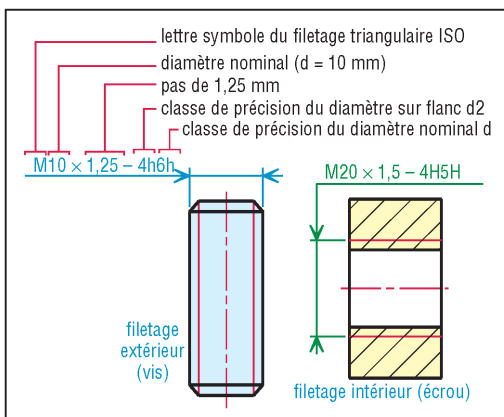
(Voir aussi page 16, les fonds de filets en rouge sont normalisés en traits fins noirs.)



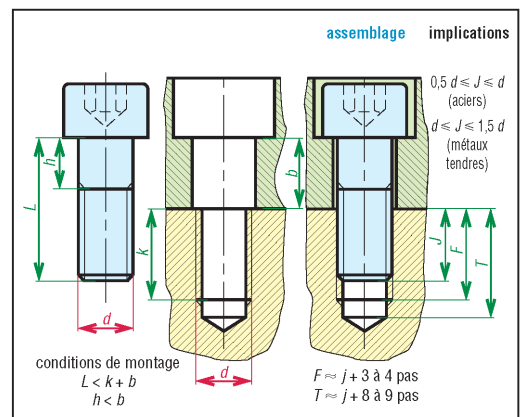
9. Cotation du diamètre et de la longueur.



10. Cotation ISO des assemblages.



11. Cotation ISO des vis et écrous.



12. Conditions de montage des vis à métaux.

II - Visserie et boulonnerie

1. Vis d'assemblage à métaux

Le serrage le plus énergique est obtenu par les têtes H et Q (Q est peu utilisée en mécanique) puis par les vis CHC ou torx qui présentent l'avantage de pouvoir être logées ou noyées dans un chambrage. Les grades A et B indiquent des tolérances précises, C des tolérances larges.

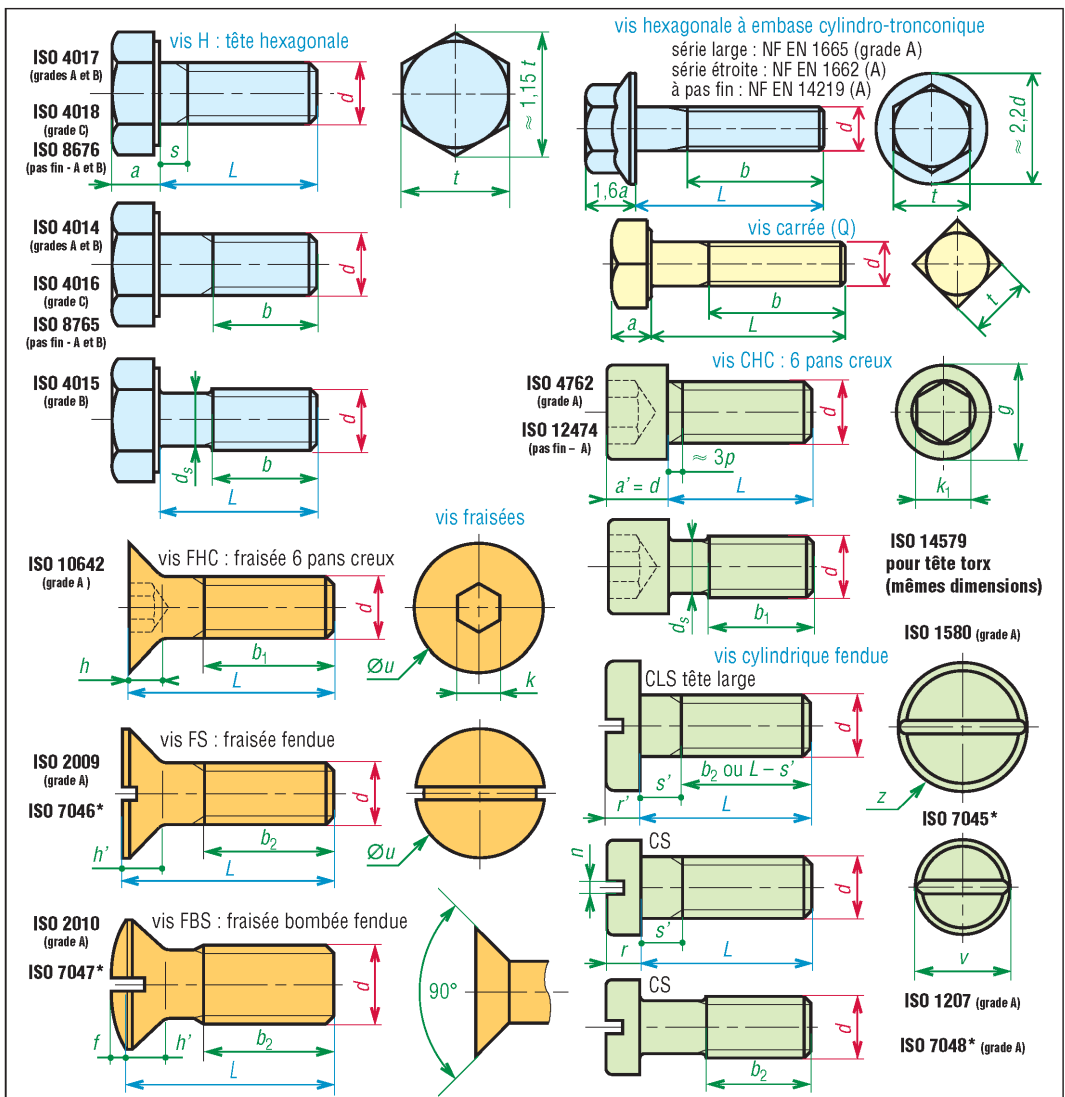
Les vis H et CHC existent en boulonnerie haute résistance. Voir NF EN ISO 4759-1.

Les têtes coniques ou fraisées, peu utilisées en mécanique, permettent des centrages éventuels.

Les vis à fente, économiques, assez utilisées dans les petites dimensions, ont pour elles la simplicité (serrage par tournevis) ; de plus les têtes peuvent être facilement noyées.

Suivant les dimensions, la tige peut être complètement ou partiellement filetée et le diamètre de tige réduit ou non. Revêtements normalisés : NF EN ISO 1891-2, etc.

Remarque : il existe d'autres formes de têtes : cylindrique bombée à empreinte cruciforme, cylindrique à 6 lobes ou à empreinte torx, poëlier fendu...






13. Dimensions des vis à métaux. * Cas avec empreintes cruciformes H ou Z et mêmes dimensions ($L \leq 60$).

Exemples de désignation : vis à tête hexagonale ISO 4014-M12-80-4.6 (vis H partiellement filetée, $d = 12$, $L = 80$, classe 4.6) ;

vis QM12-60, 4.8 (vis à tête carrée, $d = 12$, $L = 60$, classe 4.8).

| Principales dimensions, en millimètres, des vis d'assemblage pour métaux : normes ISO et NF | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <i>d</i> | 1,6 | 2 | 2,5 | 3 | (3,5) | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | (14) | 16 | 20 | 24 | 30 | 36 |
| pas | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1 | 1,25 | 1,5 | 1,75 | 2 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 |
| <i>a</i> | 1,1 | 1,4 | 1,7 | 2 | 2,4 | 2,8 | 3,5 | 4 | 5,3 | 6,4 | 7,5 | 9 | 10 | 12,5 | 15 | 18,7 | 22,5 |
| <i>t</i> | 3,2 | 4 | 5 | 5,5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 13 | 16 | 18 | 21 | 24 | 30 | 36 | 46 | 55 |
| <i>s</i> | 1,05 | 1,2 | 1,35 | 1,5 | 1,8 | 2,1 | 2,4 | 3 | 4 | 4,5 | 5,3 | 6 | 6 | 7,5 | 9 | 10,5 | 12 |
| <i>d_s</i> | 1,3 | 1,7 | 2,1 | 2,6 | | 3,5 | 4,4 | 5,3 | 7,1 | 8,9 | 10,7 | 12,5 | 14,5 | 18,2 | 21,8 | | |
| <i>g</i> | 3 | 3,8 | 4,5 | 5,5 | | 7 | 8,5 | 10 | 13 | 16 | 18 | 21 | 24 | 30 | 36 | 45 | 54 |
| <i>h</i> | | | | 1,86 | | 2,48 | 3,1 | 3,72 | 4,96 | 6,2 | 7,44 | 8,4 | 8,8 | 10,16 | | | |
| <i>h'</i> | 1 | 1,2 | 1,5 | 1,65 | 2,35 | 2,7 | 2,7 | 3,3 | 4,65 | 5 | | | | | | | |
| <i>f</i> | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1 | 1,2 | 1,4 | 2 | 2,3 | | | | | | | |
| <i>u</i> | 3 | 3,8 | 4,7 | 5,5 | 7,3 | 8,4 | 9,3 | 11,3 | 15,8 | 18,3 | 23 | 26 | 29 | 36 | | | |
| <i>k</i> | 0,9 | 1,3 | 1,5 | 2 | — | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 10 | 12 | | | |
| <i>r</i> | 1,1 | 1,4 | 1,8 | 2 | 2,4 | 2,6 | 3,3 | 3,9 | 5 | 6 | | | | | | | |
| <i>r'</i> | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,8 | 2,1 | 2,4 | 3 | 3,6 | 4,8 | 6 | | | | | | | |
| <i>n</i> | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,2 | 1,2 | 1,6 | 2 | 2,5 | | | | | | | |
| <i>s'</i> | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 2 | 2,5 | 3 | | | | | | | |
| <i>v</i> | 3,0 | 3,8 | 4,5 | 5,5 | 6 | 7 | 8,5 | 10 | 13 | 16 | | | | | | | |
| <i>z</i> | 3,2 | 4 | 5 | 5,6 | 7 | 8 | 9,5 | 12 | 16 | 20 | | | | | | | |
| <i>k₁</i> | 1,5 | 1,5 | 2 | 2,5 | | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 17 | 19 | 22 | 27 |
| longueur | longueurs filetées : * pour tige totalement filetée ; longueur filetée partielle <i>b</i> pour vis H, Q, cyl. Tronc. <i>b₁</i> pour vis CHC et FHC (<i>b₁</i> de 10 en 10 si <i>L</i> ≥ 40), <i>b₂</i> pour vis FS, FBS, CS et CLS (les chiffres des colonnes <i>b</i> représentent aussi des vis entièrement filetées) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | <i>L</i> | <i>b b₁ b₂</i> | <i>b b₁ b₂</i> | <i>b b₁ b₂</i> | <i>b b₁ b₂</i> | <i>b b₁ b₂</i> | <i>b b₁ b₂</i> | <i>b b₁ b₂</i> | <i>b b₁ b₂</i> | <i>b b₁ b₂</i> | <i>b b₁ b₂</i> | <i>b b₁</i> | <i>b b₁</i> | <i>b b₁</i> | <i>b b₁</i> | <i>b b₁</i> | <i>b b₁</i> |
| 4 | *** | *** | ** | * | * | | | | | | | | | | | | |
| 5 | *** | *** | *** | *** | * | * | | | | | | | | | | | |
| 6 | *** | *** | *** | *** | * | ** | * | | | | | | | | | | |
| 8 | *** | *** | *** | *** | * | ** | * | * | | | | | | | | | |
| 10 | *** | *** | *** | *** | * | * | * | * | * | | | | | | | | |
| 12 | 9 ** | *** | *** | *** | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | |
| 16 | 9 ** | 10 ** | 11 ** | 12 ** | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | |
| 20 | | 10 16 * | 11 ** | 12 ** | 13 * | 14 ** | 16 ** | 18 ** | 22 ** | 26 ** | 30 ** | 34 * | 38 * | 46 * | 54 * | 66 * | |
| 25 | | | 11 17 * | 12 18 * | 13 * | 14 ** | 16 ** | 18 ** | 22 ** | 26 ** | 30 ** | 34 * | 38 * | 46 * | 54 * | 66 * | |
| 30 | | | | 12 18 * | 13 * | 14 20 * | 16 22 * | 18 ** | 22 ** | 26 ** | 30 ** | 34 * | 38 * | 46 * | 54 * | 66 * | |
| 35 | | | | | 13 * | 14 20 * | 16 22 * | 18 24 * | 22 ** | 26 ** | 30 ** | 34 * | 38 * | 46 * | 54 * | 66 * | |
| 40 | | | | | | 14 20 * | 16 22 * | 18 24 * | 22 28 * | 26 ** | 30 ** | 34 * | 38 * | 46 * | 54 * | 66 * | |
| 45 | | | | | | | 16 22 38 | 18 24 38 | 22 28 38 | 26 32 38 | 30 * | 34 * | 38 * | 46 * | 54 * | 66 * | |
| 50 | | | | | | | 16 22 38 | 18 24 38 | 22 28 38 | 26 32 38 | 30 36 | 34 * | 38 * | 46 * | 54 * | 66 * | |
| 55 | | | | | | | | 18 24 38 | 22 28 38 | 26 32 38 | 30 36 | 34 * | 38 * | 46 * | 54 * | 66 * | |
| 60 | | | | | | | | | 22 28 38 | 26 32 38 | 30 36 | 34 40 | 38 * | 46 * | 54 * | 66 * | |
| 65 | | | | | | | | | 22 28 38 | 26 32 38 | 30 36 | 34 40 | 38 44 | 46 * | 54 * | 66 * | |
| 70 | | | | | | | | | 22 28 38 | 26 32 38 | 30 36 | 34 40 | 38 44 | 46 * | 54 * | 66 * | * |
| 80 | | | | | | | | | 22 28 38 | 26 32 38 | 30 36 | 34 40 | 38 44 | 46 52 | * - | * - | * |
| 90 | | | | | | | | | | 26 32 | 30 36 | 34 40 | 38 44 | 46 52 | 54 60 | * | * |
| 100 | | | | | | | | | | 26 32 | 30 36 | 34 40 | 38 44 | 46 52 | 54 60 | 66 | * |
| 110 | | | | | | | | | | | 30 36 | 34 40 | 38 44 | 46 52 | 54 60 | 72 72 | * |
| 120 | | | | | | | | | | | 30 36 | 40 40 | 38 44 | 46 52 | 54 60 | 72 72 | * 84 |
| 130 | | | | | | | | | | | | 40 40 | 44 44 | 52 52 | 60 60 | 72 72 | * 84 |
| 140 | | | | | | | | | | | | 40 40 | 44 44 | 52 52 | 60 60 | 72 72 | * 84 |
| 150 | | | | | | | | | | | | * | 44 44 | 52 52 | 60 60 | 72 72 | 84 84 |
| 160 | | | | | | | | | | | | * | 44 44 | 52 52 | 60 60 | 72 72 | 84 84 |
| 170 | | | | | | | | | | | | * | * | 52 - | 60 - | 72 | 84 |
| 180 | | | | | | | | | | | | * | * | 52 52 | 60 60 | 72 72 | 84 84 |
| 190 | | | | | | | | | | | | * | * | 52 - | 60 - | 72 | 84 |
| 200 | | | | | | | | | | | | * | * | 52 52 | 60 60 | 85 72 | 84 84 |
| 220 | | | | | | | | | | | | | | | 73 | 85 | 97 |
| 240 | | | | | | | | | | | | | | | 73 | 85 | 97 |
| 260 | | | | | | | | | | | | | | | | 85 | 97 |
| 280 | | | | | | | | | | | | | | | | 85 | 97 |
| 300 | | | | | | | | | | | | | | | | | 97 |

2. Classes de qualité des vis et des écrous, éléments de calcul

| marquage des têtes | 4.6 | 4.8 | 5.6 | 5.8 | 6.8 | 8.8 | 9.8 | 10.9 | 12.9 |
|---|---|--------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|------------------|
| classes de résistance | 4.6 | 4.8 | 5.6 | 5.8 | 6.8 | 8.8 | 9.8 | 10.9 | 12.9 |
| limite élastique R_e N/mm ² ou MPa | 240 | 320 | 300 | 400 | 480 | 640 | 720 | 900 | 1 080 |
| limite à la rupture R_r -MPa (nominal) | 400 (400) | 420 (400) | 500 (500) | 520 (500) | 600 (600) | 800 (800) | 900 (900) | 1 040 (1 000) | 1 220 (1 200) |
| A% | 22 | 14 | 20 | 10 | 8 | 12 | 10 | 9 | 8 |
| Dureté HV | 120 | 130 | 155 | 160 | 190 | 250 | 290 | 320 | 385 |
|  $R_e = R_r \times \frac{Y}{10}$ (en N/mm ²) $R_r \approx 100 \times S$ (en N/mm ²) $R_e = S \times Y$ (daN/mm ²) |  vis CHC | |  | | | | | | |

14. Principales propriétés des vis et des goujons (NF EN ISO 898-1).

Il existe des classes de qualité pour certaines vis (H, CHC...) et écrous. Plus le matériau est résistant, plus la classe est élevée.

a) Cas des vis

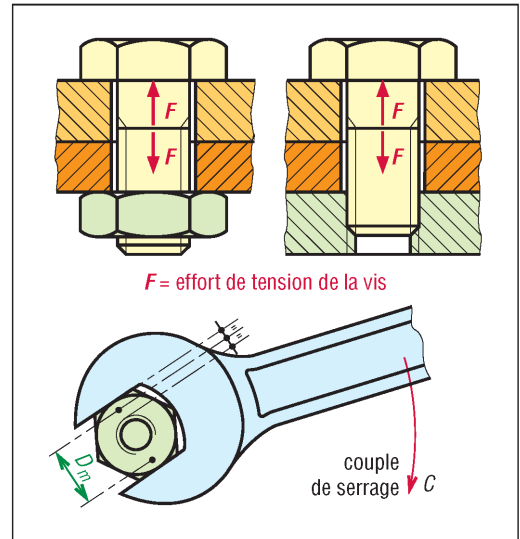
La classe est symbolisée par deux nombres. Le premier est le centième de la résistance minimale à la rupture par traction (R_r) du matériau en N/mm². Le second représente 10 fois le rapport entre la limite élastique (R_e) minimale et la résistance à la rupture R_r .

Exemple : vis de classe 8-8

$$R_r \text{ (mini)} = 100 \times 8 = 800 \text{ N/mm}^2$$

$$R_e \text{ (mini)} = R_r \times Y/10 = 800 \times 8/10 = 640 \text{ N/mm}^2$$









Remarque : le produit des deux nombres est égal à R_e en daN/mm².



15. Efforts exercés sur les vis et les boulons.

b) Cas des écrous (hauteurs $\geq 0,8d$, style 1)

La classe est symbolisée par un nombre indiquant le centième de la contrainte d'épreuve en N/mm², c'est-à-dire de la limite obtenue par essai, réalisée par exemple avec une vis de classe supérieure, et n'entraînant pas de déformation notable.

| Classes de qualité des écrous – NF EN ISO 898-2 – pas gros et fin – M5 ≤ D ≤ M39 | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|--|---|---|
| classe de qualité | 04 | 05 | 5 | 6 | 8 | 9 | 10 | 12 |
| type d'écrou | bas (style 0) | | normal (style 1) | | normal (style 1) et haut (style 2) | | | |
| classe vis conjuguée | 4.6 - 4.8 | 5.6 - 5.8 | 5.8 | 6.8 | 8.8 | 9.8 | 10.9 | 12.9 |
| dureté HV | 188 à 302 | 272 à 353 | 130 à 302 | 150 à 302 | 200 à 353 | 188 à 302 | 272 à 353 | 295 à 353 |
| contrainte d'épreuve ou charge limite MPa | 400 | 500 | 500 | 600 | 800 | 900 | 1000 | 1200 |
| marquage (horaire) des écrous |  |  |  |  |  |  |  |  |

c) Cas des boulons

Leur symbolisation est identique à celle des vis. Un boulon de classe 10-9 doit être constitué d'une vis de classe 10-9 et d'un écrou de classe 10. De plus, en boulonnerie haute résistance, il faut utiliser des rondelles de la même classe que les vis.

| Caractéristiques et qualité des vis et écrous en acier inoxydable NF EN ISO 3506-1 et 2 – FD E 25-033 | | | | | | | | | | | |
|---|---|-----|-----|--|-----|------|-----|---|-----|-------------|-----|
| Groupe d'aciers | Austénitiques | | | Martensitiques | | | | | | Ferritiques | |
| Nuances | A1 – A2 – A3 – A4 – A5 | | | C1 | | | C3 | C4 | | F1 | |
| Classes | 50 | 70 | 80 | 50 | 70 | 110 | 80 | 50 | 70 | 45 | 60 |
| Rr (N/mm ²) | 500 | 700 | 800 | 500 | 700 | 1100 | 800 | 500 | 700 | 450 | 600 |
| Re ou Rp _{0,2} (N/mm ²) | 210 | 450 | 600 | 250 | 410 | 820 | 640 | 250 | 410 | 250 | 410 |
| Propriétés utilisations | A1 (usinage) ; A2 (le + utilisé : alimentaire, chimie...) ; A3 = A2 stabilisé ; A4 résistants à l'acide ; A5 = A4 stabilisé | | | résistance à la corrosion limitée (C3 mieux que C1) ; C4 (usinage) ; applications : pompes, turbines, valves, coutellerie... | | | | équivalent à A2 et A3, ambiance chlorée | | | |

A₁, A₂, A₃ existent en classes 50 (doux), 70 (écroui) et 80 (haute résistance). Le marquage des têtes est analogue aux précédentes.

d) Calcul des charges supportées par les vis et boulons

Charge de traction (F) supportée par la partie filetée de la tige (formule approchée).

$$F_{\text{maxi}} = 0,9 \cdot R_e \cdot S_{\text{eq}}$$

R_e : limite élastique du matériau.

S_{eq} : section résistante de la tige filetée (tableau page 194).

0,9 : taux de charge de 90 % (marge de sécurité de 10 %).

Exemple : boulon qualité 10-9, diamètre $d = 16$, pas (gros) de 2 mm.

$S_{\text{eq}} = 157 \text{ mm}^2$ et $R_e = 900 \text{ N/mm}^2$.

$F_{\text{maxi}} = 0,9 \cdot 900 \cdot 157 = 127\,170 \text{ N}$ (proche de «13 tonnes»).

(F) s'obtient par serrage au montage ; le couple de serrage C est exercé sur la tête du boulon par une clé dynamométrique ou une visseuse rotative étalonnée.

| Valeurs du frottement | | | Nature face d'appui (pièce, rondelle...) / Nature filetage de l'écrou | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------|-------|---|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|
| valeurs de f_t et f_t | | | acier non traité | | | fonte grise usinée | | |
| | | | laminé | usiné | rectifié | | | |
| nature filetage vis | acier noirci ou phosphaté | roulé | 0,13 à 0,19 | 0,10 à 0,18 | 0,16 à 0,22 | 0,10 à 0,18 | | |
| | | usiné | 0,10 à 0,18 | 0,10 à 0,18 | 0,10 à 0,18 | | | |
| nature tête de vis (ou écrou) | acier galvanisé | | 0,10 à 0,18 | 0,10 à 0,18 | 0,10 à 0,18 | 0,10 à 0,18 | | |
| conditions d'emploi | | | huilé | | | huilé | | |
| valeurs de f_t et f_t | | | acier traité | | | alliages Al et Mg | acier | |
| | | | cadmié | galvanisé | phosphaté | | cadmié | galvanisé |
| nature filetage vis | acier noirci ou phosphaté | roulé | 0,08 à 0,12 | 0,10 à 0,18 | 0,12 à 0,20 | 0,08 à 0,16 | 0,08 à 0,16 | 0,10 à 0,18 |
| | | usiné | 0,08 à 0,16 | 0,10 à 0,16 | | | | |
| nature tête de vis (ou écrou) | acier galvanisé | | | 0,16 à 0,20 | | | | 0,20 à 0,30 |
| conditions d'emploi | | | huilé | | | huilé | à sec | |

Couple de serrage (C), formule approchée

$$C = (0,16p + 0,583 \cdot f_t \cdot d_2 + 0,5 \cdot f_t \cdot D_m) \cdot F$$

p : pas (mm)

d_2 : diamètre sur flanc (tableau page 194).

f_t : frottement au niveau du filetage

f_t : frottement entre tête (vis) et support (pièce)

D_m : diamètre moyen au niveau de la tête

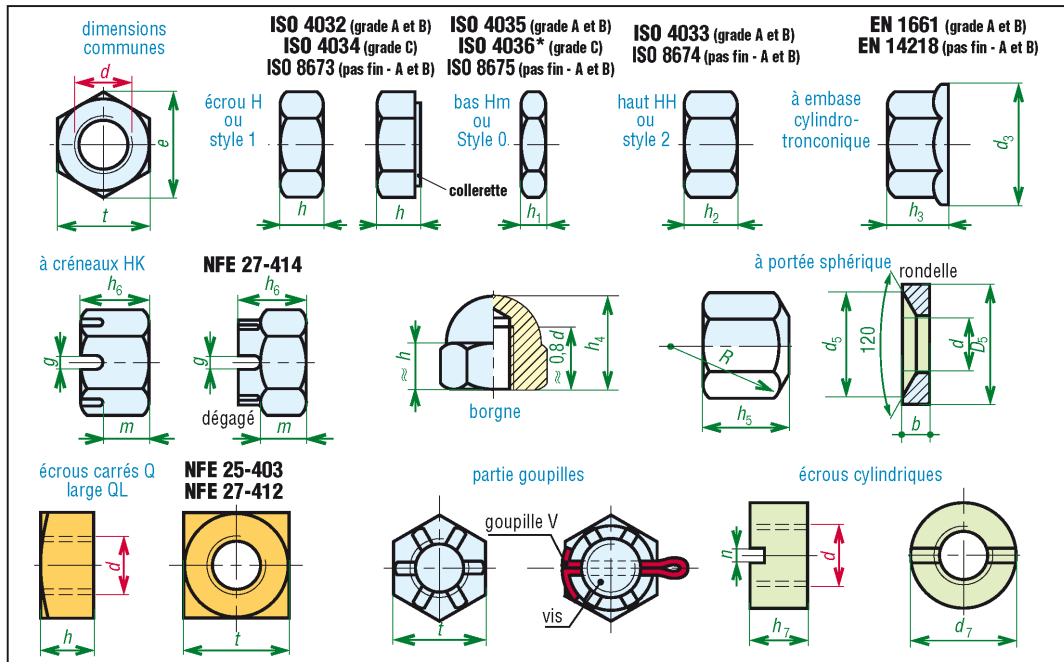
F : tension de la vis

| Remarques NFE 25-030-1 | | |
|---|--------------------|--|
| frottement f ou μ | f_{moyen} | revêtements types |
| faible : 0,06 à 0,09 | 0,075 | Phosphatation avec lubrifiant ; Graisse ou huile au MoS ₂ |
| moyen : 0,08 à 0,14 | 0,110 | Zinc ou zinc allié passivé avec finition brute ou huile moteur |
| normal : 0,12 à 0,18 | 0,150 | Zinc avec finition spécifique |
| Non maîtrisé : 0,2 à 0,4 | 0,30 | Brut non revêtu ; galvanisation à chaud ; inox non lubrifié |
| On peut aussi utiliser la formule avec : $f_t = f_t = f_{\text{moyen}}$ | | |

Remarque : le calcul des assemblages boulonnés conduit parfois à des études plus poussées prenant en compte les précharges, les sollicitations composées (traction + torsion, etc.), les phénomènes de fatigue, les phénomènes statistiques, les critères de limite élastique (Von Mises...) ; voir normes NF E 25-030-1 et 2. Il existe des versions spéciales (HR et HV) pour construction métalliques : NF EN 14399-1 à 6.

3. Principaux écrous

a) Écrous manœuvrés par clés



16. Écrous pour vis à métaux : en général grade A si $d \leq 16$; grade B si $d > 16$; (* sans chanfrein et $d \leq 10$).

| Principales dimensions normalisées des écrous H, Q et cylindriques | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-------|---|
| d | t | e | h | h_1 | h_2 | h_3 | d_3 | h_4 | h_5 | R | d_5 | D_5 | b | h_6 | g | m | h_7 | n | d_7 | |
| 1,6 | 3,2 | 3,4 | 1,3 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 4 | 4,4 | 1,6 | 1,2 | | | | | | | | | | | | | | 2 | 0,5 | 4 |
| 2,5 | 5 | 5,4 | 2 | 1,6 | | | | | | | | | | | | | | 2,5 | 0,8 | 5 |
| 3 | 5,5 | 6 | 2,4 | 1,8 | | | | 5,1 | | | | | | | | | | 3 | 1 | 5 |
| 4 | 7 | 7,6 | 3,2 | 2,2 | | | | 6,7 | | | | | | | | | | 4 | 1,5 | 7 |
| 5 | 8 | 8,8 | 4,7 | 2,7 | 5,1 | 5 | 12 | 8 | 5 | 7 | 9,25 | 15 | 2,5 | 6 | 1,4 | 4 | 5 | 1,5 | 9 | |
| 6 | 10 | 11,1 | 5,2 | 3,2 | 5,7 | 6 | 14 | 10 | 8 | 14 | 11 | 17 | 4 | 7,5 | 2 | 5 | 6 | 2 | 11 | |
| 8 | 13 | 14,4 | 6,8 | 4 | 7,5 | 8 | 18 | 13 | 11 | 14 | 14,5 | 23 | 5 | 9,5 | 2,5 | 6,5 | 8 | 2,5 | 14 | |
| 10 | 16 | 17,8 | 8,4 | 5 | 9,3 | 10 | 22 | 16,5 | 13 | 22 | 18,5 | 28 | 5 | 12 | 2,8 | 8 | 10 | 3 | 18 | |
| 12 | 18 | 20 | 10,8 | 6 | 12 | 12 | 26 | 19,5 | 15 | 22 | 20 | 30 | 6 | 15 | 3,5 | 10 | 12 | 3,5 | 22 | |
| (14) | 21 | 23,4 | 12,8 | (7) | 14,1 | 14 | 30 | 22 | 18 | 30 | 25 | 40 | 6 | 16 | 3,5 | 11 | 14 | 4 | 24 | |
| 16 | 24 | 26,8 | 14,8 | 8 | 16,4 | 16 | 34 | 25 | 21 | 30 | 26 | 45 | 7 | 19 | 4,5 | 13 | 16 | 4 | 27 | |
| 20 | 30 | 33 | 18 | 10 | 20,3 | 20 | 43 | 31 | 25 | 44 | 31 | 50 | 8 | 22 | 4,5 | 16 | 20 | 5 | 33 | |
| 24 | 36 | 39,6 | 21,5 | 12 | 23,9 | | | 37 | 29 | 44 | 37 | 60 | 10 | 27 | 5,5 | 19 | 24 | 6 | 39 | |
| 30 | 46 | 50,9 | 25,6 | 15 | 28,6 | | | 47 | 35 | 66 | 48 | 68 | 10 | 33 | 7 | 24 | 30 | 7 | 48 | |
| 36 | 55 | 60,8 | 31 | 18 | 34,7 | | | 56 | 41 | 66 | 60 | 80 | 12 | 38 | 7 | 29 | 36 | 8 | 56 | |

Exemples de désignation : écrou hexagonal ISO 4032-M12-8 (écrou H, $d = M12$, classe 8).
 Écrou hexagonal à embase cylindro-tronconique EN 14218-M12 · 1,25 · -10, $d = M12$, classe 10).

b) Principaux écrous autofreinés

L'écrou à bague frein non fileté incorporée, en nylon ou inox, genre Nylstop, existe en plusieurs variantes : écrou borgne, écrou à embase...

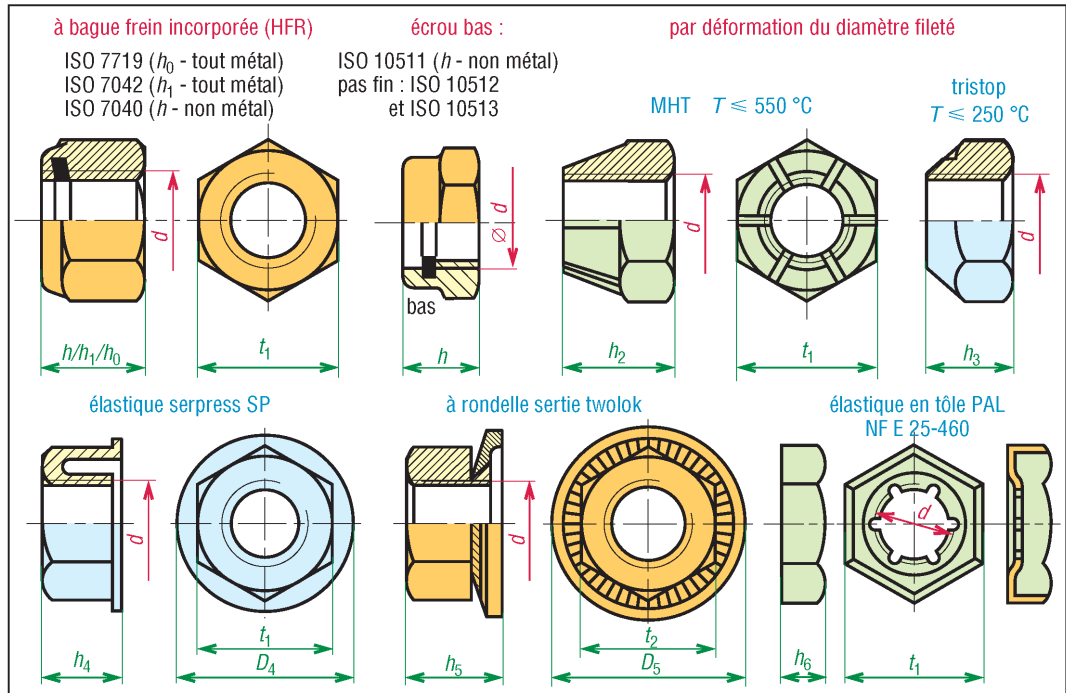
Les écrous « MHT » pour hautes températures ($T < 550 \text{ °C}$) et « Tristop » ont leur diamètre d légèrement déformé au niveau des parties coniques ; il en résulte un pincement avec la vis au montage.

L'écrou type « Serpress », monobloc, présente une grande élasticité ; il est sept fois plus élastique qu'un écrou H.

La rondelle conique élastique, qui se déforme et s'aplatit sous charge, sertie de l'écrou twolok peut être remplacée par une rondelle dentée.

L'écrou élastique en tôle « PAL » peut être utilisé comme contre-écrou. Supportant de faibles efforts axiaux, il est intéressant avec les plastiques, les élastomères. Détails NF E 25-460.

h avec bague nylon ; h_0 et h_1 bague métal (inox... ; démontages plus fréquents).



17. Dimensions des principaux écrous autofreinés pour vis à métaux. Écrous autofreinés avec fente : NFE 25-411.

| Principales dimensions normalisées des écrous freinés | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d | pas | h max | h_1 max | h_0 max | t_1 | h_2 | h_3 | h_4 | D_4 | h_5 | D_5 | t_2 | h_6 |
| 3 | 0,5 | 4,5 | | | 5,5 | | | 3,3 | 5,5 | | | | 2 |
| 4 | 0,7 | 6 | | | 7 | 6,5 | | 3,7 | 9 | 4,6 | 10,2 | 7 | 2,2 |
| 5 | 0,8 | 6,8 | 5,1 | 5,3 | 8 | 6,5 | 5 | 4,4 | 10,5 | 5,6 | 12,2 | 8 | 2,5 |
| 6 | 1 | 8 | 6 | 5,9 | 10 | 8,4 | 6 | 5,2 | 12,5 | 6,8 | 14,2 | 10 | 3 |
| 8 | 1,25 | 9,5 | 8 | 7,1 | 13 | 9,2 | 7,5 | 7 | 16 | 8,9 | 18,2 | 13 | 3,5 |
| 10 | 1,5 | 11,9 | 10 | 9,0 | 16 | 12 | 9 | | | 10,7 | 22,2 | 17 | 4,2 |
| 12 | 1,75 | 14,9 | 13,3 | 11,6 | 18 | 15,6 | 11 | | | 13 | 26,2 | 19 | 4,5 |
| 14 | 2 | 17 | 14,4 | 13,2 | 21 | 17,2 | 12 | | | | | | 5 |
| 16 | 2 | 19,1 | 16,4 | 15,2 | 24 | 19,2 | 14 | | | | | | 5 |
| 20 | 2,5 | 22,8 | 20,3 | 19,0 | 30 | 22,4 | | | | | | | 6,2 |
| 24 | 3 | 27,1 | 24 | 23,0 | 36 | 29,6 | | | | | | | 7,2 |
| 30 | 3,5 | 32,6 | 30 | 26,9 | 46 | 55,6 | | | | | | | 8 |
| 36 | 4 | 38,9 | 36 | 32,5 | 55 | | | | | | | | 9 |

Exemple de désignation : écrou hexagonal autofreiné ISO 7719-M12-8.

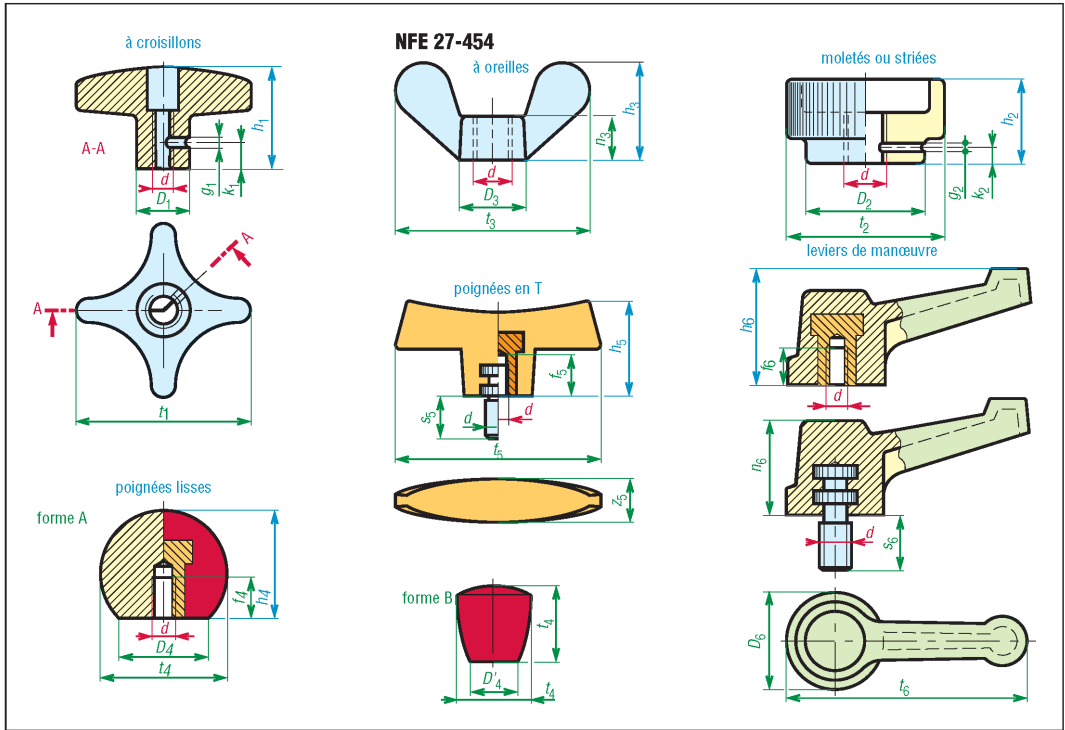
c) Exemple d'écrous standards manœuvrables à la main

Les écrous à croisillons existent en acier, acier inox, aluminium, avec trou de goupille ou en plastique phénoplaste avec insert taraudé (Norelem...).

Les écrous « moletés » en acier bruni peuvent également être goupillés (Norelem...).

Les écrous à oreilles existent en plusieurs matériaux (Boutet...).

Les poignées lisses avec insert ou non sont le plus souvent en phénoplaste, « bakélite » noir ou rouge. La matière est la même pour les poignées en T et les leviers de manœuvre qui existent avec tige filetée et écrou (Boutet, Norelem...).



18. Dimensions de quelques écrous manœuvrables à la main.

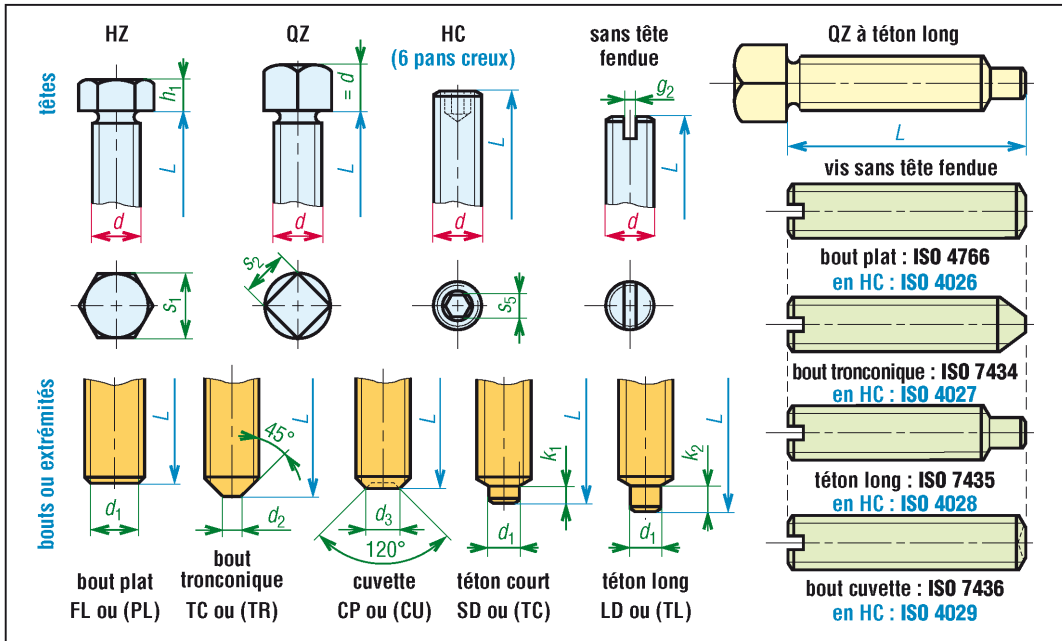
| Principales dimensions des écrous manœuvrables à la main | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--|--|--|--|--|--|--|
| d | h_1 | D_1 | t_1 | k_1 | g_1 | h_2 | D_2 | t_2 | k_2 | g_2 | h_3 | D_3 | t_3 | n_3 | d | h_4 | D_4 | t_4 | f_4 | f'_4 | D'_4 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | 9 | 10 | 16 | 1,5 | 1 | 12 | 8 | 22 | 4 | 4 | 18 | 12 | 16 | 10 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | 12 | 14 | 20 | 2,5 | 1,4 | 13 | 9 | 26 | 5 | 6 | 20 | 12 | 20 | 12 | 7 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | 12 | 14 | 20 | 2,5 | 1,4 | 15 | 11 | 30 | 6 | 6 | 24 | 13 | 25 | 13 | 12 | 12 | | | | | | | |
| 6 | 20 | 12 | 32 | 6 | 2 | 14 | 16 | 24 | 2,5 | 1,4 | 18 | 13 | 35 | 8 | 6 | 28 | 16 | 30 | 12 | 12 | 14 | | | | | | | |
| 8 | 25 | 14 | 40 | 7 | 2 | 17 | 20 | 30 | 3 | 1,9 | 22 | 16 | 42 | 10 | 8 | 24 | 13 | 25 | 15 | 11 | 12 | | | | | | | |
| 10 | 32 | 18 | 50 | 8 | 3 | 20 | 28 | 36 | 4 | 2,9 | 25 | 18 | 48 | 11 | 8 | 28 | 16 | 30 | 14 | 14 | 14 | | | | | | | |
| 12 | 40 | 20 | 63 | 10 | 3 | 24 | 32 | 40 | 4 | 3,9 | 28 | 21 | 54 | 12 | 8 | 33 | 17 | 35 | 20 | 14 | | | | | | | | |
| 14 | 50 | 25 | 80 | 12 | 4 | | | | | | 31 | 24 | 62 | 14 | 10 | 28 | 16 | 30 | 18 | 14 | 14 | | | | | | | |
| 16 | 50 | 25 | 80 | 12 | 4 | | | | | | 35 | 28 | 70 | 16 | 10 | 37 | 20 | 40 | 23 | 22 | 18 | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | 39 | 31 | 78 | 18 | 10 | 43 | 20 | 45 | 26 | 22 | 20 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 10 | 48 | 22 | 50 | 30 | 22 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 12 | 33 | 17 | 35 | 23 | 14 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 12 | 37 | 20 | 40 | 23 | 21 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 12 | 43 | 20 | 45 | 30 | 21 | 20 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 12 | 48 | 22 | 50 | 31 | 22 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 18 | 48 | 22 | 50 | 22 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | f_4 sans insert ; f_4 avec insert | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 39 | 70 | 22 | | 18 | 33 | 24 | 71 | 20 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 39 | 70 | 22 | 14 | 24 | 33 | 24 | 71 | 20 | 11 | 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 44 | 80 | 25 | 14 | 24 | 43 | 31 | 93 | 26 | 14 | - | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 50 | 90 | 28 | - | 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 39 | 70 | 22 | 14 | 20 | 43 | 31 | 93 | 26 | 14 | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 44 | 80 | 25 | 22 | 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 50 | 90 | 28 | - | 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 50 | 90 | 28 | 21 | 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | 56 | 41 | 21 | 34 | - | 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | 56 | 41 | 21 | 34 | 24 | - | | | | | | | | | | | | | | | | | |

4. Vis de pression, de guidage ou d'arrêt

Pour ces vis à une forme de tête donnée, on peut choisir, suivant les besoins (guidage, pression ou arrêt), plusieurs extrémités et plusieurs classes de qualité possibles. Pas gros ou fin.

Têtes usuelles : hexagonale réduite (symbole HZ), carrée réduite (symbole QZ), sans tête à pans creux (HC) et sans tête fendue. Bouts ou extrémités normalisés : NF EN ISO 4753 ; caractéristiques mécaniques. NF EN ISO 898-5 ; matériaux : acier, acier inoxydable, non ferreux.

Exemples de désignation : vis sans tête ISO 4766-M5×12-14H (sans tête fendue ; bout plat ; $d = 5$, $L = 12$, qualité 14H ; vis sans tête à téton long HC, M8-40-45H).



19. Dimensions des vis de pression (d_1 : h14 ; d_2 : h16 et d_3 tolérance h14).

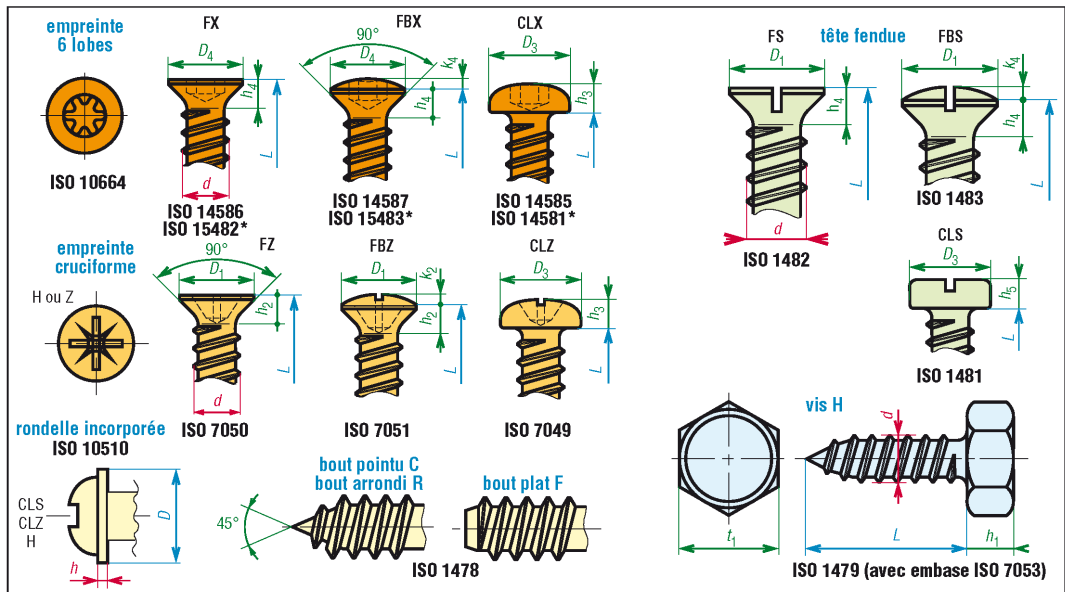
Autres bouts : pointeau à 90° (CN) ; pointu fileté (CA) ; bombé (RN) à $R \approx 1,4 d$; auto-nettoyeur (SC) ; pilote plat (PF) ; pilote tronconique (PC) ; brut RL ; chanfreiné (CH).

NFE 25-133 : tête HZ + bout TL ; NFE 25-134 : tête QZ + bout TC ; NF EN ISO 4028 : sans tête HC + bouts TC et TL ; NF EN ISO 4027 : sans tête HC + bout TR ; NF EN ISO 4026 : sans tête HC + bout PL ; NF EN ISO 4029 : sans tête HC + bout CU.

| Principales dimensions des vis de pression, d'arrêt et de guidage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|--|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| d | 1,6 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 24 | 30 | 36 | | | | | |
| pas | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 1 | 1,25 | 1,5 | 1,75 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | | | | | |
| h_1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| s_1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| s_2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| s_5 | 0,7 | 0,9 | 1,3 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | | | | | | | |
| g_2 | 0,25 | 0,25 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,2 | 1,6 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | | | | | | | |
| d_1 | 0,8 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3,5 | 4 | 5,5 | 7 | 8,5 | 12 | 15 | 18 | 23 | 28 | | | | | |
| d_2 | 0,4 | 0,5 | 0,65 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | | | | | |
| d_3 | 0,8 | 1 | 1,2 | 1,4 | 2 | 2,5 | 3 | 5 | 6 | 8 | 10 | 14 | 16 | | | | | | | |
| k_1 | 0,4 | 0,5 | 0,65 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7,5 | 9 | | | | | |
| k_2 | 0,8 | 1 | 1,25 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 15 | 18 | | | | | |
| longueurs : vis HZ et QZ (longueurs avec *) | | | | | | longueurs des vis sans tête (L^* pour téton) – extraits | | | | | | | | | | | | | | |
| d | 12 | 16 | 20 | 24 | 30 | 36 | d | 1,6 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 24 |
| L | 25 | 30 | 40 | 45 | 60* | 80* | L | 2 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | | 12 | 16 | | |
| | 30 | 35 | 45 | 50* | 70* | 90* | | 2,5 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8* | 10* | 10* | 16* | 20* | 20 | |
| | 35 | 40 | 50* | 60* | 80* | 100* | | 3 | 3* | 4* | 5* | 6* | 8* | 10* | 12* | 12* | 20* | 25* | 25 | 25 |
| | 40 | 45 | 60* | 70* | 90* | 120* | | 4 | 4* | 5* | 6* | 8* | 10* | 12* | 16* | 16* | 25* | 30* | 30 | 30 |
| | 45 | 50* | 70* | 80* | 100* | 140* | | 5 | 5* | 6* | 8* | 10* | 12* | 16* | 20* | 20* | 30* | 35* | 35 | 35 |
| | 50* | 60* | 80* | 90* | 120* | 160* | | 6 | 6* | 8* | 10* | 12* | 16* | 20* | 25* | 25* | 35* | 40* | 40 | 40 |
| | 60* | 70* | 90* | 100* | 140* | 180* | | 8 | 8* | 10* | 12* | 16* | 20* | 25* | 30* | 30* | 40* | 45* | 45 | 45 |
| | 70* | 90* | 100* | 120* | 160* | 200* | | | 10* | 12* | 16* | 20* | 25* | 30* | 35* | 35* | 45* | 50* | 50 | 50 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 40* | 45* | 50* | 55* | 55 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | 50* | 55* | 60* | 60 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | 60* | | | |

Principales classes de qualité : 14H (HV10 = 140) ; 22H (HV10 = 220) ; 33H (HV10 = 330) ; 45H (HV10 = 450).

5. Vis à tôle (extrait)



20. Dimensions des vis à tôle (norme NF EN ISO). * Cas des vis auto-perceuses (ISO...). Aciers et Aciers inox.

| Principales dimensions normalisées des vis à tôle | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------|
| d | h_1 maxi | t_1 maxi | h_2 maxi | D_1 maxi | k_2 | h_3 maxi | D_3 maxi | h_4 maxi | D_4 maxi | k_4 maxi | h_5 maxi | longueurs L |
| ST 2,2 | 1,6 | 3,2 | 1,1 | 4,4 | 0,5 | 1,6 | 4 | 1,1 | | 0,5 | 1,3 | 4,5-6,5-9,5-13-16 |
| ST 2,9 | 2,3 | 5 | 1,7 | 6,3 | 0,7 | 2,4 | 5,6 | 1,7 | 6,3 | 0,7 | 1,8 | 6,5-9,5-13-16-19 |
| ST 3,5 | 2,6 | 5,5 | 2,35 | 8,2 | 0,8 | 2,6 | 7 | 2,35 | 8,2 | 0,8 | 2,1 | 6,5-9,5-13-16-19-22 |
| ST 4,2 | 3 | 7 | 2,6 | 9,4 | 1 | 3,1 | 8 | 2,6 | 9,4 | 1 | 2,4 | 9,5-13-16-19-22-25 |
| ST 4,8 | 3,8 | 8 | 2,8 | 10,4 | 1,2 | 3,7 | 9,5 | 2,8 | 10,4 | 1,2 | 3 | 9,5-13-16-19-22-25-32 |
| ST 5,5 | 4,1 | 8 | 3 | 11,5 | 1,3 | 4 | 11 | 3 | 11,5 | 1,3 | 3,2 | 13-16-19-22-25-32 |
| ST 6,3 | 4,7 | 10 | 3,15 | 12,6 | 1,4 | 4,6 | 12 | 3,15 | 12,6 | 1,4 | 3,6 | 13-16-19-22-25-32-38 |
| ST 8 | 6 | 13 | 4,65 | 17,3 | 2 | 6 | 16 | 4,65 | | 2 | 4,8 | 16-19-22-25-32-38-45-50 |
| ST 9,5 | 7,5 | 16 | 5,25 | 20 | 2,3 | 7,5 | 20 | 5,25 | | 2,3 | 6 | 16-19-22-25-32-38-45-50 |

| Diamètres de perçage pour vis à tôle - Vis à rondelle incorporée - Résistance en torsion | | | | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------------|-------|--------|--------|---------|-----------|-----------|---------|---------|--|
| bout (matière) | épaisseur tôle | diamètre normal ST | | | | | | | | | |
| | | 2,2 | 2,9 | 3,5 | 4,2 | 4,8 | 5,5 | 6,3 | 8 | 9,5 | |
| bout pointu (acier) | 0,4 à 0,5 | 1,6 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 3,1 | - | - | - | |
| | 0,6 à 0,8 | 1,7 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,9 | 3,1 | 3,4 | 3,9 | 4,8 | |
| | 0,8 à 1 | 1,8 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 3 | 3,2 | 3,5 | 4 | 4,9 | |
| | 1,2 à 1,5 | - | - | - | - | 3,2 | 3,5 | 3,8 | 4 | 5 | |
| bout plat (acier et laiton) | 0,4 à 0,5 | 1,6 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | - | - | - | - | - | |
| | 0,6 à 0,8 | 1,7 | 2,4 | 2,5 | 2,7 | 3 | 3,1 | 3,7 | 4,2 | - | |
| | 0,8 à 1 | 1,8 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 3 | 3,1 | 3,7 | 4,2 | 4,9 | |
| | 1,2 à 1,5 | 1,8 | 2,5 | 2,7 | 2,9 | 3,2 | 3,4 | 3,8 | 4,4 | 5 | |
| | 2 à 2,5 | - | - | 2,9 | 3,1 | 3,5 | 3,6 | 4 | 4,6 | 5,4 | |
| 3 à 3,5 | - | - | - | - | - | 3,8 | 4,3 | 5 | 5,8 | | |
| bout plat (aluminium et alliages) | 0,6 à 0,8 | 1,6 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,9 | 2,9 | - | - | - | |
| | 0,8 à 1 | 1,6 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,9 | 3 | 3,1 | - | - | |
| | 1,2 à 1,5 | 1,7 | 2,2 | 2,4 | 2,7 | 3 | 3,3 | 3,6 | 4,1 | 5,1 | |
| | 2 à 2,5 | 1,7 | 2,3 | 2,5 | 2,8 | 3,3 | 3,6 | 3,8 | 4,5 | 5,3 | |
| | 3 à 3,5 | - | - | 2,6 | 3 | 3,5 | 3,8 | 4 | 4,6 | 5,8 | |
| bout plat (matériaux moulés) | métaux tendres | 2 | 2,6 | 3 | 3,2 | 3,6 | 3,9 | 4,5 | 5,1 | 5,9 | |
| | plastiques | 1,9 | 2,5 | 2,9 | 3,1 | 3,4 | 3,7 | 4,3 | 4,9 | 5,6 | |
| rondelle N (ou L) | h | 1 (1) | 1 (1) | 1 (1) | 1 (1) | 1 (1,6) | 1,6 (1,6) | 1,6 (1,6) | 1,6 (2) | 2 (2,5) | |
| | D | 5 (7) | 7 (9) | 8 (11) | 9 (12) | 10 (15) | 12 (15) | 14 (18) | 16 (24) | 20 (30) | |
| résistance torsion (Nm) | | 0,45 | 1,5 | 2,7 | 4,4 | 6,3 | 10 | 13,6 | 30,5 | 68 | |

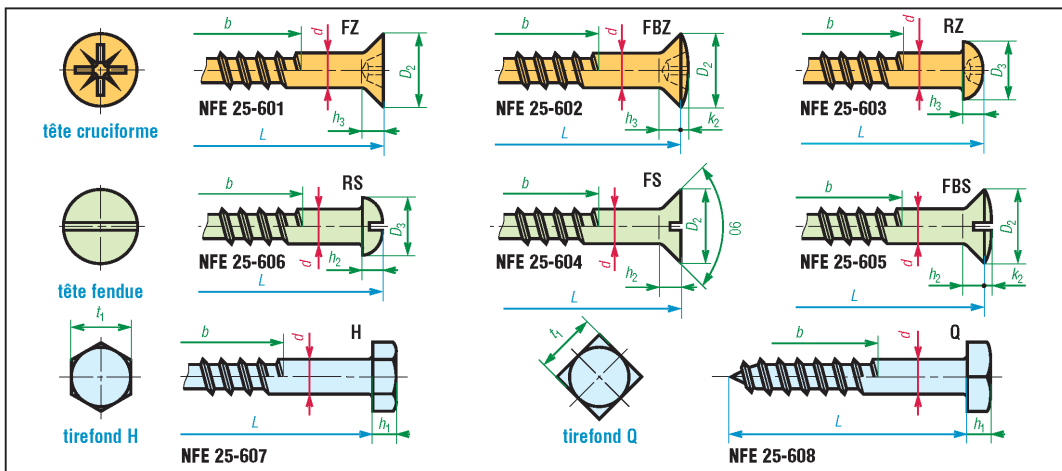
Exemple de désignation : vis à tôle ISO 1482-ST3,5x16-C (tête FZ, $d = 3,5$, $L = 16$, bout C); vis FX, ST4,8-32,C (tête FX, $d = 4,8$, $L = 32$, bout C).

Il existe plusieurs têtes et extrémités possibles pour ces vis qui ne nécessitent pas de taraudage avant montage (principe des vis à bois) et qui sont filetées sur toute la longueur.
 Les plus récentes sont autotaraudeuses (extrémité avec entaille tranchante qui fonctionne sur le principe du taraud) et exigent un couple de serrage plus élevé. Cémentées et revenues.
 Le bout pointu (symbole C) est plutôt utilisé avec des tôles minces ($e \leq 1,5$), le bout plat (symbole F) avec des tôles plus épaisses et des trous borgnes. Elles existent en aciers inoxydables.
 Utilisation : tôles d'acier, métaux tendres, plastiques, fibres végétales...

6. Vis à bois

Les tirefonds H et Q permettent les serrages les plus énergiques. Plusieurs matériaux sont possibles : acier, laiton, aluminium, inox... sans finition ou revêtus (zinc...)

Exemple de désignation : vis FBS, VB 6-80 (pour vis fraisée bombée fendue, $d = 6$, $L = 80$)



21. Dimensions des vis à bois.

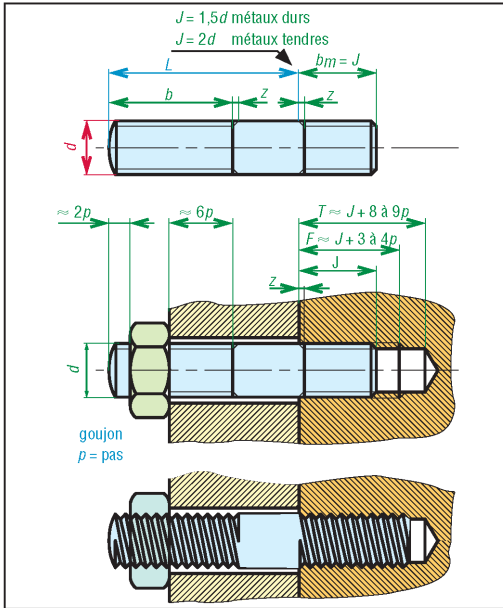
| Principales dimensions normalisées des vis à bois | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| d | h_1 | t_1 | h_2 | D_2 | k_2 | h_3 | D_3 | longueurs L et longueurs filetées correspondantes b (vis H et Q, pour $d = 5$, $d = 6$, $d = 7$ prendre les valeurs L^*) | | | | | | | | | | | | |
| 1,6 | | | 0,9 | 3 | - | 1,2 | 2,8 | L 8 10 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 5 6 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | 1,1 | 3,8 | 0,5 | 1,6 | 3,5 | L 8 10 12 16 20 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 5 6 8 10 12 | | | | | | | | | | | | |
| 2,5 | | | 1,5 | 4,7 | 0,6 | 2,2 | 4,5 | L 8 10 12 16 20 25 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 5 6 8 10 12 15 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | 1,7 | 5,5 | 0,7 | 2,5 | 5,5 | L 10 12 16 20 25 30 35 40 45 50 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 6 8 10 12 15 18 21 24 27 30 | | | | | | | | | | | | |
| 3,5 | | | 2,4 | 7,3 | 0,8 | 2,5 | 6,5 | L 10 12 16 20 25 30 35 40 45 50 60 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 6 8 10 12 15 18 21 24 27 30 36 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | 2,7 | 8,4 | 1 | 3 | 7 | L 10 12 16 20 25 30 35 40 45 50 60 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 6 8 10 12 15 18 21 24 27 30 36 | | | | | | | | | | | | |
| 4,5 | | | 2,7 | 8,9 | 1,1 | 3,5 | 8 | L 16 20 25 30 35 40 45 50 60 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 10 12 15 18 21 24 27 30 36 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 3,5 | 8 | 2,7 | 9,3 | 1,2 | 4 | 9 | L 16 20 25* 30* 35* 40* 45* 50* 60 70 80 90 100 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 10 12 15 18 21 24 27 30 36 43 47 50 53 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 4 | 10 | 3,3 | 11,3 | 1,4 | 4,5 | 11 | L 20 25 30* 35* 40* 45* 50* 60* 70 80 90 100 120 140 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 12 15 18 21 24 27 30 36 43 47 50 53 60 67 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 5,3 | 13 | 4,7 | 15,8 | - | 5,5 | 14 | L 30* 35* 40* 45* 50* 60* 70* 80* 90 100 120 140 160 180 200 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 18 21 24 27 30 36 43 47 50 53 60 67 73 80 87 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 6,4 | 17 | | | | | | L 40 45 50 60 70 80 90 90 100 120 140 160 180 200 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 24 27 30 36 43 47 50 50 53 60 67 73 80 87 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 7,5 | 19 | | | | | | L 45 50 60 70 80 90 100 120 140 160 180 200 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 27 30 36 43 47 50 53 60 67 73 80 87 | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 10 | 24 | | | | | | L 60 70 80 90 100 120 140 160 180 200 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 36 43 47 50 53 60 67 73 80 87 | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 12,5 | 30 | | | | | | L 80 90 100 120 140 160 180 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | b 47 50 53 60 67 73 80 | | | | | | | | | | | | |

7. Goujons

Il se compose d'une tige filetée à ses deux extrémités séparées par un tronçon lisse et d'un écrou (H, Q...) de même diamètre d .

La longueur z peut être une gorge, le diamètre de la partie lisse peut être réduit, b peut avoir plusieurs valeurs, le bout être plat ou non...

Exemple de désignation : goujon M 12-90, bm 18, classe 8-8 (goujon de diamètre 12, longueur $L = 90$, longueur d'implantation $J = b_m = 1,5 d = 18$, classe de qualité 8-8).



22. Dimensions des goujons (NF E 27-135).

| Principales dimensions normalisées des goujons | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|-------|-----|-------|------|-----|
| d | M5 | M6 | M8 | M10 | M12 | (M14) | M16 | (M18) | M20 | M24 |
| pas | 0,80 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2 | 2,2 | 2,50 | 2,50 | 3 |
| z_{maxi} | 2 | 2,5 | 3,2 | 3,8 | 4,4 | 5 | 5 | 6,3 | 6,3 | 7,5 |
| b_{mini} | 16 | 18 | 22 | 26 | 30 | 34 | 38 | 42 | 46 | 54 |
| L | 30 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 70 | 80 |
| | 35 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| | 40 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| | 45 | 45 | 50 | 55 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 120 |
| | 50 | 50 | 55 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 120 | 140 |
| | | 55 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 120 | 140 | |
| | | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 120 | 140 | | |
| | | | 80 | 90 | 100 | 120 | 140 | | | |
| | | | | 100 | 120 | 140 | | | | |

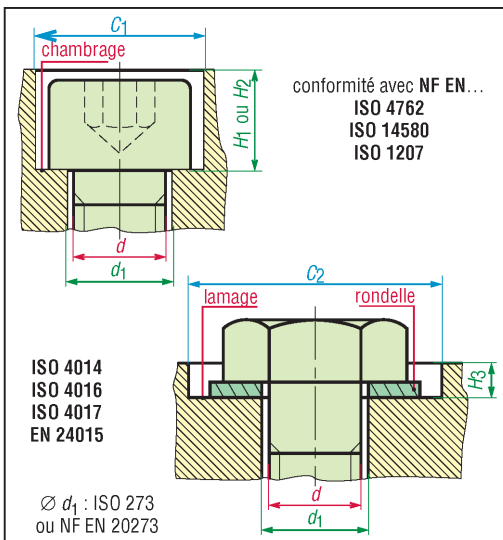
Goujons usuels : implantation $b_m = J = 1,5d$.

8. Lamages et chambrages

Ils doivent permettre le passage des outils de serrage. À cette fin, les diamètres indiqués peuvent être augmentés, ou diminués pour d'autres raisons : optimisation, assemblage, outillage...

Le diamètre C_1 est à utiliser avec des vis CHC (hauteur H_1) et CZX (empreinte torx ou 6 lobes : hauteur H_2) ; il permet le passage d'une rondelle grower.

Le diamètre C_2 est à utiliser avec des vis ou des écrous hexagonaux.



23. Dimensions des lamages et des chambrages.

| Dimensions normalisées des lamages | | | | | | |
|------------------------------------|--------------------|------------|---------------------|---------------------|------------|-------------------|
| d | d_1 moyen H13 | C_1 mini | H_1 mini (CHC) | H_2 mini (CZX) | C_2 mini | H_3 mini (H) |
| 1,6 | 1,8 | 5 | 1,7 | 1,2 | 8,5 | 1,3 |
| 2 | 2,4 | 6 | 2,1 | 1,7 | 10 | 1,6 |
| (2,5) | 2,9 | 7 | 2,7 | 2,0 | 11 | 2,0 |
| 3 | 3,4 | 8 | 3,2 | 2,6 | 12 | 2,3 |
| (3,5) | 3,9 | 8 | - | 2,8 | 14 | 3,1 |
| 4 | 4,5 | 10 | 4,2 | 3,3 | 16,5 | 3,1 |
| 5 | 5,5 | 11 | 5,3 | 3,9 | 19,5 | 4,1 |
| 6 | 6,6 | 13 | 6,3 | 4,7 | 22 | 5,6 |
| 8 | 9 | 18 | 8,4 | 6,1 | 28,5 | 6,0 |
| 10 | 11 | 20 | 10,5 | 7,3 | 37 | 7,2 |
| 12 | 13,5 | 22 | 12,6 | | 42 | 8,4 |
| (14) | 15,5 | 26 | 14,7 | | 47 | 9,8 |
| 16 | 17,5 | 30 | 16,8 | | 52 | 11,3 |
| (18) | 20 | 32 | 18,9 | | 60 | 13,1 |
| 20 | 22 | 36 | 21,0 | | 64 | 14,5 |
| 24 | 26 | 42 | 25,5 | | 79 | 17,0 |
| 30 | 33 | 53 | 31,5 | | 96 | 21,0 |
| 36 | 39 | 63 | 38,0 | | 98 | 25,0 |

Norme E 25-017 (extrait) avec H_2 révisé. d_1 voir ISO 273.

9. Rondelles

a) Rondelles d'appui

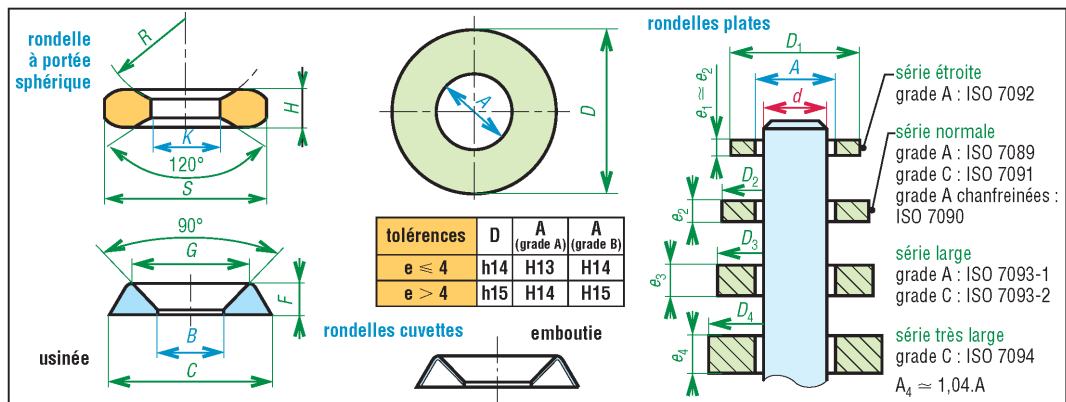
Elles augmentent la surface d'appui, réduisent la pression de serrage, le marquage des pièces plus tendres et ne tournent pas pendant le serrage. Elles n'assurent pas un freinage efficace de la vis ou de l'écrou.

Rondelles plates : d'emploi usuel, elles existent en quatre séries de dimensions : étroite, normale, large et très large. Deux qualités : grade A (duretés 200 HV et 300 HV ; Ra 1,6 à 6,3 ; acier et acier inox) et grade C (duretés 100 HV ; acier). Elles peuvent être chanfreinées, brunies, zinguées, cadmiées, phosphatées, bichromatées...

Désignation : ISO 7089-8-200 HV (série normale, grade A, d=8, dureté 200 HV, acier)

Rondelles cuvettes : elles sont utilisées avec des vis à têtes fraisées (F...). Emboutie ou usinée, la surface externe peut être polie et brillante. Norme NFE 27-619.

Rondelles à portée sphérique : utilisées avec un écrou à portée sphérique, elles compensent une inclinaison de la vis par rapport à la face d'appui. Voir NFE 27-615 et NF EN 2648.



24. Dimensions des rondelles d'appui.

| Dimensions normalisées des principales rondelles d'appui | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|----|----|----|----------------|-------------------------------|-----------------------------|-----|-----|
| d | A | D ₁ | D ₂ | D ₃ | D ₄ | e ₂ | e ₃ | e ₄ | H | K | S | R | d | B | C | F | G |
| 1,6 | 1,7 | 3,5 | 4 | 5 | | 0,3 | 0,3 | - | | | | | 3 | 3,5 | 9 | 2 | 6,5 |
| 2 | 2,2 | 4 | 5 | 6 | | 0,3 | 0,5 | - | | | | | 4 | 4,5 | 11 | 2,5 | 8 |
| 2,5 | 2,7 | 5 | 6 | 8 | | 0,5 | 0,5 | - | | | | | 5 | 5,5 | 14 | 3 | 10 |
| 3 | 3,2 | 6 | 7 | 9 | | 0,5 | 0,8 | - | | | | | 6 | 7 | 16 | 3,5 | 12 |
| 4 | 4,3 | 8 | 9 | 12 | | 0,8 | 1 | - | 3 | 5 | 10 | 8 | 8 | 9 | 22 | 4,5 | 16 |
| 5 | 5,3 | 9 | 10 | 15 | 18 | 1 | 1,2 | 2 | - | - | - | - | 10 | 11 | 28 | 5,5 | 20 |
| 6 | 6,4 | 11 | 12 | 18 | 22 | 1,6 | 1,6 | 2 | 4 | 7 | 14 | 14 | 12 | 14 | 32 | 6,5 | 24 |
| 8 | 8,4 | 15 | 16 | 24 | 28 | 1,6 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 14 | 14 | 16 | 36 | 7,5 | 28 |
| 10 | 10,5 | 18 | 20 | 30 | 34 | 2 | 2,5 | 3 | 6 | 12 | 24 | 22 | | | | | |
| 12 | 13 | 20 | 24 | 37 | 44 | 2,5 | 3 | 4 | 7 | 14 | 27 | 22 | rondelle plate | vis hexagonale grade - classe | écrous hexa. grade - classe | | |
| 16 | 17 | 28 | 30 | 50 | 56 | 3 | 3 | 5 | 8 | 19 | 36 | 30 | C - 100 HV | C jusqu'à 6.8 | C jusqu'à 6 | | |
| 20 | 21 | 34 | 37 | 60 | 72 | 3 | 4 | 5 | 10 | 24 | 45 | 44 | A - 200 HV | A et B → 8.8 | A et B → 8 | | |
| 24 | 25 | 39 | 44 | 72 | 85 | 4 | 5 | 6 | 10 | 28 | 55 | 44 | A - 300 HV | A et B → 10.9 | A et B → 10 | | |
| 30 | 31 | 50 | 56 | 92 | 105 | 4 | 6 | 6 | 12 | 35 | 65 | 66 | | | | | |
| 36 | 37 | 60 | 66 | 110 | 125 | 5 | 6 | 8 | 14 | 42 | 75 | 66 | | | | | |

b) Rondelles freins élastiques

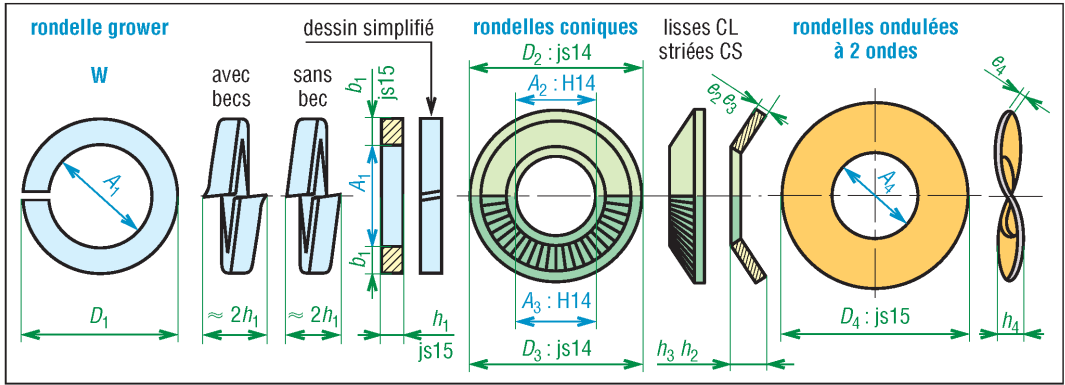
Le freinage de l'écrou est amélioré par l'élasticité de la rondelle.

Rondelles grower, pour vis de classe de qualité ≤ 10.9 : elles existent avec des becs qui s'incrustent dans la matière de la pièce ou sans bec. Trois séries sont possibles : courante W, réduite WZ et forte WL). On les trouvent en acier à ressort (44 à 50 HRc) ou en inox.

Exemple de désignation : rondelle NFE 25-515 W12 – enroulement à droite – avec becs.

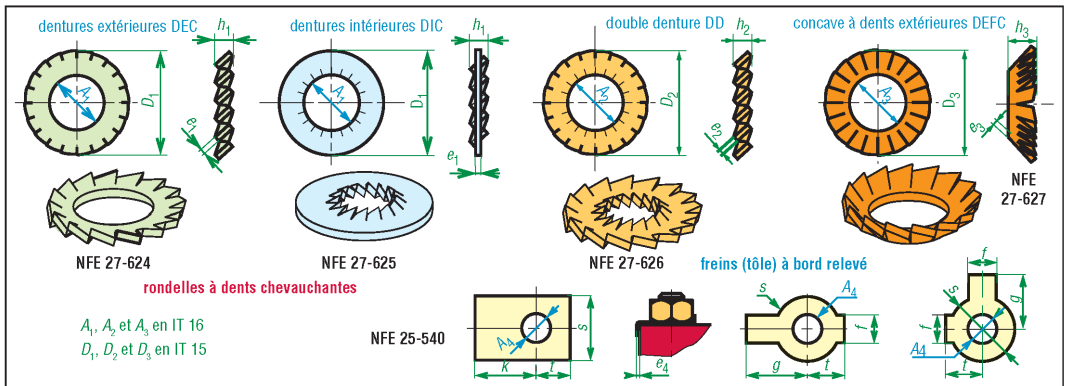
Rondelles coniques, pour vis de classe de qualité ≥ 8.8 : elles peuvent être lisses (symbole CL) ou striées (CS). Après serrage, la rondelle est plane et agit comme un ressort. Elles sont en acier à ressort (42 à 50 HRc). (CL) Norme NFE 25-510 ; (CS) NFE 25-511.

Rondelles ondulées à deux ondes, pour vis de classe de qualité ≤ 8.8 : elles sont souvent utilisées avec des pièces en matériaux tendres (alliages légers, plastiques) et existent avec 1 et 4 ondes. Elles existent en acier à ressort, bronze, inox...



25. Dimensions des rondelles freins élastiques.

| Principales dimensions normalisées des rondelles élastiques | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|----------------|---------------------------------|-------------------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| d | Grower W série courante | | | Grower WZ série réduite | | | Grower WL série forte | | | ondulées à 2 ondes | | | | rondelles coniques (F ₂ F ₃ en kN) | | | | | | | | |
| | A ₁ | D ₁ | h ₁ = b ₁ | D ₁ | h ₁ | b ₁ | D ₁ | h ₁ | b ₁ | A ₄ | D ₄ | e ₄ | h ₄ | d | A ₂ | D ₂ | e ₂ | F ₂ | A ₃ | D ₃ | e ₃ | F ₃ |
| 2 | | | | | | | | | | 2,2 | 4,5 | 0,3 | 0,9 | 3 | | | | | 3,1 | 6 | 0,5 | 2,4 |
| 2,5 | | | | | | | | | | 2,7 | 5 | 0,3 | 1 | 4 | | | | | 4,1 | 10 | 0,6 | 2,4 |
| 3 | 3,5 | 5,2 | 1 | 5,2 | 0,6 | 1 | 6,2 | 1 | 1,5 | 3,2 | 6 | 0,4 | 1,2 | 5 | 5,3 | 11 | 1,2 | 8,2 | 5,1 | 10 | 1 | 6,8 |
| 4 | 4,5 | 7,3 | 1 | 7,3 | 1 | 1,5 | 8,3 | 1,2 | 2 | 4,3 | 9 | 0,5 | 1,5 | 6 | 6,4 | 15 | 1,4 | 8,2 | 16 | 1,2 | 6,8 | |
| 5 | 5,5 | 8,3 | 1,5 | 8,3 | 1 | 1,5 | 10,3 | 1,5 | 2,5 | 5,3 | 10 | 0,5 | 1,7 | 8 | 8,4 | 18 | 1,7 | 12 | 18 | 1,4 | 9,5 | |
| 6 | 6,5 | 10,4 | 2 | 10,4 | 1,2 | 2 | 12,4 | 1,8 | 3 | 6,4 | 12 | 0,52 | 1,7 | 10 | 10,5 | 20 | 2,2 | 34 | 10,2 | 20 | 1,6 | 28 |
| 8 | 8,5 | 13,4 | 2,5 | 13,4 | 1,5 | 2,5 | 15,4 | 2 | 3,5 | 8,5 | 17 | 0,8 | 2,8 | 12 | 13 | 24 | 2,8 | 49 | 12,4 | 24 | 1,8 | 40 |
| 10 | 10,5 | 16,5 | 3 | 16,5 | 1,8 | 3 | 18,5 | 2,5 | 4 | 10,5 | 21 | 1 | 3,4 | 16 | 17 | 32 | 3,4 | 91 | 16,4 | 32 | 2,8 | 75 |
| 12 | 13 | 20 | 3,5 | 20 | 2 | 3,5 | 23 | 3 | 5 | 13 | 24 | 1,2 | 3,8 | 20 | 21 | 39 | 3,6 | 91 | 20,5 | 40 | 3,2 | 100 |
| 16 | 17 | 25 | 4 | 25 | 2,5 | 4 | 29 | 3,5 | 6 | 17 | 30 | 1,5 | 4,8 | 24 | 25 | 44 | 1,8 | 6,4 | | | | |
| 20 | 21 | 31 | 5 | 31 | 3 | 5 | 33 | 4,5 | 7 | 21 | 36 | 1,6 | 5,6 | 28 | 30 | 49 | | | | | | |
| 24 | 25 | 37 | 6 | 37 | 3,5 | 6 | 39 | 4,5 | 7 | 25 | 44 | 1,8 | 6,4 | 32 | 33 | 61 | | | | | | |
| 30 | 31 | 45 | 7 | 45 | 4,5 | 7 | — | — | — | — | — | — | — | 38 | 45 | 147 | | | | | | |
| | NFE 25-515 | | | NFE 25-516 | | | NFE 25-517 | | | NFE 27-620 | | | | NFE 25-510 | | | | | | NFE 25-511 | | |



26. Dimensions des rondelles à dents chevauchantes et des freins à bord relevé (acier, inox, Cu et CuZn).

| Principales dimensions normalisées des rondelles à dents et freins à bord** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|--------|-------------------|-------|-----------------|-----------------|------------------|
| d | A ₁ | D ₁ | e ₁ | h ₁ * | A ₂ | D ₂ | e ₂ | h ₂ * | A ₃ | D ₃ | e ₃ | h ₃ * | A ₄ | e ₄ | | t _{mini} | k ± 1 | s ₊₁ | t ₊₁ | g ₀₋₂ |
| | | | | | | | | | | | | | | acier | laiton | | | | | |
| 2 | 2,1 | 4,5 | 0,3 | 0,6 | | | | | 2,1 | 4,5 | 0,15 | 0,3 | | | | | | | | |
| 2,5 | 2,6 | 5,5 | 0,3 | 0,6 | | | | | 2,6 | 5,5 | 0,2 | 0,45 | | | | | | | | |
| 3 | 3,1 | 6 | 0,4 | 0,7 | 3,1 | 12 | 0,5 | 1 | 3,1 | 6 | 0,2 | 0,45 | | | | | | | | |
| 4 | 4,1 | 8 | 0,5 | 0,9 | 4,1 | 15,5 | 0,8 | 1,5 | 4,2 | 8 | 0,25 | 0,6 | | | | | | | | |
| 5 | 5,1 | 9,2 | 0,6 | 1 | 5,1 | 17,5 | 0,8 | 1,6 | 5,2 | 10 | 0,3 | 0,7 | 5,5 | 0,5 | 1 | 7 | 14 | 10 | 5 | 13 |
| 6 | 6,1 | 11 | 0,7 | 1,1 | 6,1 | 18 | 0,9 | 1,8 | 6,3 | 12 | 0,3 | 0,8 | 7 | 0,5 | 1 | 8 | 16 | 16 | 6 | 16 |
| 8 | 8,2 | 14 | 0,8 | 1,3 | 8,2 | 22 | 1 | 1,9 | 8,3 | 15,5 | 0,4 | 1,1 | 9 | 1 | 2 | 11 | 20 | 20 | 8 | 18 |
| 10 | 10,2 | 18 | 0,9 | 1,4 | 10,2 | 26 | 1,1 | 2,0 | 10,4 | 19 | 0,4 | 1,2 | 11 | 1 | 2 | 14 | 22 | 25 | 9 | 23 |
| 12 | 12,3 | 20 | 1 | 1,5 | 12,3 | 30 | 1,2 | 2,0 | 12,4 | 23 | 0,5 | 1,5 | 14 | 1 | 2 | 17 | 24 | 28 | 12 | 25 |
| 16 | 16,3 | 26 | 1,2 | 1,8 | 16,3 | 36 | 1,4 | 2,0 | 16,4 | 31 | 0,6 | 1,9 | 18 | 1 | 2 | 21 | 32 | 34 | 15 | 32 |
| 18 | 18,5 | 30 | 1,4 | 1,9 | | | | | 20 | 1 | 2 | 23 | 36 | 1 | 2 | 23 | 36 | 36 | 16 | 36 |
| 20 | 20,5 | 33 | 1,4 | 2 | | | | | 22 | 1 | 2 | 26 | 40 | 1 | 2 | 26 | 40 | 40 | 18 | 40 |
| 24 | 24,5 | 38 | 1,5 | 2,2 | | | | | 27 | 1,5 | 3 | 31 | 48 | 1,5 | 3 | 31 | 48 | 45 | 22 | 48 |
| 30 | 30,6 | 48 | 1,6 | 2,4 | | | | | 33 | 1,5 | 3 | 38 | 60 | 1,5 | 3 | 38 | 60 | 55 | 26 | 60 |

(*) h₁, h₂, h₃ sont des hauteurs après charge ; (**) A₄ ± 2,5 %, acier, Cu-a1, CuZn33 ou 36, X5CrNi18-10

c) Rondelles freins à dents (« éventail »)

Le freinage (40 % supérieur dans le cas d'une denture chevauchante) est obtenu par incrustation des dents dans les pièces assemblées et par l'élasticité générale. La forme concave (à 90°) s'utilise avec les vis à tête fraisée (90°). Normes NFE 27-624 à 627.

L'incrustation est favorable à l'établissement d'un contact électrique.

Elles existent en acier à ressort (bruni, zingué, cadmié, bichromaté), en inox, en bronze...

d) Principaux freins à sécurité absolue

Écrous à encoches avec rondelles à créneaux (voir chapitre 26 dimensions des roulements), écrous à créneaux (voir paragraphe écrous) et plaquettes arrêteurs (freinage obtenu en rabattant un bord sur la pièce et un autre sur l'écrou ; acier, inox, cuivre, laiton).

10. Écrous et inserts spéciaux : exemples typiques

Écrou à sertir : en acier zingué bichromaté, son immobilisation est obtenue par refoulement du métal (sertissage à la presse) sous la partie conique de l'écrou.

Douille autotaraudeuse : fonctionne comme un taraud, pour plastiques et alliages légers.

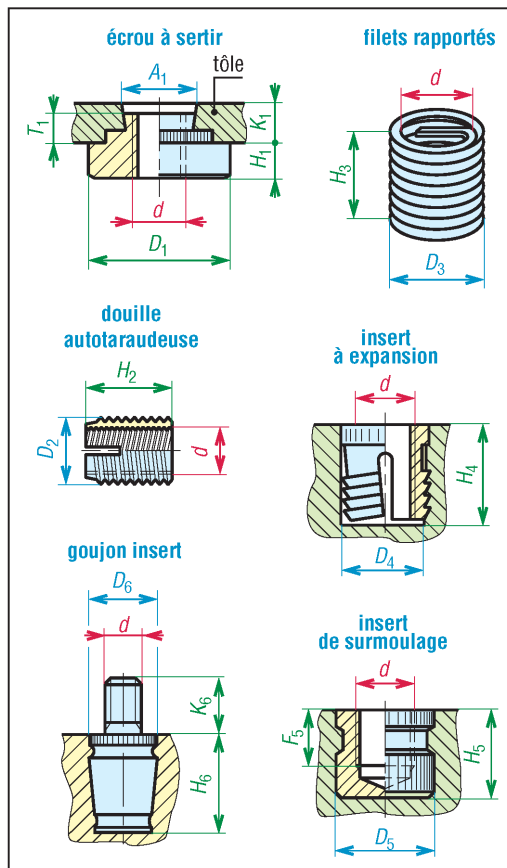
Filet rapporté : il ressemble à un ressort à spires jointives (section de forme losange en acier à ressort). La pièce doit être taraudée avec un taraud spécial.

Longueurs possibles $H_3 = 1,5d$ ($2d - 2,5d$ et $3d$), pas fin ou pas gros.

Insert à expansion : il fonctionne comme une cheville usuelle. Au moment du serrage, les demi parties inférieures s'écartent et s'incrudent dans le matériau de la pièce, pour les plastiques et les métaux tendres. Schématisation ISO des inserts, voir page 580.

Insert de surmoulage : pour les matières plastiques, l'insert est mis dans le moule juste avant moulage. L'ensemble se solidarise au refroidissement.

Goujons-inserts : pose par ultrasons ou thermique. Il existe des variantes pour surmoulage (matières plastiques).



Principales dimensions des écrous et inserts spéciaux

| d | A_1 écrou | A_1 (tôle) | H_1 | D_1 | K_1 | T_1 | D_2 | H_2 | D_3 | D_3 perçage |
|-----|----------------|-----------------|-------|-------|------------------------|--------------|-------|-------|-------|------------------|
| 2,5 | 4,15 | 4,2 | 1,6 | 6,4 | 1,1 à 1,4 1,5 à 2,3 | 1,05 1,45 | 4 | 4 | | |
| 3 | 4,70 | 4,75 | 1,6 | 7,1 | idem | idem | 5 | 6 | 3,65 | 3,2 |
| 4 | 5,35 | 5,4 | 2,4 | 7,9 | idem | idem | 7 | 8 | 4,90 | 4,2 |
| 5 | 6,30 | 6,35 | 2,4 | 8,7 | idem | idem | 8 | 10 | 6,05 | 5,2 |
| 6 | 8,70 | 8,75 | 4,4 | 11,1 | 1,4 à 2,3 2,4 à 3,2 | 1,35 2,3 | 10 | 12 | 7,05 | 6,3 |
| 8 | 10,45 | 10,5 | 6,0 | 12,7 | idem | idem | 12 | 15 | 9,6 | 8,3 |
| 10 | 12,65 | 12,7 | 6,7 | 14,3 | 2,3 à 3,2 3,3 à 6,3 | 2,2 3,1 | 15 | 18 | 12 | 10,3 |
| 12 | 16,60 | 16,65 | 9,1 | 20,6 | 3,2 à 6,3 ≥ à 6,4 | 3,1 6 | 18 | 22 | 14,3 | 12,5 |
| 14 | | | | | | | 20 | 24 | 16,6 | 14,6 |
| 16 | | | | | | | | | 18,6 | 16,6 |

| d | D_4 | H_4 | D_5 | F_5 | H_5 | D_6 | H_6 | K_6 |
|-----|-------|---------|-------|--------|-----------|-------|-------|----------|
| 2,5 | 4 | 4 | | | | 4,1 | 5 | 5-10 |
| 3 | 5 | 5-8-9,5 | 4,5 | 3-4,5* | 5,5-7* | 4,7 | 5,5 | 5-10-15 |
| 4 | 6 | 5-8-9,5 | 5,8 | 4-6* | 7-9* | 6,1 | 7,5 | 5-10-15 |
| 5 | 7 | 6-9 | 7,3 | 5-7,5* | 8,3-10,3 | 7,6 | 9 | 10-15-20 |
| 6 | 8 | 7-9 | 8,3 | 6-9* | 9,8-12,8* | 8,7 | 10 | 10-15-20 |
| 8 | 10 | 10 | | | | | | |

27. Dimensions de quelques écrous rapportés et inserts.

$$H_3 = 1,5d - 2d - 2,5d \text{ et } 3d$$

III - Goupilles

Les goupilles sont des organes de liaison simples et peu coûteux, utilisées soit pour immobiliser (goupilles d'arrêt) soit pour positionner ou centrer (goupilles de positionnement) un composant par rapport à un autre. Elles travaillent le plus souvent au cisaillement.

1. Goupilles élastiques NF EN ISO 8752 et 13337

En acier au carbone St ou en acier inoxydable A ou C, la goupille, dont le diamètre est plus grand que celui du trou, est comprimée dans son logement après montage, ce qui assure son maintien en position. **Désignation : goupille élastique ISO 8752-6 × 30-St.**

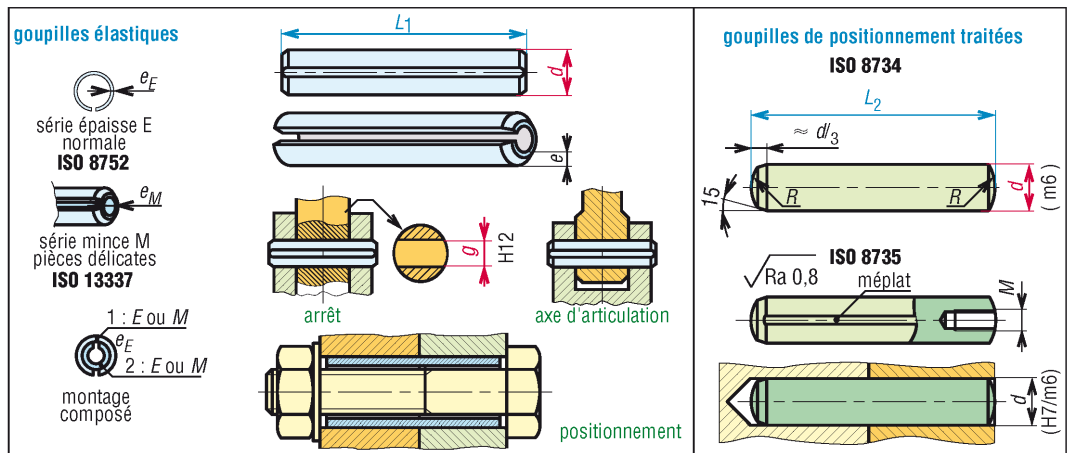
La série épaisse E est celle utilisée normalement. Si les efforts de cisaillement sont importants, on peut mettre deux goupilles l'une dans l'autre. Dureté 420 à 560 HV en acier St.

La série M est réservée aux montages "délicats". Il existe des variantes non enchevêtrables (type N) et spiralées (ISO 8751...). Contrainte admissible au cisaillement 700 MPa.

2. Goupilles cylindriques de positionnement

Elles permettent des positionnements précis entre pièces et existent traitées (trempée à cœur ou cémentée) ou non traitées. Diverses variantes sont proposées : avec méplat, trou taraudé pour extraction, extrémités optionnelles, différents revêtements (phosphatation, Zn...).

Désignation : goupille cylindrique ISO 8734-6 · 30-A-St (pour goupille type A, Ød = 6 ; L = 30 ; acier St).



28. Dimensions des goupilles élastiques et des goupilles de positionnement.

| Extraits de dimensions normalisées NF / ISO | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|----------------|----------------|----------------|------|-------|----------------|----------------|----------------|---|-----------------------|-----|
| goupilles élastiques (ISO 8752 et 13337)* | | | | | | | | | | goupilles de positionnement (ISO 8734/35) | | |
| g | d min | e _E | e _M | L ₁ | g | d min | e _E | e _M | L ₁ | d | L ₂ (js13) | M |
| 1 | 1,2 | 0,2 | — | 4 à 20 | 12 | 12,5 | 2,5 | 1 | 10 à 180 | 2 | 5 à 20 | |
| 1,5 | 1,7 | 0,3 | — | 4 à 20 | 13 | 13,5 | 2,5 | 1,2 | 10 à 180 | 2,5 | 6 à 24 | |
| 2 | 2,3 | 0,4 | 0,2 | 4 à 30 | 14 | 14,5 | 3 | 1,5 | 10 à 200 | 3 | 8 à 30 | |
| 2,5 | 2,8 | 0,5 | 0,25 | 4 à 30 | (15) | 15,5 | 3 | 1,5 | 10 à 200 | 4 | 10 à 40 | |
| 3 | 3,3 | 0,6 | 0,3 | 4 à 40 | 16 | 16,5 | 3 | 1,5 | 10 à 200 | 5 | 12 à 50 | |
| 3,5 | 3,8 | 0,75 | 0,35 | 4 à 40 | 18 | 18,5 | 3,5 | 1,7 | 10 à 200 | 6 | 14 à 60 | M4 |
| 4 | 4,4 | 0,8 | 0,5 | 4 à 50 | 20 | 20,5 | 4 | 2 | 10 à 200 | 8 | 18 à 80 | M5 |
| 4,5 | 4,9 | 1 | 0,5 | 5 à 50 | 21 | 21,5 | 4 | 2 | 14 à 200 | 10 | 22 à 100 | M6 |
| 5 | 5,4 | 1 | 0,5 | 5 à 80 | 25 | 25,5 | 5 | 2 | 14 à 200 | 12 | 26 à 100 | M6 |
| 6 | 6,4 | 1,2 | 0,75 | 10 à 100 | 28 | 28,5 | 5,5 | 2,5 | 14 à 200 | 16 | 40 à 100 | M8 |
| (7) | 7,5 | 1,2 | 0,75 | 10 à 100 | 30 | 30,5 | 6 | 2,5 | 14 à 200 | 20 | 50 à 100 | M10 |
| 8 | 8,5 | 1,5 | 0,75 | 10 à 120 | 32 | 32,5 | 6 | — | 20 à 200 | 25 | 50 à 120 | M16 |
| (9) | 9,5 | 2 | 1 | 10 à 120 | 35 | 35,5 | 7 | 3,5 | 20 à 200 | | | |
| 10 | 10,5 | 2 | 1 | 10 à 160 | 38 | 38,5 | 7,5 | — | 20 à 200 | | | |
| (11) | 11,5 | 2 | 1 | 10 à 160 | 40 | 40,5 | 7,5 | 4,0 | 20 à 200 | | | |

gamme des longueurs L₁ : 4-5-6-8-10-12-14-16-18-20-22-24-26-30-32-35-40-45
50-55-60-65-70-75-80-85-90-95-100-120-140-160-180-200

gamme L₂ : 6-8-10-12-14-16-18-20-22-24-26-28-30-32-35-40-45-50-55-60-70-75-80-85-90-95-100-120

* g = Ø nominal ; d = Ø avant montage ; L₁ commune aux 2 séries ; 1-1,5-32-38 série épaisse uniquement.

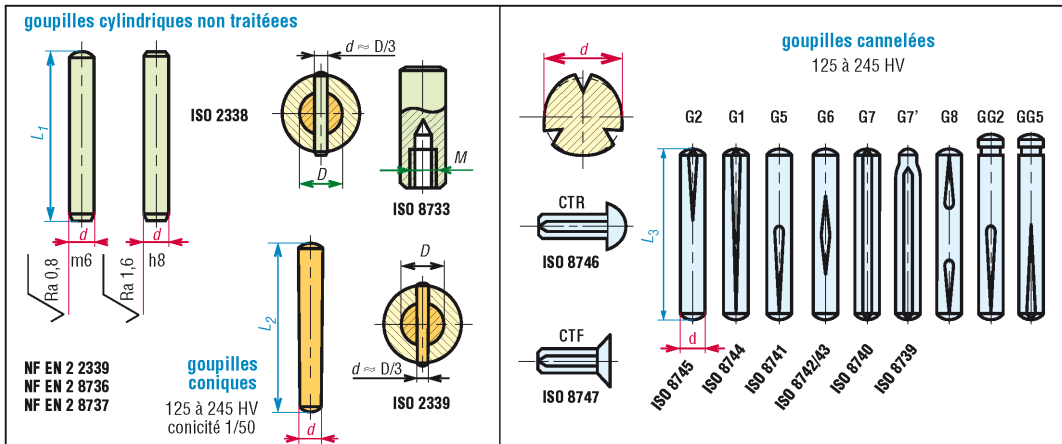
| Goupilles de positionnement cylindrique traitées (fig.28) et non traitées (fig.29) | | | | | | |
|--|---------|--------------|----------|-----------------------------|---------------------------------|------------------|
| norme NF EN... | traitée | trou taraudé | d (mm) | qualité – Ra (µm) | acier au carbone St | acier inoxydable |
| ISO 8734 | oui | non | 3 à 100 | type A rectifiée – Ra = 0,8 | A-trempé 550-650 HV30 | C1 martensitique |
| ISO 8735 | oui | oui | 6 à 50 | type B tournée – Ra = 3,2 | B-cémenté 600-700 HV30 | 460-560 HV30 |
| ISO 8733 | non | oui | 6 à 50 | Ra = 0,8 | acier doux St 125 à 245 HV30 | A1 austénitique |
| ISO 2338 | non | non | 0,6 à 50 | m6 Ra ≤ 0,8 ; h8 Ra ≤ 1,6 | | 210-280 HV30 |

3. Goupilles coniques d'arrêt

La forme conique simplifie le maintien de la goupille dans son logement (« coincement »). Les trous coniques sont obtenus en finition par un alésoir. Deux qualités : type A (rectifiées, R_a 0,8) ; type B (tournées, R_a 3,2). **Désignation : goupille conique ISO 2339-A-6-50-St.** Existents avec trou taraudé (ISO 8736) ou avec tige filetée (ISO 8737).

4. Goupilles cannelées NF EN ISO 8739...

Elles permettent des goupillages économiques. Il existe de nombreuses variantes : G1, G2... Le plus souvent, trois cannelures, suivant trois génératrices à 120°, débordent du diamètre nominal (d) et assurent par déformation élastique et coincement le maintien en position de la goupille dans son logement. **Désignation : goupille cannelée ISO 8745-6-50-St.** Le diamètre de perçage est égal au diamètre nominal (tolérance H11 ; $\sigma_{cisaillement} \approx 450$ MPa).



29. Dimensions des goupilles cylindriques, coniques (d petit diamètre) et cannelées.

| Extraits de dimensions normalisées | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|----|----|----------|---|---------|----|----|----------|--|--|--|----|--|--|
| goupilles cylindriques (ISO 2338) | | | | | goupilles coniques (ISO 2339) | | | | | goupilles cannelées (ISO 87...) | | | | | |
| d | L_1 | d | M | L_1 | d | L_2 | d | M | L_2 | d | L_3 (G ₇ , G ₁ , G ₇) | L_3 (G ₂ , G ₅ , G ₆) | d | L_3 (G ₇ , G ₁ , G ₇) | L_3 (G ₂ , G ₅ , G ₆) |
| 0,6 | 2 à 6 | 6 | 4 | 12 à 60 | 0,6 | 4 à 8 | 6 | 4 | 22 à 90 | 1,5 | 8 à 20 | 8 à 20 | 8 | 14 à 100 | 14(26) à 100 |
| 0,8 | 2 à 8 | 8 | 5 | 14 à 80 | 0,8 | 5 à 12 | 8 | 5 | 22 à 120 | 2 | 8 à 30 | 12 à 30 | 10 | 14 à 100 | 18(32) à 160 |
| 1 | 4 à 10 | 10 | 6 | 18 à 95 | 1 | 6 à 16 | 10 | 6 | 26 à 160 | 2,5 | 10 à 30 | 12 à 30 | 12 | 18 à 100 | 26(40) à 200 |
| 1,2 | 4 à 12 | 12 | 6 | 22 à 140 | 1,2 | 6 à 20 | 12 | 8 | 32 à 180 | 3 | 10 à 40 | 12 à 40 | 16 | 24 à 100 | 26(45) à 200 |
| 1,5 | 4 à 16 | 16 | 8 | 26 à 180 | 1,5 | 8 à 24 | 16 | 10 | 40 à 200 | 4 | 10 à 60 | 18 à 60 | 20 | 26 à 100 | 26(45) à 200 |
| 2 | 6 à 20 | 20 | 10 | 35 à 200 | 2 | 10 à 35 | 20 | 12 | 45 à 200 | 5 | 14 à 60 | 18 à 60 | 25 | 26 à 100 | 26(45) à 200 |
| 2,5 | 6 à 24 | 25 | 16 | 50 à 200 | 2,5 | 10 à 35 | 25 | 16 | 50 à 200 | 6 | 14 à 80 | 22 à 80 | | | |
| 3 | 8 à 30 | 30 | 20 | 60 à 200 | 3 | 12 à 45 | 30 | 20 | 55 à 200 | | | | | | |
| 4 | 8 à 40 | 40 | 20 | 80 à 200 | 4 | 14 à 55 | 40 | 20 | 60 à 200 | | | | | | () G6 |
| 5 | 10 à 50 | 50 | 24 | 95 à 200 | 5 | 18 à 60 | 50 | 24 | 65 à 200 | | | | | | |
| L_1 : 2-3-4-5-6-8-10-12-14-16-18-20 22-24-26-28-30-32-35-40-45-50-55 60-65-70-80-85-90-95-100-110-120 140-160-180-200 | | | | | L_2 : 2-3-4-5-6-8-10-12-14-16-18-20 22-24-26-28-30-32-35-40-45-50-55 60-65-70-75-80-85-90-95-100-120 140-160-180-200 | | | | | L_3 : 8-10-12-14-16-18-20-22-24-26-28-30-32-35 40-45-50-55-60-65-70-75-80-85-90-95-100-120 140-160-180-200 | | | | | |

5. Goupilles fendues cylindriques V - NF EN ISO 1234

Ces goupilles d'arrêt ne doivent pas travailler au cisaillement. Dessin figure 30.

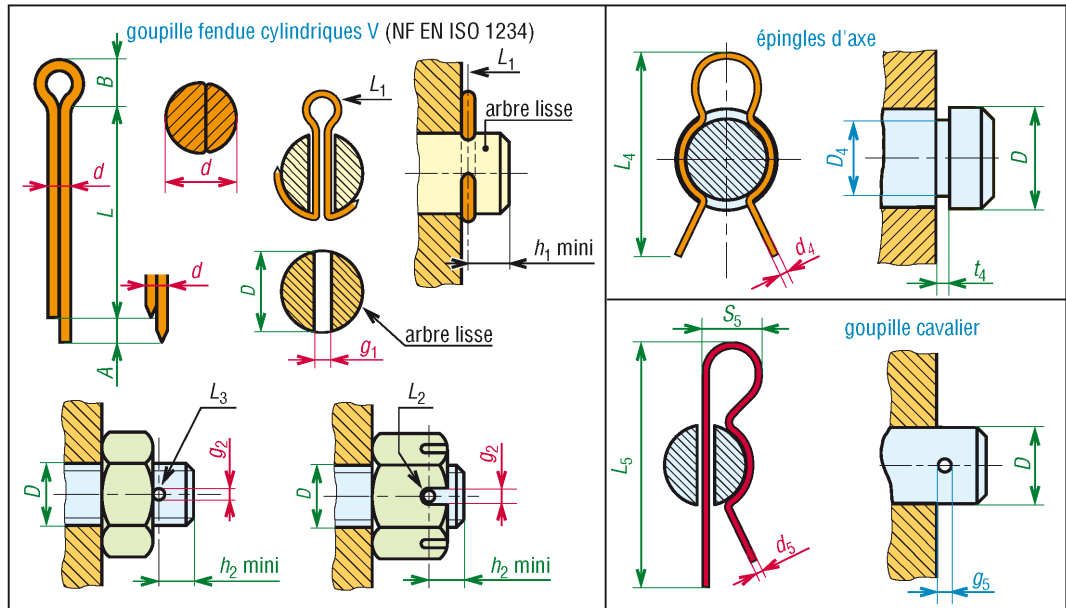
Utilisation : arrêts d'axes lisses ; écrous HK à crêneaux ; tige filetée derrière des écrous ordinaires...

6. Épingles d'axe

Elles sont logées dans une gorge comme un circlips et ne doivent pas travailler au cisaillement. La déformation élastique assure le maintien en position.

7. Goupilles cavaliers

Variante du cas précédent, leur mise en place exige un trou de perçage à la place d'une gorge.



30. Dimensions des goupilles en V, épingles et cavaliers.

| Extraits de dimensions normalisées | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------|-----|-----|-----------|----------------|-------|-------|------|-------|---------------------|-------|---------|-------|-------|
| goupilles fendues V | | | | | épingles d'axe | | | | | goupilles cavaliers | | | | |
| g_1 | d | B | A | L^* | d_4 | D_4 | t_4 | D | L_4 | d_5 | g_5 | D | L_5 | S_5 |
| 0,6 | 0,5 | 2 | 1,6 | 4 à 12 | | | mini | 6% | | | mini | mini | | |
| 0,8 | 0,7 | 2,4 | 1,6 | 5 à 16 | 0,5 | 1,5 | 0,6 | 2,5 | 9,5 | 0,9 | 1,1 | 4 à 6 | 22 | 6 |
| 1 | 0,9 | 3 | 1,6 | 6 à 20 | 0,5 | 2 | 0,6 | 3 | 9,5 | 1,2 | 1,4 | 5 à 8 | 31 | 10 |
| 1,2 | 1 | 3 | 2,5 | 8 à 25 | 0,6 | 2,8 | 0,7 | 4 | 10 | 1,5 | 1,7 | 6 à 10 | 37 | 11 |
| 1,6 | 1,4 | 3,2 | 2,5 | 8 à 32 | 0,7 | 2,6 | 0,8 | 4 | 10 | 1,8 | 2 | 7 à 12 | 46 | 12 |
| 2 | 1,8 | 4 | 2,5 | 10 à 40 | 0,7 | 2,6 | 0,8 | 4 | 15 | 2 | 2,2 | 9 à 14 | 53 | 15 |
| 2,5 | 2,3 | 5 | 2,5 | 12 à 50 | 0,7 | 3,6 | 0,8 | 5 | 13 | 2,4 | 2,6 | 10 à 16 | 60 | 17 |
| 3 | 2,9 | 6,4 | 3,2 | 14 à 63 | 0,8 | 3,4 | 0,9 | 5 | 13 | 2,7 | 3 | 11 à 18 | 70 | 20 |
| 4 | 3,7 | 8 | 4 | 18 à 80 | 1 | 4 | 1,1 | 6 | 16 | 3 | 3,4 | 12 à 20 | 76 | 22 |
| 5 | 4,6 | 10 | 4 | 22 à 100 | 1 | 5 | 1,1 | 7 | 19 | 3,5 | 4 | 13 à 22 | 84 | 24 |
| 6 | 5,9 | 13 | 4 | 32 à 125 | 1,2 | 5,6 | 1,3 | 8 | 21 | 4 | 4,5 | 15 à 25 | 96 | 28 |
| 8 | 7,5 | 16 | 4 | 40 à 160 | 1,5 | 7 | 1,7 | 10 | 27 | 4,5 | 5 | 18 à 30 | 115 | 38 |
| 10 | 9,5 | 20 | 6,3 | 45 à 200 | 1,5 | 9 | 1,7 | 12 | 30 | | | | | |
| 13 | 12,4 | 26 | 6,3 | 71 à 250 | 1,5 | 11 | 1,7 | 14 | 32 | | | | | |
| 16 | 15,4 | 32 | 6,3 | 112 à 280 | 1,5 | 12,5 | 1,7 | 15,5 | 34 | | | | | |
| 20 | 19,3 | 40 | 6,3 | 160 à 280 | 2 | 14,5 | 2,2 | 18,5 | 48 | | | | | |

* gamme des longueurs L : 4-5-6-8-10-12-14-16-18-20-22-25-28-32-36-40-45-50-56-63-71-80-90-100-112-125-140-160-180-200-224-250-280

| Goupilles fendues V : dimensions des principaux goupillages NF E 27- 488 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| D | g_2 | h_2 | L_2 | L_3 | g_1 | h_1 | L_1 | D | g_2 | h_2 | L_2 | L_3 | g_1 | h_1 | L_1 |
| 1,6 | 0,6 | 1,2 | 5 | 4 | - | - | - | 24 | 5 | 6,8 | 50 | 40 | 6,3 | 9 | 45 |
| 2 | 0,6 | 1,2 | 6 | 4 | - | - | - | 27 | 5 | 6,8 | 56 | 40 | 6,3 | 9 | 45 |
| 2,5 | 0,6 | 1,2 | 8 | 4 | - | - | - | 30 | 6,3 | 8,7 | 63 | 50 | 8 | 10 | 56 |
| 3 | 0,8 | 1,5 | 8 | 5 | 0,8 | 1,6 | 5 | 33 | 6,3 | 8,7 | 71 | 50 | 8 | 10 | 56 |
| 4 | 1 | 1,8 | 10 | 8 | 1 | 2,2 | 8 | 36 | 6,3 | 8,7 | 71 | 56 | 8 | 10 | 63 |
| 5 | 1,2 | 2 | 12 | 8 | 1,2 | 2,9 | 8 | 39 | 6,3 | 8,7 | 80 | 56 | | | |
| 6 | 1,6 | 2,5 | 14 | 10 | 1,6 | 3,2 | 10 | 40 | | | | 8 | 10 | 63 | 63 |
| 8 | 2 | 3,2 | 18 | 14 | 2 | 3,5 | 14 | 42 | 8 | 11,4 | 90 | 63 | | | |
| 10 | 2,5 | 3,8 | 25 | 18 | 3,2 | 4,5 | 18 | 45 | 8 | 11,4 | 90 | 71 | 10 | 12 | 80 |
| 12 | 3,2 | 4,5 | 28 | 22 | 3,2 | 5,5 | 22 | 48 | 8 | 11,4 | 100 | 71 | | | |
| 14 | 3,2 | 4,5 | 32 | 25 | 4 | 6 | 25 | 50 | | | | | 10 | 12 | 80 |
| 16 | 4 | 5,3 | 36 | 28 | 4 | 6 | 28 | 52 | 8 | 12,2 | 100 | 80 | | | |
| 18 | 4 | 5,3 | 40 | 28 | 5 | 7 | 32 | 55 | | | | | 10 | 14 | 80 |
| 20 | 4 | 5,3 | 40 | 32 | 5 | 8 | 36 | 56 | 8 | 12,5 | 112 | 80 | | | |
| 22 | 5 | 6,8 | 45 | 36 | 5 | 8 | 36 | 60 | 10 | 14,8 | 90 | 90 | 10 | 14 | 90 |

IV – Circlips et anneaux élastiques

Ils permettent la fixation axiale ou l'épaulement d'éléments de machines (roulements, bagues, entretoises...) sur des arbres ou dans des alésages.

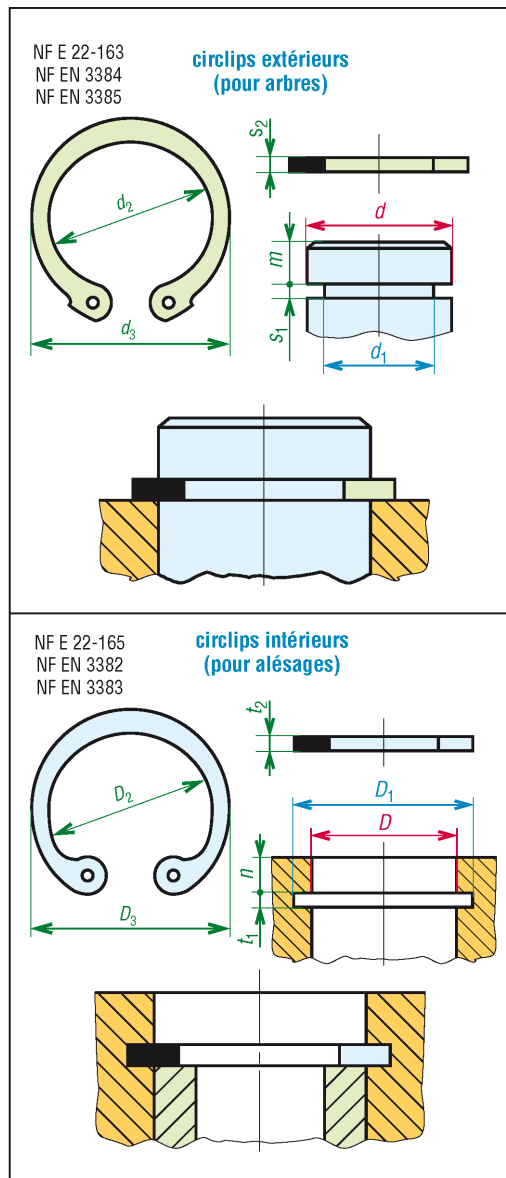
Ils ont la forme d'anneaux fendus dont l'élasticité permet le montage et le maintien en position après assemblage. Matériaux : acier phosphaté (C 75...), acier cadmié...

Avantages : faible coût ; économie de matière ; usinages standards ; faible encombrement axial.

1. Circlips extérieurs et intérieurs

Très utilisés, de diamètres de 3 à 1 000 mm, ils peuvent supporter des efforts axiaux assez importants et sont bien adaptés aux grandes vitesses de rotation. Leur montage exige une pince spéciale à becs avec ergots.

Normes : NF E 22-163, NF E 22-165.
Recommandation : avec les roulements ou toute pièce chanfreinée et si les efforts axiaux sont importants, il est recommandé d'interposer une rondelle d'appui (fig. 32).



31. Dimensions des circlips extérieurs et intérieurs.

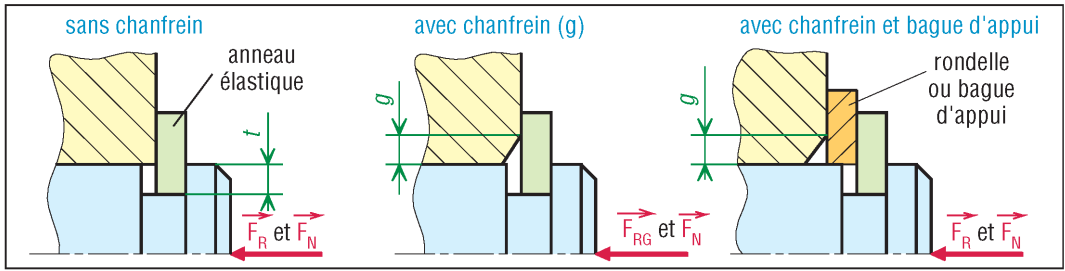
| Circlips extérieurs : principales dimensions normalisées | | | | | | | | | | | |
|--|------------|---------|--------------|--------------|-------------|-----|--------------|---------|--------------|--------------|-------------|
| d | d_1^{**} | d_4^* | s_1 H13 | s_2 h11 | m mini | d | d_1 h12 | d_4^* | s_1 H13 | s_2 h11 | m mini |
| 3 | 2,8 | 7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 25 | 23,9 | 34,2 | 1,3 | 1,2 | 1,7 |
| 4 | 3,8 | 8,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 30 | 28,6 | 40,5 | 1,6 | 1,5 | 2,1 |
| 5 | 4,8 | 10,3 | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 35 | 33 | 46,8 | 1,6 | 1,5 | 3 |
| 6 | 5,7 | 11,7 | 0,8 | 0,7 | 0,5 | 40 | 37,5 | 52,6 | 1,85 | 1,75 | 3,8 |
| 7 | 6,7 | 13,5 | 0,9 | 0,8 | 0,5 | 45 | 42,5 | 59,1 | 1,85 | 1,75 | 3,8 |
| 8 | 7,6 | 14,7 | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 50 | 47 | 64,5 | 2,15 | 2 | 4,5 |
| 10 | 9,6 | 17 | 1,1 | 1 | 0,6 | 55 | 52 | 70,2 | 2,15 | 2 | 4,5 |
| 12 | 11,5 | 19 | 1,1 | 1 | 0,8 | 60 | 57 | 75,6 | 2,15 | 2 | 4,5 |
| 14 | 13,4 | 21,4 | 1,1 | 1 | 0,9 | 65 | 62 | 81,4 | 2,65 | 2,5 | 4,5 |
| 15 | 14,3 | 22,6 | 1,1 | 1 | 1,1 | 70 | 67 | 87 | 2,65 | 2,5 | 4,5 |
| 16 | 15,2 | 23,8 | 1,1 | 1 | 1,2 | 75 | 72 | 92,7 | 2,65 | 2,5 | 4,5 |
| 17 | 16,2 | 25 | 1,1 | 1 | 1,2 | 80 | 76,5 | 98,1 | 2,65 | 2,5 | 5,3 |
| 18 | 17 | 26,2 | 1,3 | 1,2 | 1,5 | 90 | 86,5 | 108,5 | 3,15 | 3 | 5,3 |
| 20 | 19 | 28,4 | 1,3 | 1,2 | 1,5 | 100 | 96,5 | 120,2 | 3,15 | 3 | 5,3 |

d_1^{**} : diamètre d_1 (h11) si $d < 20$ et (h12) si $d \geq 20$
 d_4^* : espace (diamètre) nécessaire pour le montage

| Circlips intérieurs : principales dimensions normalisées | | | | | | | | | | | |
|--|------------|---------|--------------|--------------|-------------|-----|--------------|---------|--------------|--------------|-------------|
| D | D_1^{**} | D_4^* | t_1 H13 | t_2 h11 | n mini | D | D_1 H12 | D_4^* | t_1 H13 | t_2 h11 | n mini |
| 8 | 8,4 | 3 | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 45 | 47,5 | 32 | 1,85 | 1,75 | 3,8 |
| 10 | 10,4 | 3,7 | 1,1 | 1 | 0,6 | 50 | 53 | 36,3 | 2,15 | 2 | 4,5 |
| 12 | 12,5 | 4,9 | 1,1 | 1 | 0,8 | 55 | 58 | 40,7 | 2,15 | 2 | 4,5 |
| 14 | 14,6 | 6,2 | 1,1 | 1 | 0,9 | 60 | 63 | 44,7 | 2,15 | 2 | 4,5 |
| 15 | 15,7 | 7,2 | 1,1 | 1 | 1,1 | 65 | 68 | 49 | 2,65 | 2,5 | 4,5 |
| 16 | 16,8 | 8 | 1,1 | 1 | 1,2 | 70 | 73 | 53,6 | 2,65 | 2,5 | 4,5 |
| 17 | 17,8 | 8,8 | 1,1 | 1 | 1,2 | 75 | 78 | 58,6 | 2,65 | 2,5 | 4,5 |
| 18 | 19 | 9,4 | 1,1 | 1 | 1,5 | 80 | 83,5 | 62,1 | 2,65 | 2,5 | 5,3 |
| 20 | 21 | 11,2 | 1,1 | 1 | 1,5 | 85 | 88,5 | 66,9 | 3,15 | 3 | 5,3 |
| 25 | 26,2 | 15,5 | 1,3 | 1,2 | 1,8 | 90 | 93,5 | 71,9 | 3,15 | 3 | 5,3 |
| 30 | 31,4 | 19,9 | 1,3 | 1,2 | 2,1 | 95 | 98,5 | 76,5 | 3,15 | 3 | 5,3 |
| 35 | 37 | 23,6 | 1,6 | 1,5 | 3 | 100 | 103,5 | 80,6 | 3,15 | 3 | 5,3 |
| 40 | 42,5 | 27,8 | 1,85 | 1,75 | 3,8 | 110 | 114 | 88,2 | 4,15 | 4 | 6 |

D_1^{**} : diamètre D_1 (H11) si $D < 20$ et (H12) si $D \geq 20$
 D_4^* : espace (diamètre) nécessaire pour le montage

Voir forces axiales admissibles page 216.

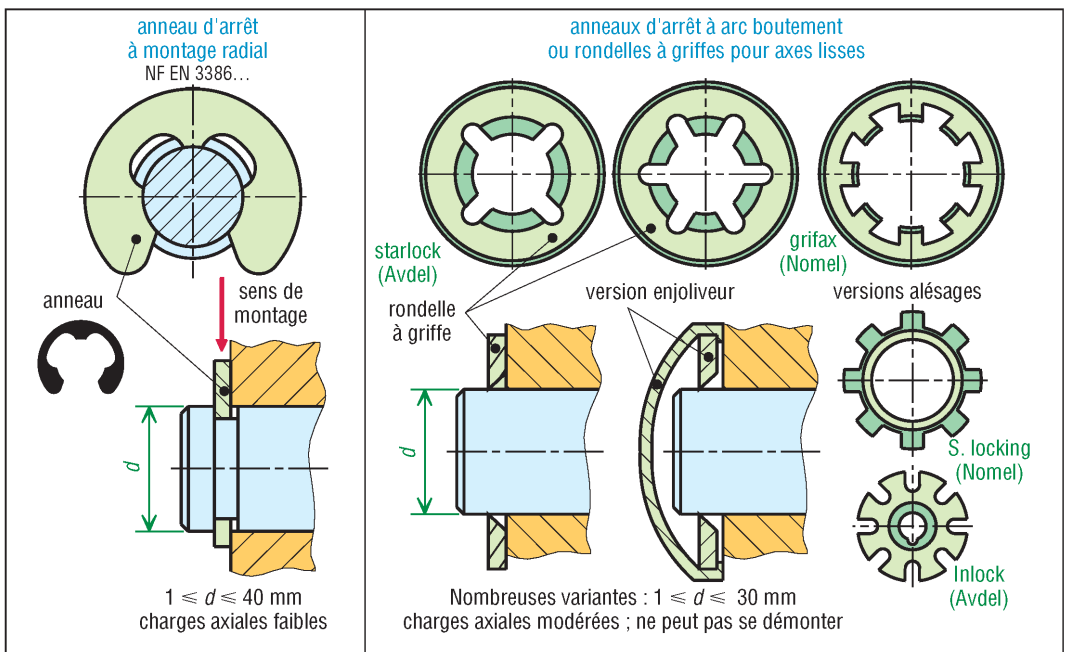


32. Forces axiales admissibles par les anneaux élastiques.

| Anneaux élastiques pour arbres : forces axiales supportées NF E 22-163 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|---------|-----------|---------|----------|----------|---------|-----------|---------|----------|----------|---------|-----------|--|
| d mm | FN kN | FR kN | g mm | FRG kN | d mm | FN kN | FR kN | g mm | FRG kN | d mm | FN kN | FR kN | g mm | FRG kN | |
| 3 | 0,15 | 0,47 | 0,5 | 0,27 | 15 | 2,66 | 6,90 | 1 | 2,40 | 50 | 38 | 73,3 | 2 | 14,4 | |
| 4 | 0,20 | 0,50 | 0,5 | 0,30 | 17 | 3,46 | 8 | 1 | 2,40 | 55 | 42 | 71,4 | 2,5 | 11,4 | |
| 5 | 0,26 | 1 | 0,5 | 0,80 | 20 | 5,06 | 17,1 | 1,5 | 3,85 | 60 | 46 | 69,23 | 2,5 | 11,3 | |
| 6 | 0,46 | 1,45 | 0,5 | 0,90 | 25 | 7,05 | 16,2 | 1,5 | 3,70 | 65 | 49,8 | 135,6 | 2,5 | 22,7 | |
| 7 | 0,54 | 2,60 | 0,5 | 1,40 | 30 | 10,73 | 32,1 | 1,5 | 7,65 | 70 | 53,8 | 134,2 | 2,5 | 23 | |
| 8 | 0,81 | 3 | 0,5 | 2 | 35 | 17,80 | 30,8 | 2 | 5,55 | 75 | 57,6 | 130 | 2,5 | 22,8 | |
| 10 | 1,01 | 4 | 1 | 2,40 | 40 | 45,30 | 51 | 2 | 9,50 | 80 | 71,6 | 128,4 | 3 | 19,5 | |
| 12 | 1,53 | 5 | 1 | 2,40 | 45 | 28,60 | 49 | 2 | 9,35 | 90 | 80,8 | 217,2 | 3 | 34,4 | |

FN : fore axiale admissible entre arbre et anneau, dépend de (t) et du matériau de l'arbre.
 FR : force axiale admissible par l'anneau sans chanfrein (g) sur la pièce en appui.
 FRG : force axiale admissible par l'anneau avec chanfrein (g) sur la pièce en appui.

| Anneaux élastiques pour alésages : forces axiales supportées NF E 22-165 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|---------|-----------|---------|----------|----------|---------|-----------|---------|----------|----------|---------|-----------|--|
| d mm | FN kN | FR kN | g mm | FRG kN | d mm | FN kN | FR kN | g mm | FRG kN | d mm | FN kN | FR kN | g mm | FRG kN | |
| 8 | 0,86 | 2,00 | 0,5 | 1,50 | 30 | 11,3 | 13,7 | 1 | 4,60 | 70 | 56,2 | 119 | 2,5 | 21,0 | |
| 9 | 0,96 | 2,00 | 0,5 | 1,50 | 35 | 18,8 | 26,9 | 1,5 | 6,40 | 75 | 60,0 | 118 | 2,5 | 21,0 | |
| 10 | 1,08 | 4,00 | 0,5 | 2,20 | 40 | 27,0 | 44,6 | 1,5 | 8,30 | 80 | 74,6 | 120,9 | 2,5 | 21,8 | |
| 12 | 1,60 | 4,00 | 0,5 | 2,30 | 45 | 30,2 | 43,1 | 1,5 | 8,20 | 85 | 79,5 | 201,4 | 2,5 | 31,2 | |
| 15 | 2,80 | 5,00 | 0,5 | 2,30 | 50 | 40,5 | 60,8 | 2 | 12,1 | 90 | 84,0 | 199 | 2,5 | 31,4 | |
| 17 | 3,60 | 6,00 | 1 | 2,50 | 55 | 44,4 | 60,3 | 2 | 12,5 | 95 | 88,6 | 195 | 3 | 31,4 | |
| 20 | 5,40 | 7,20 | 1 | 2,50 | 60 | 48,3 | 61,0 | 2 | 13,0 | 100 | 93,1 | 188 | 3 | 30,8 | |
| 25 | 8,00 | 14,6 | 1 | 4,70 | 65 | 51,8 | 121 | 2,5 | 20,8 | 110 | 117 | 415 | 3 | 71,0 | |



33. Autres anneaux d'arrêt pour axes et alésages : à montage radial (NF EN 3386...); anneaux à griffes...

V - Rivetage

Les rivets sont utilisés par toutes les industries pour l'assemblage indémontable de petits ou de grands composants. L'assemblage d'une structure d'avion exige près de 2 500 000 rivets, dont la pose représente 30 % du temps total de montage.

Avantages : sécurité de fixation ; économique ; cadences de production élevées ; assemblage de matières différentes et d'épaisseurs différentes ; assemblages résistants au phénomène de fatigue contrairement au soudage. Nombreuses variantes : usuelles, aérospatiale...

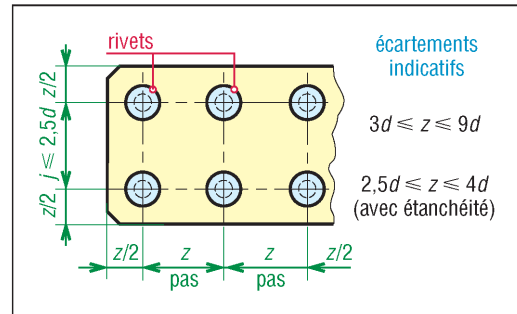
Inconvénients : non démontable ; têtes protubérantes.

1. Rivets usuels

Leur pose exige que l'on puisse intervenir des deux côtés de l'assemblage : côté tête et côté rivure.

Les têtes peuvent être rondes (symbole R), cylindriques plates (C et CF) ou fraisées (90°, 60° ou 120°) si l'on veut noyer les têtes (F/90, FB/90...) ; la tige peut être forée.

Exemple de désignation : F/90 10.40, NF E 27-154 (rivet à tête fraisée $d = 10$, $L = 40$ mm et norme de référence).



34. Écartements indicatifs des rivets.

pose à chaud : $d_v \approx 1,1d$
pose à froid : $d_v \approx 1,05d$

tête goutte de suif G si tige forée Gf
NFE 27-152

tête cylindrique C à tige forée Cf
NFE 27-151 ($d \leq 10$)

tête ronde R
NFE 27-153 ($d \leq 10$)
NFE 25-726 ($d \geq 10$)



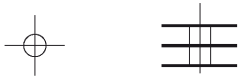

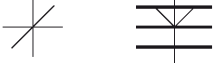


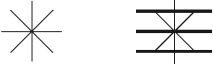

tête cylindrique plate C
NFE 27-151
 $0,8 \leq d \leq 10$

tête fraisée F/90 avec tige forée F/90f
NFE 27-154

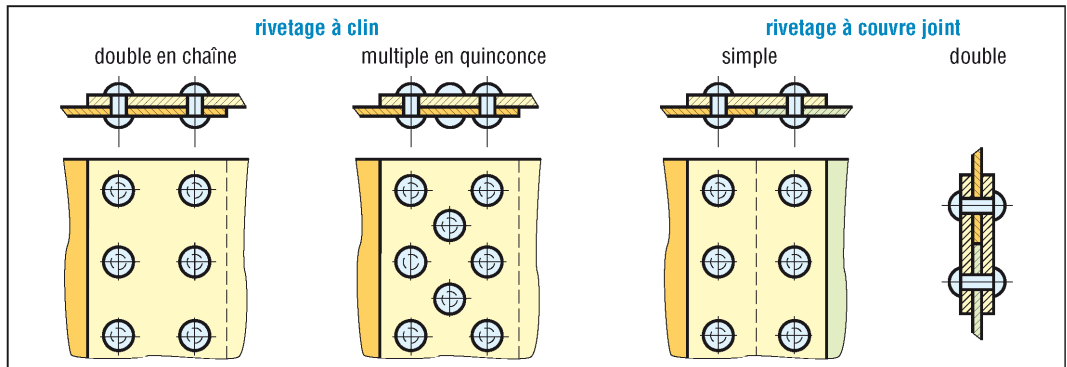
tête fraisée bombée FB/90 à tige forée FB/90f
NFE 27-154

| Principales dimensions normalisées des rivets usuels | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|----|-----|-------------------------------------|-----|----|-----|----|------|--|--|--|--|--|
| d | 0,8 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 27 | | | | | |
| D_1 | 1,5 | 1,8 | 2,7 | 3,5 | 4,5 | 5,5 | 6,5 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 14 | 16 | 17 | 19 | 21 | 24 | 28 | 31 | 34 | 38 | 41 | 46 | | | | | |
| h_1 | 0,6 | 0,7 | 1,1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 7 | 8 | 8 | 10 | 11 | 12 | 14 | 16 | 17 | 19 | | | | | |
| D_2 | 1,6 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 | 54 | | | | | |
| h_2 | 0,4 | 0,5 | 0,8 | 1 | 1,3 | 1,5 | 1,8 | 2 | 2,3 | 2,5 | 2,8 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13,5 | | | | | |
| R | 1,2 | 1,5 | 2,3 | 3 | 3,8 | 4,5 | 5,3 | 6 | 6,8 | 7,5 | 8,3 | 9 | 10,5 | 12 | 13,5 | 15 | 16,5 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 36 | 41 | | | | | |
| k | | | | | | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,1 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,8 | 2 | 2,3 | 2,5 | 2,8 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 6,8 | | | | | |
| g | | | | | | 1,8 | 2,1 | 2,4 | - | 3 | - | 3,6 | - | 4,8 | - | 6 | | | | | | | | | | | | | | |
| L : 3 - 4 - 5 - 6 - 7* - 8 - 9* - 10 - 11* - 12 - 14 - 16 - (18) - 20 - (22) - 25 - (28) - 30 - 32 - 35 - 38 40 - 45 - 50 - 55 - 60 - 65 - 70 - 75 - 80 - 85 - 90 - 100 - 110 - 120 - 130 [* F/90 uniquement] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | NFE 27-155 Tolérances des rivets | | | | | | | | | | |

35. Dimensions des rivets usuels ($d_{maxi} = d - 0$; $d_{mini} = d - (0,1 \text{ à } 1,4 \text{ mm})$).

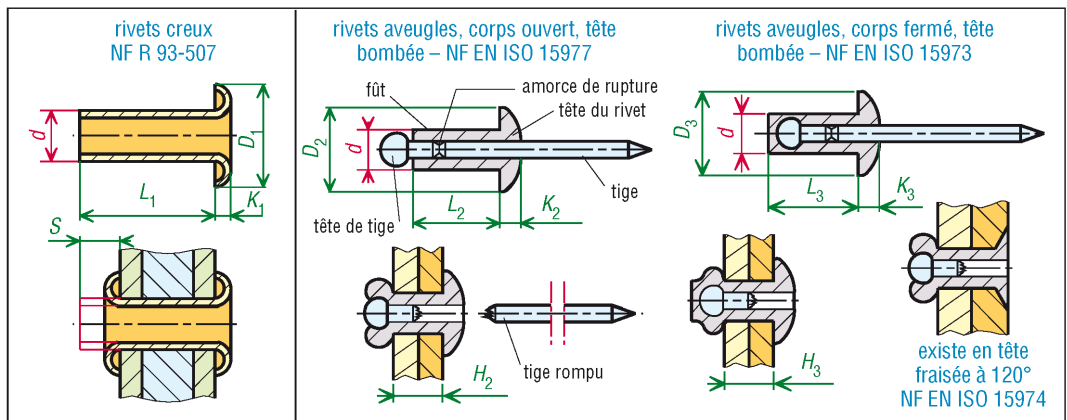
| Représentation symbolique des rivets - NF E 04-014 | | |
|---|---|--|
| rivets | rivets posés à l'atelier | rivets posés au chantier |
|  tête et rivures rondes |  |  |
|  tête ou rivure ronde |  |  |
|  tête et rivures fraisées |  |  |

36. Représentation symbolique des rivets. Voir aussi page 581 : NF ISO 5845-1.



37. Dispositions usuelles des rivets.

2. Rivets creux et rivets aveugles



38. Dimensions des rivets creux et des rivets aveugles ou POP (corps aluminium AIA ; tige acier St).

| Principales dimensions des rivets creux et des rivets aveugles (rivet alu/tige acier) | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|---------------------|----------------|---------------------|--|---------------------------------------|------------|----------------|----------------|---------------------|---|-----------|
| rivets creux (NF R 93-507) | | | | | | rivets à expansion ou rivets aveugles | | | | | | |
| d rivet | d* perçage | D ₁ | K ₁ | S | L ₁ ** | d rivet | d* perçage | D ₂ | K ₂ | H ₂ mini | L ₂ (H ₂ maxi) | ISO 15977 |
| 1,2 | 1,3 | 2 | 0,3 | 1 | 2 à 20 | 2,4 | 2,5 | 5 | 1 | 0,5 | 4(2) - 6(4) - 8(6) - 10(8) - 12(9,5) | |
| 1,5 | 1,6 | 2,5 | 0,3 | 1,2 | 3 à 20 | 3 | 3,1 | 6,3 | 1,3 | 0,5 | 4(1,5) - 6(3,5) - 8(5) - 10(7) - 12(9) - 16(13) | |
| 2 | 2,2 | 3,5 | 0,4 | 1,2 | 3 à 20 | 3,2 | 3,3 | 6,7 | 1,3 | 0,5 | 4(1,5) - 6(3,5) - 8(5) - 10(7) - 12(9) - 16(13) | |
| 2,5 | 2,7 | 4 | 0,4 | 1,4 | 4 à 32 | 4 | 4,1 | 8,4 | 1,7 | 1,0 | 6(3) - 8(5) - 10(6,5) - 12(8,5) - 16(12,5) | |
| 3 | 3,2 | 4,5 | 0,5 | 1,4 | 4 à 32 | 4,8 | 4,9 | 10,1 | 2 | 1,5 | 6(2,5) - 8(4) - 10(6) - 12(8) - 16(12) - 20(15) | |
| 3,5 | 3,7 | 5 | 0,5 | 2,2 | 4 à 32 | 5 | 5,1 | 10,5 | 2,1 | 1,5 | 6(2,5) - 8(4) - 10(6) - 12(8) - 16(12) - 20(15) | |
| 4 | 4,3 | 6,5 | 0,8 | 2,2 | 4 à 40 | 6 | 6,1 | 12,6 | 2,5 | 2 | 8(3) - 10(5) - 12(7) - 16(11) - 20(15) - 25(20) | |
| 5 | 5,3 | 8 | 0,8 | 3 | 5 à 40 | | | | | | | |
| 6 | 6,4 | 10 | 1,5 | 4 | 6 à 50 | | | | | | | |
| 8 | 8,4 | 13 | 2 | 5 | 8 à 50 | | | | | | | |
| 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | à 50 | | | | | | | |
| 12 | 18 | 2,3 | 6,5 | 12 | à 50 | | | | | | | |
| 14 | 21 | 2,3 | 6,5 | 12 | à 50 | | | | | | | |
| 16 | 22 | 2,3 | 6,5 | 12 | à 50 | | | | | | | |
| d rivet | d* perçage | D ₃ mini | K ₃ | H ₃ mini | L ₃ (H ₃ maxi) | ISO 15973 | | | | | | |
| 3,2 | 3,3 | 5,8 | 1,3 | 0,5 | 6,5(2) - 8(3,5) - 9,5(5) - 11(6,5) - 12,5(8) | | | | | | | |
| 4 | 4,1 | 6,9 | 1,7 | 0,5 | 8(3,5) - 9,5(5) - 11(6,5) - 12,5(8) - 14,5(10) | | | | | | | |
| 4,8 | 4,9 | 8,3 | 2 | 0,5 | 8,5(3,5) - 9,5(5) - 11(6,5) - 13(8) - 14,5(9,5) - 16(11) | | | | | | | |
| 6,4 | 6,5 | 11,6 | 2,7 | 1,5 | 12,5(6,5) - 13 - 14,5 - 15,5(9,5) - 16 - 18 | | | | | | | |

longueurs L₁** usuelles : 2 - 2,5 - 3 - 3,5 - 4 - 5 - 6 - 8 - 10 - 12 - 14 - 16 - 18 - 20 - 22 - 25 - 28 - 32 - 40 - 45 - 50
d* : diamètre de perçage des pièces à riveter

Les rivets creux, en acier (C22, inox) ou en non ferreux (2017A, 5356, cuZn36), sont légers et faciles à sertir. Dimensions page 218. Utilisations : aéronautique, électromécanique...

Les rivets aveugles sont les seuls utilisables lorsque l'une des pièces est creuse (réservoir, profilé creux...) ou si les pièces à riveter ne sont accessibles que d'un seul côté. La rivure s'obtient en tirant sur la tige en prenant appui sur la tête ; en fin de rivetage la tige casse net.

Désignation : rivet aveugle ISO 15973 - 4 x 12,5 - Al/A/St (rivet Aluminium ; $d = 4$; $L_3 = 12,5$; tige acier St).

| Rivets aveugles à corps ouverts et à corps fermés (variante étanche) – fig. 38 extraits dimensions pages 218 | | | | | | | | | | | |
|--|--------|---------|---------------|--------------|------|----------------|--------|---------|-------------------|--------------|-----------|
| norme NF EN... | corps | tête | d (mm) | matériaux ** | | norme NF EN... | corps | tête | d (mm) | matériaux ** | |
| | | | | corps | tige | | | | | corps | tige |
| ISO 15973 | fermé | bombée | 3,2-4-4,8-6,4 | Al/A | St | ISO 15981 | ouvert | bombée | 2,4-3,2-4-4,8-6,4 | Al/A | Al/A |
| ISO 15974 | fermé | fraisée | 3,2-4-4,8 | Al/A | St | ISO 15982 | ouvert | fraisée | 2,4-3,2-4-4,8-6,4 | Al/A | Al/A |
| ISO 15975 | fermé | bombée | 3,2-4-4,8 | Al/A | Al | ISO 15983 | ouvert | bombée | 3-3,2-4-4,8-5 | Inox A2 | Inox A2 |
| ISO 15976 | fermé | bombée | 3,2-4-4,8-6,4 | St | St | ISO 15984 | ouvert | fraisée | 3-3,2-4-4,8-5 | Inox A2 | Inox A2 |
| ISO 15977 | ouvert | bombée | 2,4 à 6,4 * | Al/A | St | ISO 16582 | ouvert | bombée | 3-3,2-4-4,8 | Cu | St-Br-SSt |
| ISO 15978 | ouvert | fraisée | 2,4 à 5 * | Al/A | St | ISO 16583 | ouvert | fraisée | 3-3,2-4-4,8 | Cu | St-Br-SSt |
| ISO 15979 | ouvert | bombée | 2,4 à 6,4 * | St | St | ISO 16584 | ouvert | bombée | 3-3,2-4-4,8 | NiCu | Inox SSt |
| ISO 15980 | ouvert | fraisée | 2,4 à 6,4 * | St | St | ISO 16585 | fermé | bombée | 3-3,2-4-4,8 | Inox A2 | Inox SSt |

* Valeurs de d : 2,4-3-3,2-4-4,8-5-6-6,4 ** Matériaux : Al/A aluminiums ; St acier carbone ; A2 acier inox ; Br bronze ; SSt inox

3. Points clinchés (Tox...)

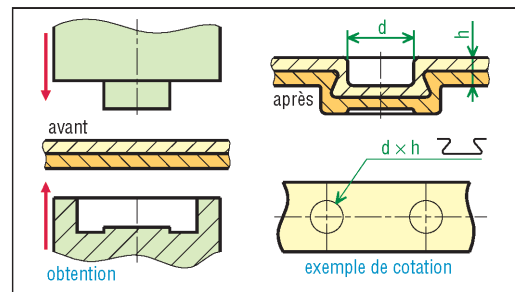
Les points clinchés sont à la frontière entre le sertissage et le rivetage. En grande série ils permettent l'assemblage à froid de tôles sans rivet.

Diamètres usuels des points (en mm) :

3 - 4 - 5 - 6 - 8 - 10...

Matériaux divers (Traités et revêtus) :

aciers, aluminium, cuivreux...



39. Principe des points TOX. Symbolisation page 80.

VI - Supports, butées et articulations élastiques

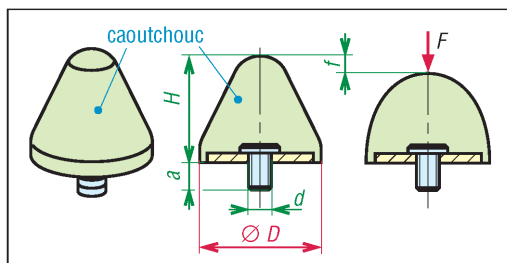
À base d'élastomère, ces organes, mélanges de ressort et d'amortisseur, possèdent à des degrés divers des propriétés d'élasticité et d'amortissement. L'amortissement se traduit par un freinage du mouvement réduisant les amplitudes des oscillations ou des vibrations.

Propriétés générales :

- Ils absorbent et corrigent les défauts d'alignement ou de positionnement, les petites différences d'entraxes et les petits déplacements parasites au cours de fonctionnement.
- Ils assurent une bonne répartition des charges dans la liaison.
- Ils isolent et absorbent en partie les chocs et les phénomènes vibratoires.

Remarques : les supports sont placés de façon à avoir leur plus grande souplesse dans le sens de la vibration la plus importante. Les élastomères travaillent en compression, au cisaillement ou selon les deux.

1. Butée progressive pour chocs (Paulstra...)

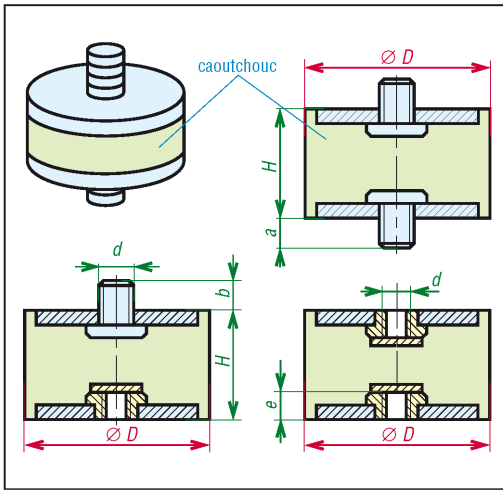


40. Dimensions de butées progressives pour chocs.

| Butée progressive pour chocs ; extraits de dimensions | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|------------------|-----------------|---------------------------|------------------------|
| D (mm) | H (mm) | d (mm) | a (mm) | charge F (daN) | flèche f (mm) | énergie absorbée (joules) | |
| | | | | | | Es normale chocs répétés | Es limite exceptionnel |
| 25,5 | 19 | M8 | 20 | 100 | 8 | 3 | 9 |
| 30 | 30 | M6 | 13,5 | 140 | 15 | 6 | 18 |
| 50 | 50 | M8 | 20 | 340 | 25 | 30 | 90 |
| 50 | 64 | M8 | 35 | 370 | 32 | 40 | 120 |
| 72 | 58 | M12 | 30 | 550 | 26 | 50 | 150 |
| 95 | 80 | M16 | 45 | 1 100 | 37 | 120 | 350 |

2. Supports à élasticité radiale : Paulstra « radiaflex »...

Propriétés : rigidité axiale en compression, et souplesse radiale au cisaillement.

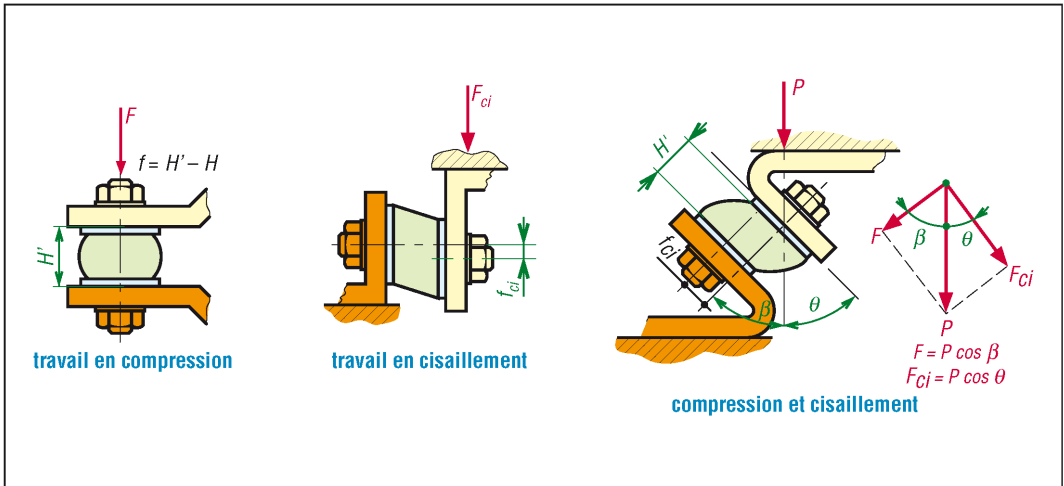


41. Dimensions des supports à élasticité radiale.

Supports à élasticité radiale : extraits de dimensions

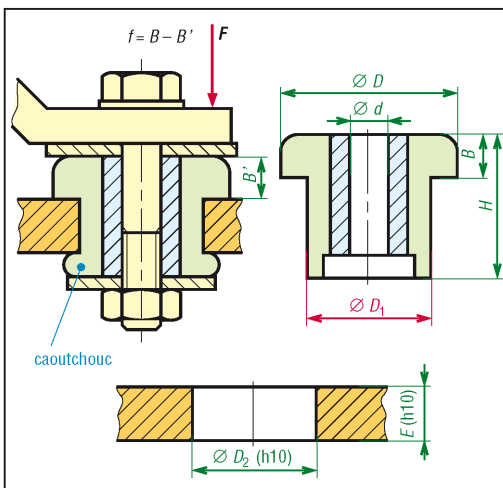
| D (mm) | H (mm) | d (mm) | a (mm) | b (mm) | e (mm) | en compression | | au cisaillement | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|--------|-----------------------|----------------------|
| | | | | | | F (daN) | f (mm) | F _{ci} (daN) | f _{ci} (mm) |
| 12,5 | 15 | M5 | 10 | | | 10 | 3 | 2,5 | 2 |
| 16 | 10 | M5 | 12 | 12 | 3 | 20 | 1,5 | 2,5 | 1,5 |
| 16 | 20 | M5 | 12 | 12 | 3 | 15 | 4 | 2,5 | 4 |
| 20 | 15 | M6 | 16,5 | 16,5 | 4 | 35 | 3 | 5 | 2,5 |
| 20 | 25 | M6 | 16,5 | 16,5 | 4 | 30 | 5,5 | 4,5 | 4,5 |
| 25,5 | 22 | M8 | 20 | 20 | 6 | 50 | 3,5 | 8 | 4 |
| 25,5 | 30 | M8 | 20 | 20 | 6 | 50 | 7,5 | 8 | 6 |
| 30 | 30 | M8 | 25 | 25 | 6 | 70 | 8 | 11 | 6 |
| 40 | 35 | M10 | 25 | 25 | 8 | 120 | 7,5 | 20 | 6,5 |
| 50 | 35 | M10 | 25 | 25 | 8 | 250 | 8 | 25 | 7 |
| 60 | 36 | M10 | 25 | 25 | 8 | 300 | 8 | 30 | 7 |
| 70 | 50 | M10 | 25 | 25 | 9 | 350 | 10 | 35 | 11 |

F = charge f = flèche correspondante



42. Exemples d'utilisation.

3. Plots d'assemblage à élasticité axiale : Paulstra STC



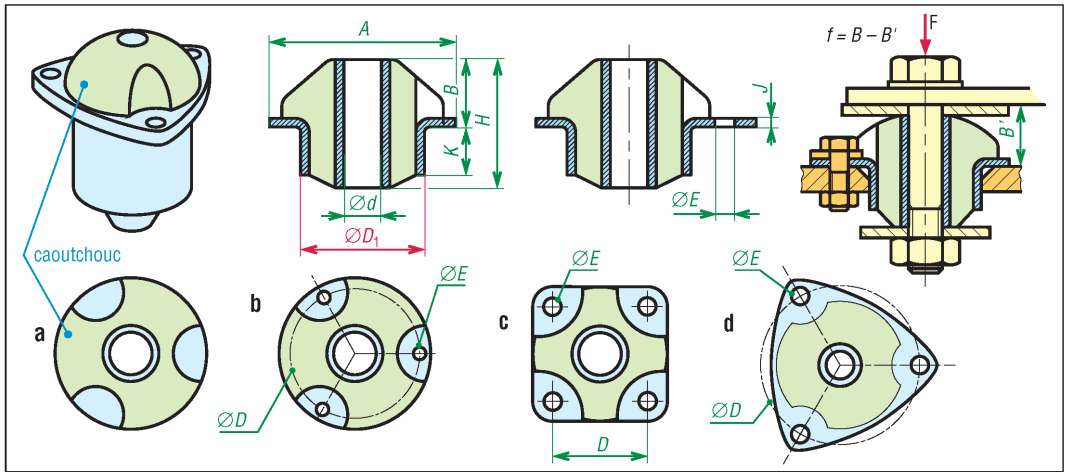
43. Dimensions des plots d'assemblage.

Plots d'assemblage ; extraits de dimensions

| D ₁ (mm) | H (mm) | d (mm) | D (mm) | B (mm) | D ₂ (mm) | E (mm) | F (daN) dureté de 45 | F (daN) dureté de 60 | f (mm) flèche |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|---------------------|--------|----------------------|----------------------|---------------|
| 20,6 | 17,5 | 10 | 27,7 | 5,6 | 20,6 | 8 | 35 | 50 | 0,7 |
| 31,5 | 25,4 | 13 | 44,5 | 10,4 | 31,5 | 10 | 75 | 100 | 1,2 |
| 34,3 | 35 | 13 | 50,8 | 13,5 | 34,3 | 16 | 150 | 330 | 1,2 |
| 38* | 23 | 16 | 64 | 16 | 38,5 | 19 | 400 | 700 | 2-1 |
| 41,1 | 44,5 | 16 | 63,5 | 15,7 | 41,1 | 19 | 250 | 700 | 2 |
| 56,6 | 50,8 | 20 | 95 | 25,4 | 56,6 | 20 | 700 | 1 000 | 3 |

* se monte par paire.

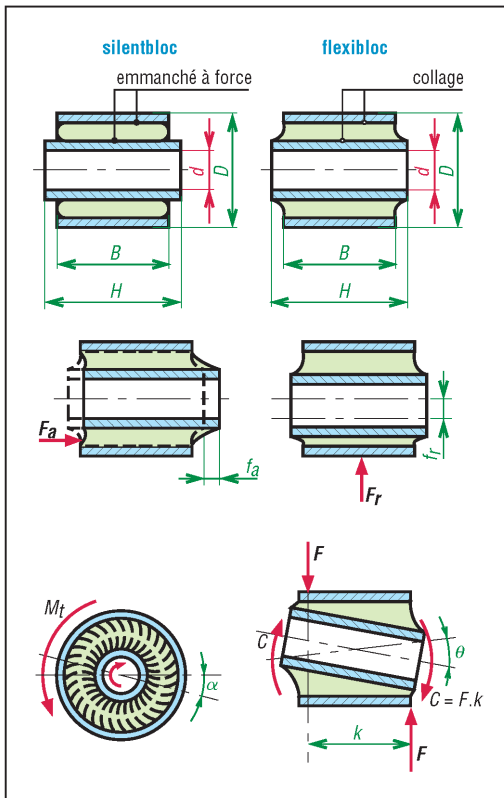
4. Support à élasticité axiale : Paulstra SC



44. Dimensions de supports à élasticité axiale.

| Support à élasticité axiale : extraits de dimensions | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| D ₁ (mm) | H (mm) | d (mm) | D (mm) | E (mm) | A (mm) | K (mm) | B (mm) | J (mm) | repère vue de dessus | dureté 45 | | dureté 60 | | dureté 75 | |
| | | | | | | | | | | F (daN) | f (mm) | F (daN) | f (mm) | F (daN) | f (mm) |
| 20 | 11 | 6,2 | 19 | 3,2 | 25 | 3 | 7 | 1 | c | 6 | 1 | 8 | 0,8 | 10 | 0,5 |
| 26 | 28 | 8 | 26 | 5,2 | 36 | 12,5 | 11,5 | 1,5 | c | 20 | 1,5 | 30 | 1,2 | 40 | 0,8 |
| 37,5 | 40 | 12,1 | | | 48 | 18 | 8 | 2 | a | 50 | 2,5 | 65 | 1,8 | 80 | 1,5 |
| 55,7 | 55 | 18,2 | | | 70 | 27 | 19 | 3 | a | 100 | 3,5 | 150 | 3 | 180 | 2 |
| 57,2 | 70 | 18,2 | 86 | 10,5 | 90 | 39 | 19 | 3 | d | 135 | 3,5 | 190 | 3 | 250 | 2 |
| 66,5 | 93 | 20,2 | 95 | 8,5 | 107 | 47 | 28 | 3 | d | 250 | 5 | 350 | 3,5 | 420 | 2 |
| 76 | 90 | 22,2 | 100 | 8,5 | 112 | 42 | 28 | 3 | d | 225 | 5 | 320 | 4,5 | 380 | 3 |
| 87,5 | 100 | 40,2 | 114 | 8,5 | 127 | 47 | 33 | 3 | d | 325 | 4,5 | 440 | 3,5 | 550 | 2,5 |
| 86 | 120 | 40,2 | 104 | 10,5 | 120 | 63 | 33 | 3 | b | 400 | 4,5 | 550 | 3,5 | 670 | 2,5 |
| 118 | 140 | 60,2 | 145 | 10,5 | 164 | 66 | 46 | 4 | b | 700 | 6,5 | 900 | 5 | 1 100 | 3 |

5. Articulations élastiques : Paulstra « silentbloc et flexibloc »



| Articulations élastiques : extraits de dimensions | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|---|
| Silentbloc Flexibloc | d (mm) H10 | D (mm) * | B (mm) JS15 | H (mm) ±0,1 | charge radiale | | charge axiale | | angle α torsion maxi (°) | angle θ battement maxi (°) | |
| | | | | | F _r (daN) | f _r (mm) | F _a (daN) | f _a (mm) | | | |
| * | * | 6 | 16 | 12 | 14 | 10 | 0,07 | 5 | 0,3 | 30 | 7 |
| * | * | 8 | 16 | 15 | 17 | 30 | 0,1 | 15 | 1,3 | 15 | 3 |
| * | * | 8 | 20 | 15 | 19 | 20 | 0,1 | 10 | 0,3 | 30 | 6 |
| * | * | 10 | 22 | 15 | 17 | 40 | 0,3 | 15 | 0,8 | 25 | 6 |
| * | * | 10 | 22 | 23 | 20 | 55 | 0,03 | 35 | 0,4 | 20 | 1 |
| * | * | 10 | 22 | 25 | 30 | 100 | 0,2 | 40 | 1,5 | 20 | 3 |
| * | * | 10 | 22 | 30 | 33 | 110 | 0,03 | 70 | 0,6 | 20 | 1 |
| * | * | 12 | 25 | 30 | 34 | 120 | 0,2 | 50 | 0,8 | 20 | 3 |
| * | * | 12 | 25 | 20 | 23 | 55 | 0,04 | 25 | 0,2 | 20 | 3 |
| * | * | 12 | 25 | 50 | 54 | 550 | 0,3 | 45 | 0,6 | 15 | 1 |
| * | * | 12 | 26 | 32 | 34 | 80 | 0,07 | 50 | 0,4 | 30 | 3 |
| * | * | 14 | 27 | 25 | 28 | 120 | 0,2 | 50 | 1,8 | 20 | 4 |
| * | * | 14 | 27 | 25 | 28 | 90 | 0,04 | 45 | 0,4 | 20 | 3 |
| * | * | 14 | 30 | 38 | 42 | 150 | 0,2 | 70 | 1,9 | 30 | 3 |
| * | * | 14 | 30 | 38 | 42 | 100 | 0,08 | 65 | 0,4 | 30 | 3 |
| * | * | 16 | 32 | 25 | 28 | 140 | 0,2 | 50 | 1,6 | 20 | 5 |
| * | * | 16 | 32 | 28 | 32 | 130 | 0,05 | 65 | 0,4 | 20 | 1 |
| * | * | 16 | 32 | 70 | 76 | 500 | 0,1 | 180 | 1,5 | 20 | 1 |
| * | * | 16 | 32 | 60 | 66 | 450 | 0,05 | 300 | 0,4 | 20 | 1 |
| * | * | 20 | 38 | 55 | 59 | 300 | 0,15 | 150 | 1 | 20 | 2 |
| * | * | 20 | 30 | 55 | 59 | 410 | 0,04 | 270 | 1,5 | 20 | 1 |
| * | * | 24 | 48 | 50 | 58 | 350 | 0,3 | 120 | 2 | 20 | 2 |
| * | * | 24 | 42 | 50 | 55 | 400 | 0,05 | 200 | 0,4 | 20 | 3 |
| * | * | 28 | 48 | 60 | 66 | 400 | 0,15 | 190 | 1,1 | 20 | 2 |
| * | * | 28 | 48 | 60 | 66 | 540 | 0,06 | 270 | 0,5 | 20 | 3 |
| * | * | 32 | 52 | 60 | 66 | 600 | 0,15 | 260 | 2,2 | 10 | 1 |
| * | * | 32 | 52 | 60 | 66 | 600 | 0,06 | 300 | 0,3 | 20 | 3 |

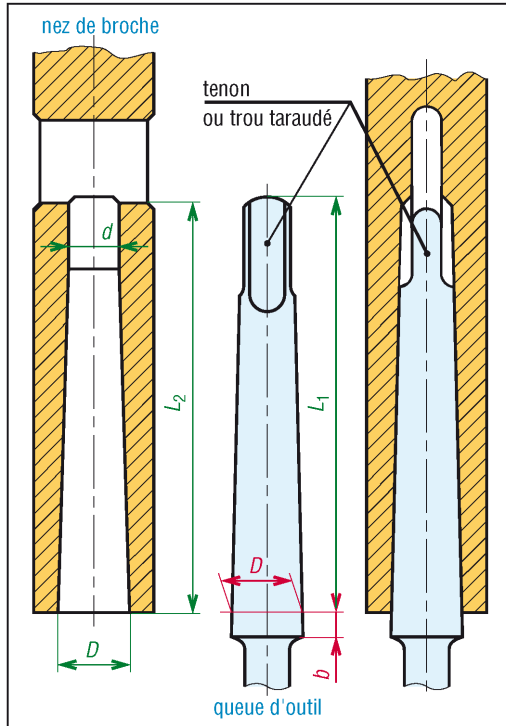
45. Dimensions d'articulations élastiques.

* alésage recommandé D : N9.

VII - Cônes de fixation

Le principe de la liaison par cône est indiqué page 252.

1. Cônes morses (avec coincement) NF ISO 296



46. Dimensions des cônes morses et à 5 %.

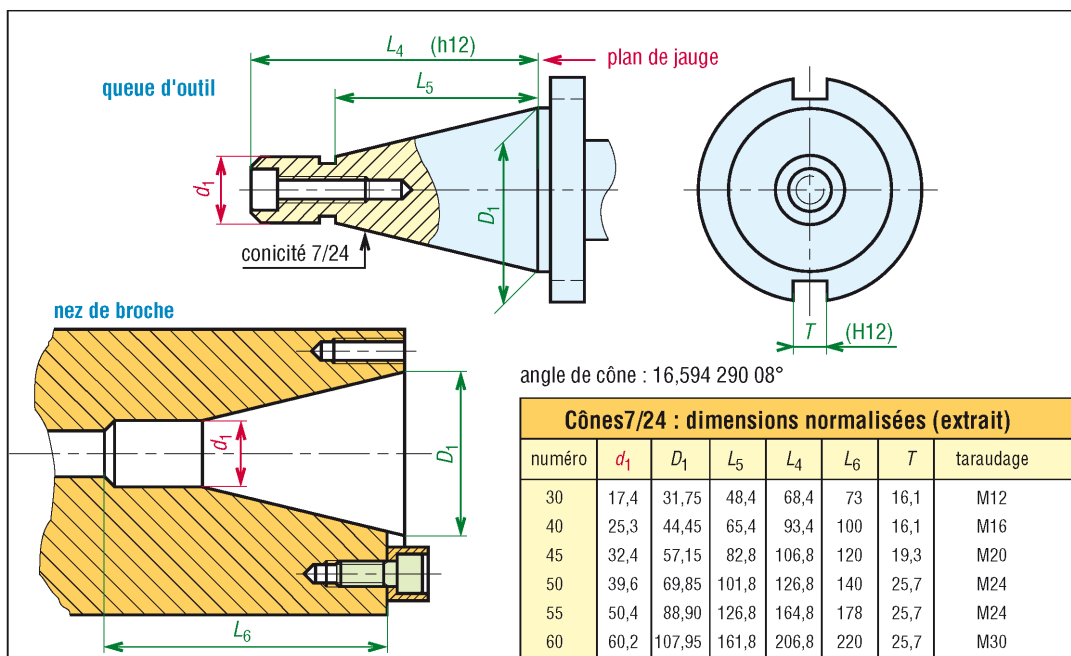
| n° | conicité (%) | D | b | d | L_1 maxi | L_2 | L_1^* maxi | trou ** taraudage |
|----|--------------|--------|-----|------|------------|-------|--------------|-------------------|
| 0 | 5,205 | 9,045 | 3 | 6,7 | 56,5 | 52 | 50 | |
| 1 | 4,988 | 12,065 | 3,5 | 9,7 | 62 | 56 | 53,5 | M6 |
| 2 | 4,995 | 17,780 | 5 | 14,9 | 75 | 67 | 64 | M10 |
| 3 | 5,020 | 23,825 | 5 | 20,2 | 94 | 84 | 81 | M12 |
| 4 | 5,194 | 31,267 | 6,5 | 26,5 | 117,5 | 107 | 102,5 | M16 |
| 5 | 5,263 | 44,399 | 6,5 | 38,2 | 149,5 | 135 | 129,5 | M20 |
| 6 | 5,214 | 63,348 | 8 | 54,8 | 210 | 188 | 182 | M24 |

L_1^* : longueur L_1 avec trou taraudé
 ** diamètre du trou taraudé (à la place du tenon)
 $2,857\ 480^\circ \leq \text{angles} \leq 3,014\ 554^\circ$

| n° | conicité (%) | D | b | d | L_1 maxi | L_2 | L_1^* maxi | trou ** taraudage |
|-----|--------------|-----|-----|-------|------------|-------|--------------|-------------------|
| 4 | 5 | 4 | 2 | 3 | | 25 | 23 | |
| 6 | 5 | 6 | 3 | 4,6 | | 34 | 32 | |
| 80 | 5 | 80 | 8 | 71,5 | 220 | 202 | 196 | M30 |
| 100 | 5 | 100 | 10 | 90 | 260 | 240 | 232 | M36 |
| 120 | 5 | 120 | 12 | 108,5 | 300 | 276 | 268 | M36 |
| 160 | 5 | 160 | 16 | 145,5 | 380 | 350 | 340 | M48 |
| 200 | 5 | 200 | 20 | 182,5 | 460 | 424 | 412 | M48 |

L_1^* : longueur L_1 avec trou taraudé
 ** diamètre du trou taraudé (à la place du tenon)

2. Cônes 7/24 pour broches (sans coincement) NF ISO 297



angle de cône : $16,594\ 290\ 08^\circ$

| numéro | d_1 | D_1 | L_5 | L_4 | L_6 | T | taraudage |
|--------|-------|--------|-------|-------|-------|------|-----------|
| 30 | 17,4 | 31,75 | 48,4 | 68,4 | 73 | 16,1 | M12 |
| 40 | 25,3 | 44,45 | 65,4 | 93,4 | 100 | 16,1 | M16 |
| 45 | 32,4 | 57,15 | 82,8 | 106,8 | 120 | 19,3 | M20 |
| 50 | 39,6 | 69,85 | 101,8 | 126,8 | 140 | 25,7 | M24 |
| 55 | 50,4 | 88,90 | 126,8 | 164,8 | 178 | 25,7 | M24 |
| 60 | 60,2 | 107,95 | 161,8 | 206,8 | 220 | 25,7 | M30 |

47. Dimensions des cônes 7/24

21

SOUDAGE

OBJECTIFS

- Donner la représentation normalisée des soudures.
- Indiquer les règles et recommandations pour concevoir les assemblages soudés.
- Préciser les principaux matériaux soudables et les principaux procédés de soudage.
- Fournir des indications concernant le calcul des soudures. Donner les tolérances générales des structures soudées.

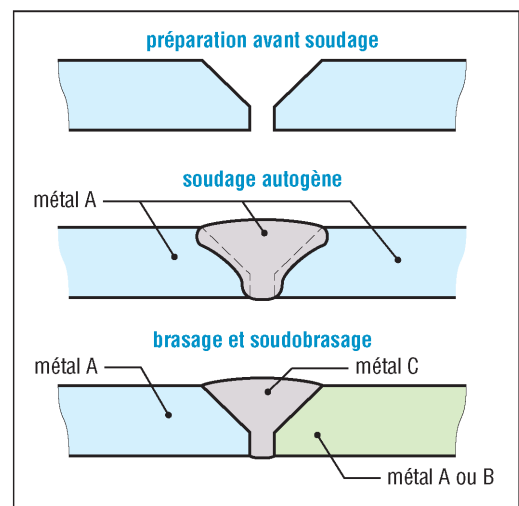
De tous les procédés de base, le soudage est probablement le plus important, autant en grande série (carrosseries...) qu'en pièce unitaire (cuve de centrale...).

I - Généralités et définitions

Souder : c'est assembler de façon permanente deux ou plusieurs pièces, tout en assurant entre elles la continuité de la matière.

Soudage autogène : les pièces à assembler, de même nature ou de composition voisine, participent à la constitution du joint ou du cordon de soudure. L'assemblage est dit homogène, c'est-à-dire « fait du même métal ».

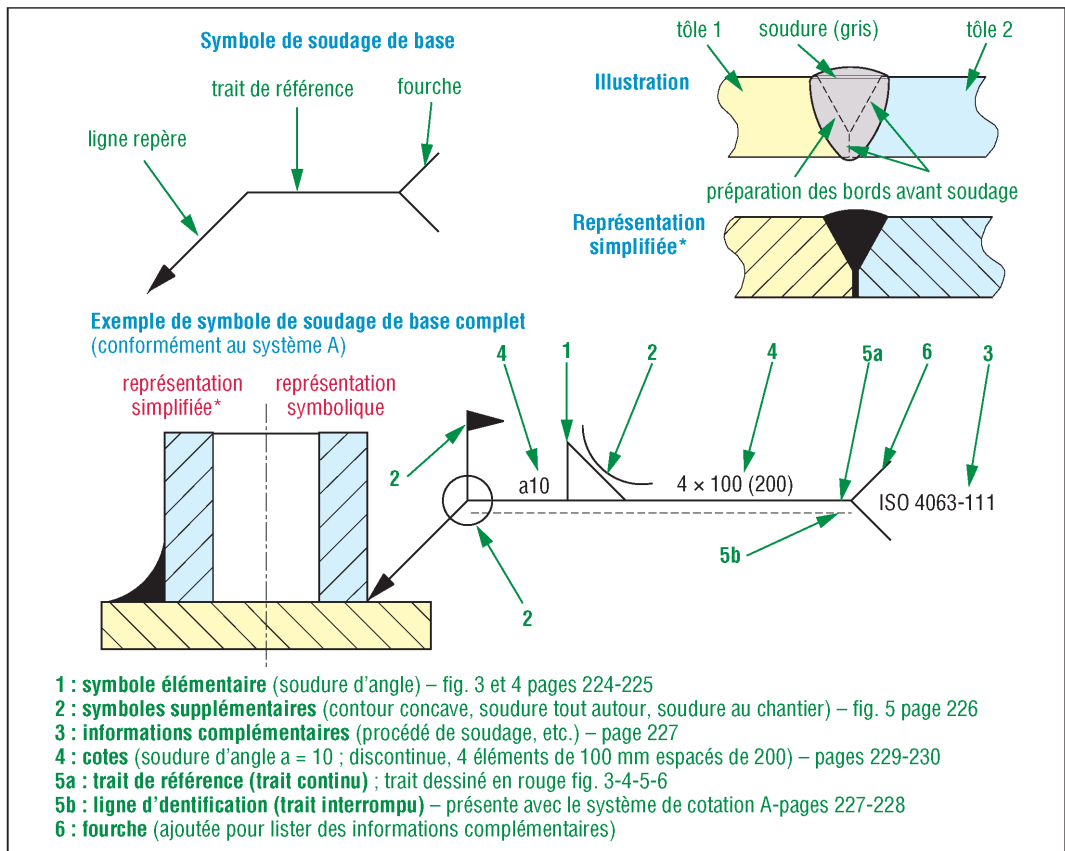
Brasage et soudobrasage : l'assemblage est hétérogène ; la formation du joint ou cordon est assurée par la seule intervention du métal d'apport qui agit comme une colle. La température de fusion du métal d'apport est inférieure à celle des matériaux à souder qui peuvent être de natures différentes.



1. Soudage autogène et brasage.

II - Représentation normalisée des soudures

La norme NF EN ISO 2553 (2014) remplace la NF EN 2253 (de 1994) et définit les règles pour représenter symboliquement les joints soudés ou soudures sur les dessins techniques.



2. Symboles de soudage (NF EN ISO 2553). * représentation utilisée pour les besoins du chapitre et non normalisée.

La norme NF EN ISO 2553, à vocation mondiale, préconise deux systèmes de représentation. Dans ces représentations symboliques, les cordons ne sont pas dessinés, seule la ligne du joint est représentée. La forme et les dimensions de la soudure sont indiquées sous forme d'une cotation composée d'une ligne repère, ou flèche, et d'un double trait de référence pour le système A (celui retenu pour ce chapitre) portant une série de symboles et indications normalisées (voir fig.2).

Remarque : le système B fondé sur la norme AWS A-2-4 (« zone Pacifique »), utilise un seul trait de référence. Le système A (« zone Europe ») fondé sur la NF ISO 2553 utilise à la fois un trait continu plus un trait interrompu pour symboliser l'envers de la soudure. La plupart des symboles (élémentaires, supplémentaires) et éléments du chapitre sont communs aux deux systèmes.

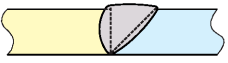

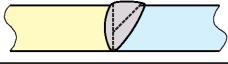

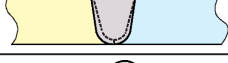


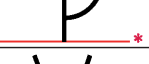
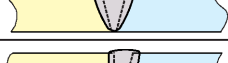


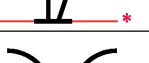
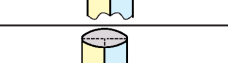
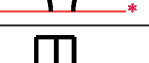













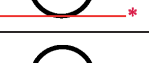
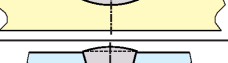

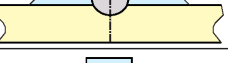
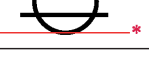





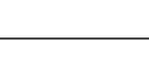
1. Symboles élémentaires et supplémentaires

Les symboles élémentaires, tracés sur le trait de référence, indique le type de la soudure et la préparation de l'assemblage. Les symboles supplémentaires, ajoutés aux précédents, donnent des informations sur la forme de la soudure où la manière dont le joint soudé doit être réalisé.

| Symboles élémentaires | | |
|------------------------------------|--|-------------------|
| Désignation | Illustration --- préparation avant soudage | Symbole normalisé |
| soudure bout à bout à bords droits | | |
| soudure bout à bout en V | | |
| soudure bout à bout en Y | | |

* Le trait rouge ne fait pas partie du symbole, il indique la position du trait de référence (fig. 1).

3. Symboles élémentaires normalisés pour représenter les joints soudés (NF EN ISO 2553) : partie 1.

| Symboles élémentaires | | |
|---|---|---|
| Désignation | Illustration --- préparation avant soudage | Symbole normalisé * |
| soudure bout à bout en demi V |  |  |
| soudure bout à bout en demi Y |  |  |
| soudure bout à bout en U |  |  |
| soudure bout à bout en J |  |  |
| soudure bout à bout en V à flancs droits |  |  |
| soudure bout à bout en demi V à flancs droits |  |  |
| soudure évasée en V |  |  |
| soudure sur chant |  |  |
| bout à bout à bords relevés / soudure en angle extérieure |  |  |
| soudure par rechargement |  |  |
| soudure d'angle |  |  |
| soudure en bouchons ou sur entailles |  |  |
| soudure par points par résistance (y compris le bossage) |  |  |
| soudure par points par fusion |  |  |
| soudure à la molette par résistance |  |  |
| soudure à la molette fusion |  |  |
| soudure des goujons |  |  |
| soudure évasée à chanfrein |  |  |
| soudure par transparence |  |  |

* Le trait rouge ne fait pas partie du symbole, il indique la position du trait de référence (fig. 2).

4. Symboles élémentaires normalisés pour représenter les joints soudés (NF EN ISO 2553) : partie 2.

| Symboles élémentaires | | | |
|-------------------------------------|------------------|-----------------------|----------------------------|
| Désignation | Symbole | Exemple d'application | Illustration de la soudure |
| soudure plate | | | |
| soudure convexe | | | |
| soudure concave | | | |
| reprise à l'envers | | | |
| surépaisseur à la racine | | | |
| bord du cordon correctement mouillé | | | pas d'exemple |
| avec support à l'envers | non spécifié | | |
| | substantif | | |
| | amovible | | |
| élément d'écartement | | | |
| insert consommable (carré) | | | |
| soudure tout autour (périphérique) | | | |
| soudure entre deux points | | | |
| soudure faite au chantier | | | pas d'exemple |
| soudures discontinues alternées | | | |

* Le trait rouge ne fait pas partie du symbole, il indique la position du trait de référence (fig. 2).

5. Symboles supplémentaires normalisés utilisés pour représenter les joints soudés (NF EN ISO 2553).

| Combinaisons de symboles élémentaires | | |
|---|--------------|---------|
| Type de soudure | Illustration | Symbole |
| soudure bout à bout en K | | |
| soudure bout à bout en double V | | |
| soudure bout à bout en double Y dissymétrique | | |

6. Exemples de combinaisons de symboles élémentaires avec cotations particulières.

| Principaux procédés de soudage NF EN ISO 4063 (2009) – « Détails NF EN 14610 » | | |
|---|---|---|
| 1 – Soudage à l'arc | 2 – Soudage par résistance | 5 – Soudage par faisceau |
| 11 – À l'arc avec électrode fusible sans protection gazeuse 111 – Avec électrode enrobée 112 – Électr. enrobée par gravité 114 – Avec fil fourré protecteur | 21 – Part points 22 – À la molette ou au galet 23 – Par bossages 24 – Par étincelage 25 – En bout résistance pure 26 – Goujons par résistance 27 – À haute fréquence (HF) 29 – Autres procédés | 51 – Par faisceau d'électrons 511 – Sous vide 512 – Sous atmosphère 52 – Soudage laser 521 – Laser à solide 522 – Laser à gaz 523 – Laser à diode |
| 12 – À l'arc sous flux en poudre 121 – Avec un seul fil électrode 122 – Une électrode en feuillard 125 – Avec fil fourré 126 – Électrode feuillard fourrée | 3 – Soudage aux gaz 31 – Soudage oxygaz 311 – Oxyacétylène 312 – Oxypropane 313 – Oxhydrique | 7 – Autres procédés 71 – Aluminothermique 72 – Sous laitier 73 – Électrogaz 74 – Par induction 741 – En bout 742 – À la mollette 75 – Par rayonnement 753 – Par infrarouge 78 – Soudage des goujons |
| 13 – À l'arc avec électrode fusible et sous protection gazeuse 131 – MIG (gaz inerte) 132 – MIG fil fourré de flux 133 – MIG fil fourré de poudre 135 – MAG (gaz actif) 136 – MAG fil fourré de flux 138 – MAG fil fourré de poudre | 4 – Soudage par pression 41 – Par ultrasons 42 – Par friction 43 – Par friction malaxage 44 – Par haute énergie mécanique 441 – Par explosion 442 – Par impulsion magnétique 45 – Par diffusion 47 – Aux gaz avec pression 48 – Avec pression à froid 49 – Avec pression à chaud | 9 – Brasage – Soudobrasage 91 – Brasage fort – chauffe locale 92 – Brasage fort – chauffe globale 94 – Brasage tendre – chauffe locale 95 – Brasage tendre – chauffe globale 97 – Soudobrasage 971 – Aux gaz 972 – À l'arc 983 – Soudobrasage – TIG 985 – Soudobrasage – Plasma 986 – Soudobrasage – Laser |
| 14 – À l'arc sous protection gazeuse et électrode réfractaire 141 – TIG gaz inerte fil d'apport 142 – TIG autogène 143 – TIG avec fil fourré 145 – TIG avec gaz réducteur 147 – TAG (gaz actif) | 8 – Coupage – Gougeage 82 – Coupage à l'arc 822 – Oxycoupage à l'arc 83 – Coupage au plasma 84 – Coupage laser | |
| 15 – Soudage plasma 151 – Plasma MIG 152 – Plasma avec poudre 153 – Plasma à arc transféré 154 – Plasma à arc non transféré | | |

2. Informations complémentaires

La fourche (**fig. 2**), élément facultatif qui peut être ajouté au trait de référence continu, est utilisée pour ajouter des informations complémentaires non symboliques comme le procédé de soudage choisi (ISO 4063), le niveau de qualité (ISO 5817, ISO 10042...), le métal d'apport (ISO 14171, ISO 14341...), la position de soudage (ISO 6947), etc.

Les indications utiles doivent être listées et séparées les unes des autres par une barre oblique « / ».

Les procédés de soudage sont identifiés par un nombre normalisé (NF EN ISO 4063), tableau :

3. Positions des symboles – trait de référence – Système A

La position de la ligne repère peut être quelconque, l'extrémité de la flèche doit toucher la ligne du joint.

Pour les soudures en $1/2.V$, $1/2.Y$ et $1/2.J$, la flèche doit être orientée vers la tôle devant être préparée.

Le symbole élémentaire est sur le trait de référence si la surface extérieure de la soudure est faite du côté de la ligne de repère du joint. Il est tracé sur la ligne d'identification (trait interrompu) si la soudure est de l'autre côté (cotation système A).

| Positions des symboles sur les dessins (Système A) | | | |
|--|--|---|--|
| exemples | | symbolisation et cotation possible | |
| cas \perp ou \parallel ou ∇ ou Υ ou ∇ | | <p>Soudure du côté de la ligne de repère</p> | |
| | | <p>Soudure du côté opposé à la ligne de repère</p> | |
| | | <p>tôle à préparer</p> <p>la flèche doit être dirigée vers la tôle à préparer</p> | |
| exemples de combinaisons de symboles élémentaires et supplémentaires (système A) | | | |
| | | <p>variante 1</p> <p>ou</p> <p>variante 2</p> | |
| <p>mettre le symbole à cheval sur la ligne de référence :</p> <p>a) si la soudure est faite dans le plan de joint</p> <p>b) si les soudures sont symétriques</p> <p>\times Υ ∇ ∇ ∇ \parallel \times</p> | | | |

7. Positions des symboles sur les dessins (exemples).

4. Cotation des dimensions

À gauche du symbole élémentaire, une cote peut, au besoin, indiquer la dimension transversale principale de la soudure. À droite du symbole élémentaire, une ou plusieurs cotes relatives à la longueur des cordons peuvent être indiquées.

| Désignation | Représentation simplifiée | Inscription |
|---|---------------------------|-------------|
| soudures d'angle discontinues alignés | | |
| soudures d'angle discontinues alternées | | |
| soudures en entailles | | |
| soudures en bouchons | | |
| soudures par points | | |
| soudures en ligne continue | | |

8. Cotation normalisée des dimensions. * Enlever le symbole Z si les cordons sont alignés.

| Soudure bout à bout | Inscription | Soudure d'angle | Inscription |
|---------------------|-------------|---|-------------------|
| | | | (variante 1) |
| | | | |
| | | | (variante 2) |
| | | | |
| | | <p>$a = \text{gorge}$ $z = \text{côté}$</p> | $(z = a\sqrt{2})$ |

9. Cotation normalisée des dimensions (suite). Soudures d'angle utiliser les lettres a et z. (z_1 et z_2 si côtés inégaux)

III - Conception des assemblages soudés

Pour certains appareils, sous pression, sous haute température..., les soudures sont soumises à une réglementation et une législation. Il convient donc de s'y reporter. Les indications et recommandations ci-dessous sont générales et indicatives. Elles sont utilisables pour des ensembles mécano-soudés traditionnels (bâti, carter...) réalisés en soudage à l'arc.

1. Préparation et forme du cordon - NF EN ISO 9692-1

Les recommandations s'appliquent au soudage à l'arc avec électrodes enrobées (111), aux MIG et MAG (13), au TIG (141) et par faisceau (512).

| $E \leq 2$ | | | en V : $3 \leq E \leq 40$ en Y : $E > 10$ | | | $111 - 13 - 141$ | | | | | | | | |
|--------------------|---|---------------|--|---|---------------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------|----------|--|--|------------------|
| | <table border="1"> <thead> <tr> <th>procédés</th> <th>E</th> <th>J</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3 - 111 - 141</td> <td>$E \leq 4$</td> <td>$J \approx E$</td> </tr> <tr> <td>13 - 141</td> <td>$3 \leq E \leq 8$</td> <td>6 à 8</td> </tr> </tbody> </table> | procédés | E | J | 3 - 111 - 141 | $E \leq 4$ | $J \approx E$ | 13 - 141 | $3 \leq E \leq 8$ | 6 à 8 | $E > 10$ | | | $111 - 13 - 141$ |
| procédés | E | J | | | | | | | | | | | | |
| 3 - 111 - 141 | $E \leq 4$ | $J \approx E$ | | | | | | | | | | | | |
| 13 - 141 | $3 \leq E \leq 8$ | 6 à 8 | | | | | | | | | | | | |
| $3 \leq E \leq 10$ | | | $E > 12$ | | | $111 - 13 - 141$ | | | | | | | | |
| | | | $E > 16$ | | | $111 - 13 - 141$ | | | | | | | | |
| | | | $E > 30$ | | | $111 - 13 - 141$ | | | | | | | | |

10. Travail de préparation en fonction de l'épaisseur à souder (Extrait NF EN ISO 9692-1).

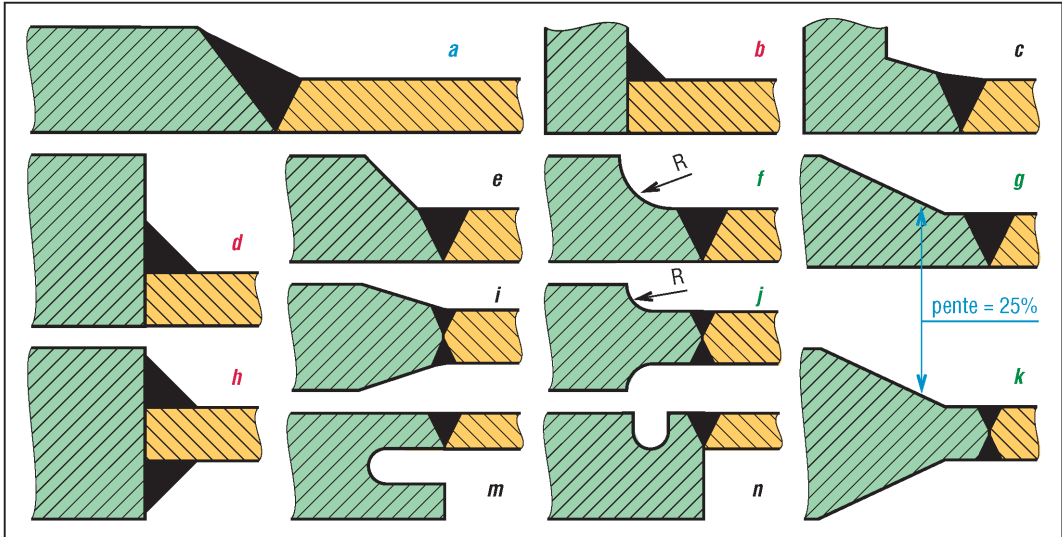
2. Assemblages entre pièces d'épaisseurs différentes

En règle générale, il faut s'efforcer de réduire les différences entre épaisseurs.

L'assemblage (a) convient aux épaisseurs peu différentes. Les assemblages (b), (d) et (h), réalisables à l'arc, ne sont souhaitables qu'en présence de charges statiques ; ils engendrent des concentrations de contraintes ; récipients sous pression, voir NF EN 1708-1.

S'il existe des efforts alternés ou des phénomènes de fatigue, utiliser les assemblages des autres types : (f), (g), (j) et (k) sont les plus performants mais aussi les plus coûteux.

Les assemblages (f), (j), (m) et (n) permettent de souder des épaisseurs très inégales.



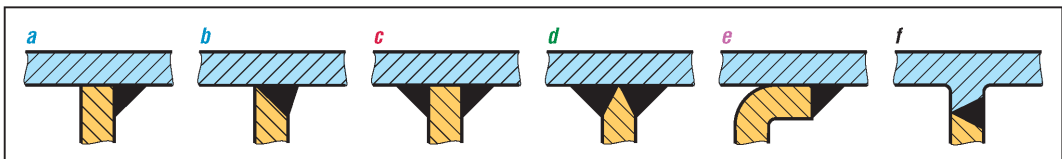
11. Préparations et soudures usuelles entre pièces d'épaisseurs différentes.

3. Soudures en angle

Les cordons concaves transmettent mieux les efforts que les cordons convexes. Ils sont à préférer lorsqu'il existe des efforts alternés ou des phénomènes de fatigue.

a) Soudures en T

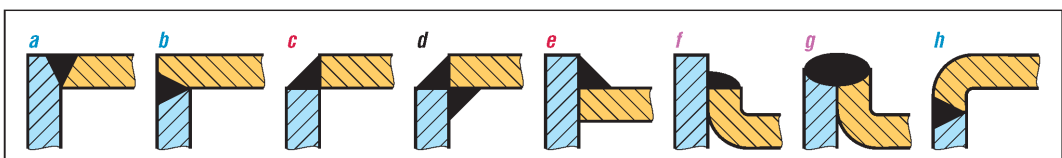
Les assemblages (a) et (b) avec préparation utilise un seul cordon, (c) est bon et (d) est le plus résistant. (e) permet de souder une tôle mince sur une tôle plus épaisse. (f) utilisant une soudeuse bout à bout est celui qui engendre le moins de déformation.



12. Soudures en angle ou en T. Pour c et d, soudage des deux côtés.

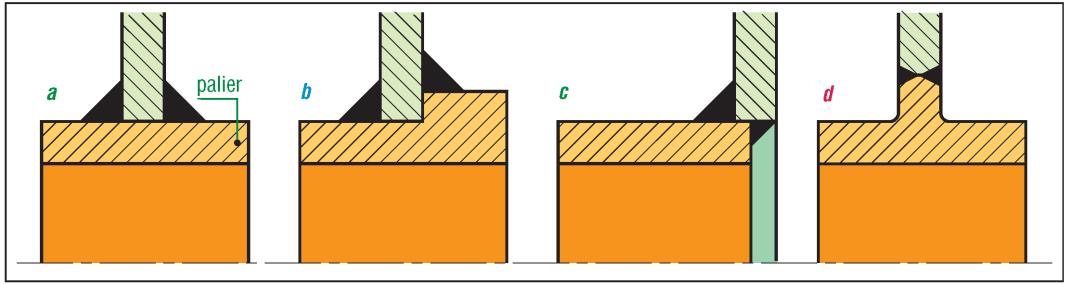
b) Soudures en L

L'assemblage en L est relativement fragile ; il est interdit dans certains cas. Les préparations (a), (b) et (h) sont les plus rationnelles (surtout h) ; (c) et (e) ont une faible résistance en flexion ; (f) et (g) sont utilisés avec des tôles minces.



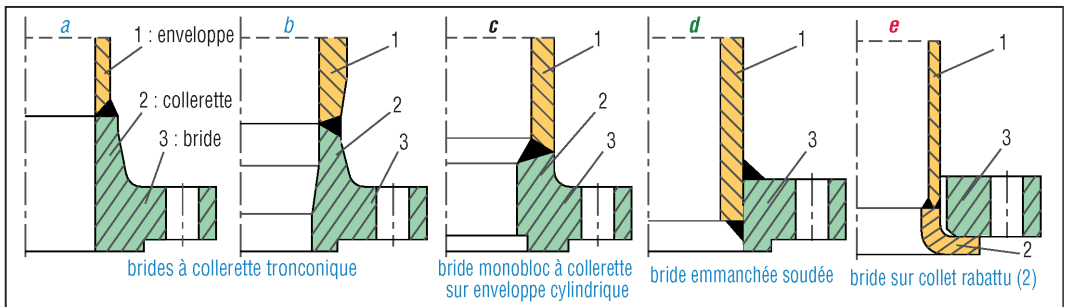
13. Soudures en angle ou en L. Pour d soudage des deux côtés.

c) Soudures des paliers : (a) et (c) sont les plus simples ; (b) simplifie la fabrication ; (d) meilleure en fatigue exige une pièce moulée.



14. Soudage de paliers.

d) Soudures des brides : (a), (b), (c), (d) sont soudées sur l'enveloppe ; celle du cas (e), non soudée, est tournante, son collet 2 peut être réalisé comme en (d). Règles de conception : NFEN 13455-3. Règles de calcul : NFE 1591-1.

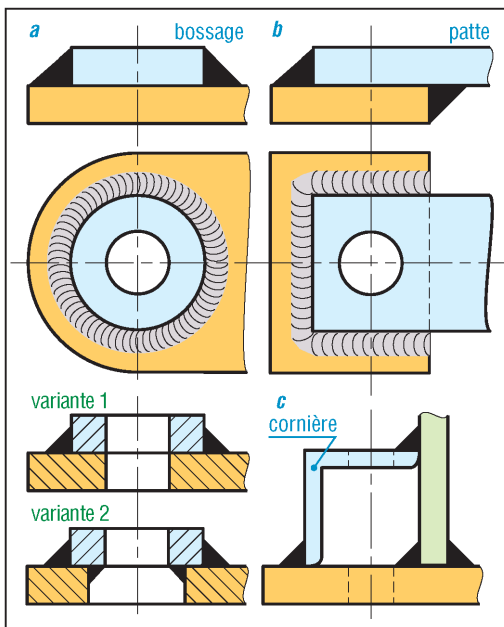


15. Soudage des brides: extrait NF EN 13455-3 ; d'autres conceptions et d'autres types de brides sont possibles.

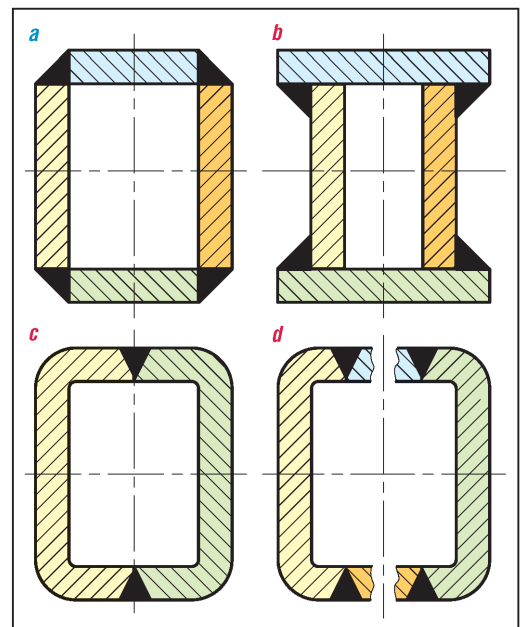
4. Renforcements

Les bâtis et les éléments peuvent être aisément renforcés avec des plats, ronds ou profilés divers soudés directement sur la structure.

Les formes en caisson, simple ou multiple, permettent une plus grande rigidité. Les solutions (b), (c) et (d) sont à préférer ; (c) et (d) sont les plus résistantes et les plus esthétiques. Dans tous les cas, prévoir une disposition symétrique des cordons.



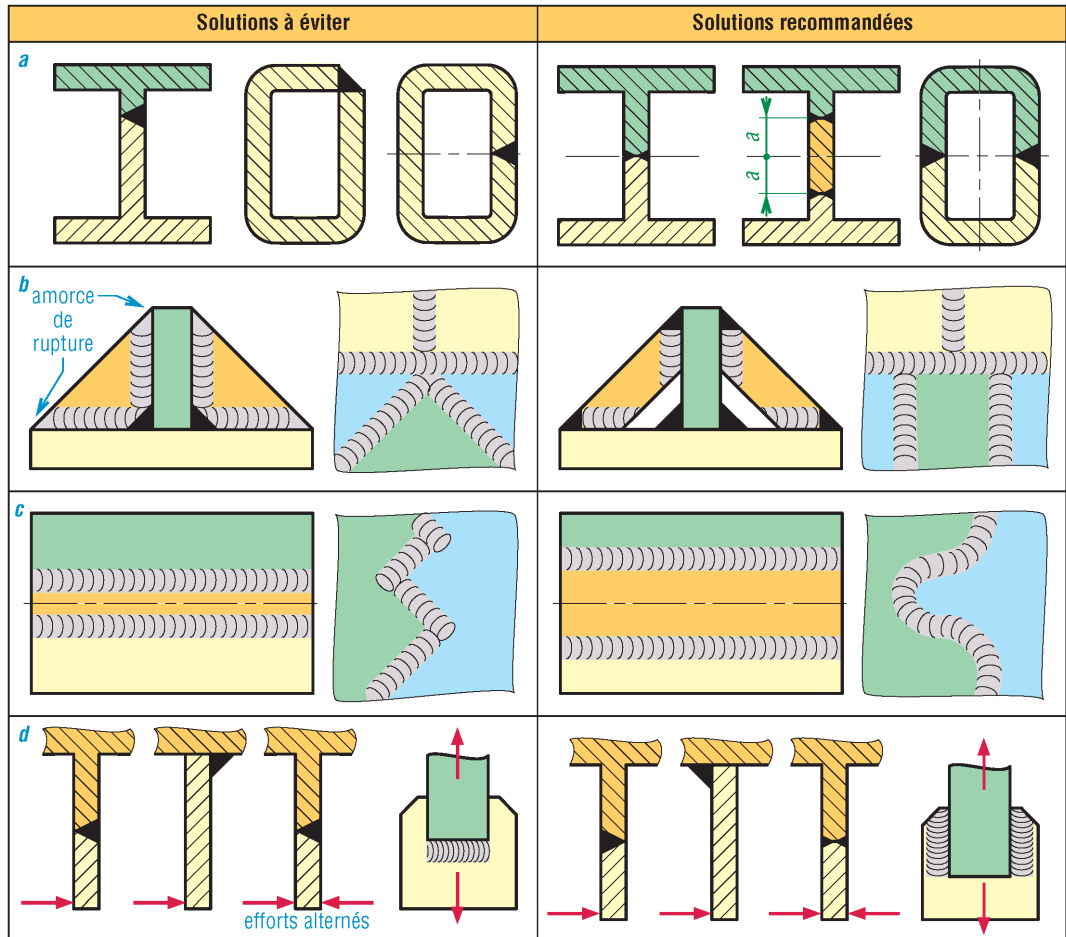
16. Exemples de renforcements.



17. Formes en caisson.

5. Recommandations et suggestions

- Mettre les cordons dans les plans neutres et les disposer symétriquement pour éviter les déformations. Penser au retrait après soudage (fig. 18 a).
- Éviter les croisements de cordons (fig. 18 b).
- Éviter les angles vifs et les cordons trop rapprochés (fig. 18 c).
- Disposer et choisir les cordons en fonction des efforts exercés (fig. 18 d).
- Éviter l'usinage des cordons et prévoir des surépaisseurs.
- Simplifier les solutions, diminuer le nombre de pièces et de cordons, utiliser le pliage...
- Pour les éléments secondaires (patte annexe...) préférer le boulonnage au soudage.



18. Recommandations et suggestions.

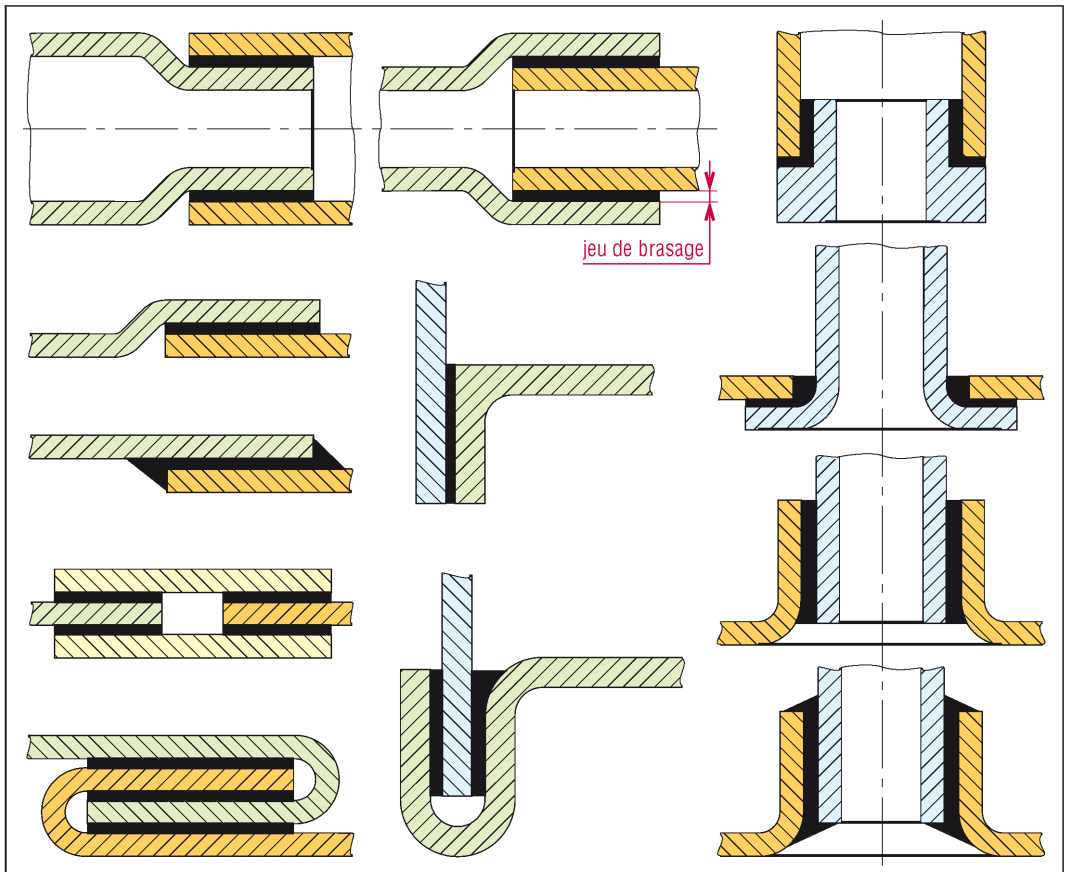
6. Conception dans le cas du brasage et du soudobrasage

Le brasage tendre est réalisé à moins de 400 °C (métal d'apport : plomb + étain, étain + argent), le brasage fort à plus de 450 °C (alliages d'argent, de cuivre, d'aluminium). Dans les deux cas, les pièces à assembler sont chauffées. Détails : Guide d'application NF EN 14234.

En soudobrasage, les pièces à assembler ne sont pas chauffées et les températures de soudage varient de 600 °C à 900 °C. Métaux d'apport : alliages de cuivre, d'argent, d'aluminium...

Les caractéristiques mécaniques du joint sont moins bonnes que dans le cas d'un joint homogène (soudage autogène). Métaux d'apport en brasage fort : NF EN ISO 17672 ; brasage tendre : NF EN ISO 9453.

Contrairement au soudobrasage, le brasage dépend de l'écoulement par capillarité du métal d'apport fondu entre les pièces séparées par un jeu étroit (page 235 : brasage fort). Le métal d'apport doit avoir une température de fusion inférieure à celle des pièces à brasier. Les assemblages par recouvrement, plus faciles à fabriquer et plus résistants, sont plus utilisés que les assemblages bout à bout.



19. Exemples de joints brasés également utilisables en collage.

| | Contraintes faibles | Contraintes moyennes | Contraintes fortes |
|--------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| Recouvrement | | | |
| Bout à bout | | | |
| Tôles minces | | | |
| Tôles minces | | | |
| Tubes | | | |

20. Joints brasés : variantes de conception suivant contraintes de service (extrait NF EN 14324).

| Métal d'apport* | Jeux en mm | Fusion en C | Brasages forts courants de couples de matériaux** |
|-------------------------|-------------|-------------|---|
| Al (aluminium) | 0,05 à 0,25 | 550 à 670 | Al/Al (gamme réduite d'alliages) |
| Ag (argent) | 0,05 à 0,30 | 600 à 1 000 | Cu/Cu – Cu/aciers – aciers/Ni ; le plus polyvalent (sauf Al, Mg et réfractaire) |
| CP (cuivre phosphoreux) | 0,05 à 0,30 | 630 à 900 | Cu/Cu (et la plupart des alliages de Cu) |
| Cu (cuivre) | 0,05 à 0,20 | 820 à 1 080 | aciers/aciers – inox/inox – Cu/aciers (aussi Cu, carbures...) |

* autres cas : Ni (nickel), Co (cobalt), Pd (palladium), Au (or) ; ** alliages compris pour Al, Cu, Ni...

IV – Principaux matériaux soudables

1. Aciers

Les aciers non alliés à faible teneur en carbone, type S ou E, ont une bonne soudabilité. Même remarque pour les aciers inoxydables à condition que le pourcentage de carbone (% C) reste inférieur à 0,05 %.

Pour les C et les aciers faiblement alliés, le carbone est l'élément le plus défavorable au soudage dans la mesure où il favorise la trempe. La soudabilité peut être estimée par la méthode du carbone équivalent C_{eq} exprimé en pourcentage de masse.

$$C_{eq} = \% C + \frac{\% Mn}{6} + \frac{(\% Cr + \% Mo + \% V)}{5} + \frac{(\% Ni + \% Cu)}{15}$$

| | | |
|-------------------------------|----------------|--------------|
| C_{eq} = carbone équivalent | Mn = manganèse | Cr = chrome |
| C = carbone | Ni = nickel | Cu = cuivre |
| | Mo = molybdène | V = vanadium |

Si $C_{eq} \leq 0,4$: l'acier est parfaitement soudable à température ambiante.

$0,45 \leq C_{eq} \leq 0,7$: l'acier est moyennement soudable ; préchauffage de 100 à 400 °C. $C_{eq} > 0,7$: l'acier est difficilement soudable ; préchauffage, électrodes spéciales, traitements thermiques...

Exemples : C35 (0,35 % C et 0,6 % Mn) : $C_{eq} = 0,35 + 0,6/6 = 0,45$ (moyennement soudable)

Nuance 35NiCr18 : (0,35 % C, 4,5 % Ni, 1,7 % Cr, 0,8 % Mn) :

$C_{eq} = 0,35 + 0,8/6 + 1,7/5 + 4,5/15 = 1,12$ (acier difficilement soudable).

Remarque : voir recommandations de soudage NF EN 1011-1 à 3 pour le soudage à l'arc des aciers (EN 1011-3 pour les aciers inoxydables).

Cas des fontes : leur soudage est plus difficile (électrodes spéciales, préparation, préchauffage éventuel). Utilisation : réparation, rechargement de pièces usées, voir NF EN 1011-8 et NFA 32-040 pour plus de détails.

2. Aluminium et alliages

Les alliages sans durcissement structural (aluminium pur, Al + Mg, Al + Mn, Al + Si) ont une bonne soudabilité (TIG, MIG, plasma) avec un métal d'apport compatible.

Les alliages à durcissement structural (Al + Mg + Si, Al + Cu, Al + Zn + Mg) sont un peu plus difficiles à souder (MIG) et nécessitent plus de précautions. Recommandations : NF EN 1011-4.

V – Principaux procédés de soudage

Les procédés de soudage sont nombreux et le plus souvent complémentaires les uns des autres. Le soudage au chalumeau est recommandé pour les travaux délicats, sa mise en œuvre est simple à l'atelier ou sur un chantier. Le chalumeau oxyacétylénique est préconisé pour le brasage et le soudobrasage. Pour plus de détails, voir NF EN 14610.

1. Soudage à l'arc électrique

Ce soudage est le plus utilisé industriellement en soudage autogène. La fusion, très localisée, amène moins de déformation que le chalumeau et une plus grande productivité. Inconvénient : un refroidissement rapide générateur de contraintes internes et de déformations parfois difficiles à corriger.

La fusion du métal d'apport et des pièces à assembler est obtenue par un arc électrique jaillissant entre une électrode et les pièces à souder.

Techniques les plus caractéristiques :

a) Soudage à l'électrode enrobée

L'électrode, dirigée manuellement, est fusible et fournit le métal d'apport. L'enrobage assure un rôle protecteur et son épaisseur permet de jouer sur la forme du cordon, concave ou convexe.

b) Soudage MIG (*Metal Inert Gas*)

Encore appelé semi-auto, il est très adapté à la petite industrie : facile d'emploi ; arc visible ; pas de laitier ; grande vitesse de soudage ; temps de formation réduit.

Il utilise une électrode fusible (fil se déroulant automatiquement) travaillant en atmosphère inerte (gaz protecteur : argon, argon + hélium, etc.) afin de protéger le bain de fusion.

c) Soudage MAG (*Metal Active Gas*)

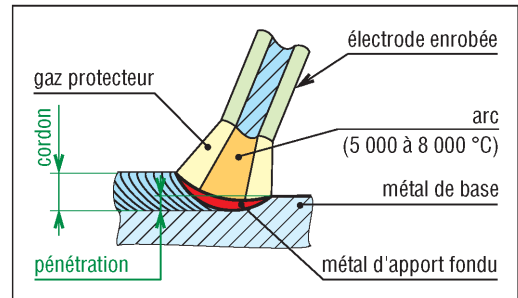
Variante du MIG utilisant un mélange de gaz carbonique CO_2 et d'argon adaptée au soudage des aciers de construction au carbone.

d) Soudage TIG (*Tungsten Inert Gas*)

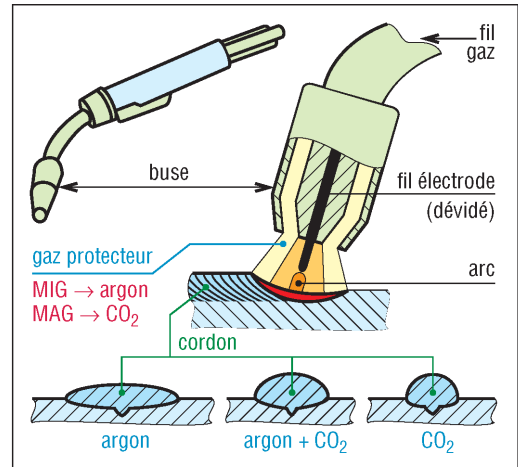
Variante des précédents, plus productive et utilisant une électrode réfractaire ou non fusible en tungstène. Le métal d'apport est amené manuellement (baguette) ou automatiquement (fil déroulé). Il convient bien aux faibles épaisseurs (0,20 à 3 mm) et peut aussi s'utiliser sans métal d'apport et remplacer le soudage par points. Il existe une variante TAG.

e) Soudage au plasma

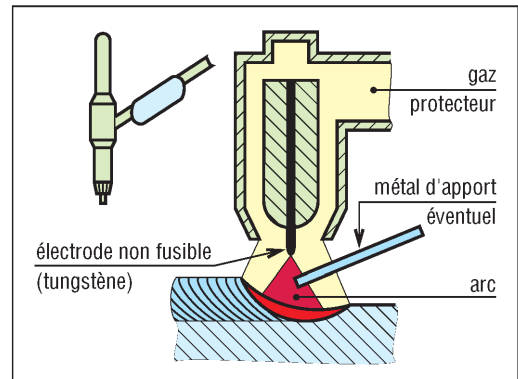
Apparenté au TIG, il utilise un arc étranglé dans une tuyère avec un gaz inerte. Le dard obtenu, très brillant et très chaud, permet à la fois le découpage (plus rapide que l'oxycoupage) et le soudage (notamment bout à bout en une seule passe avec des bords droits pour des épaisseurs de 3 à 10 mm).



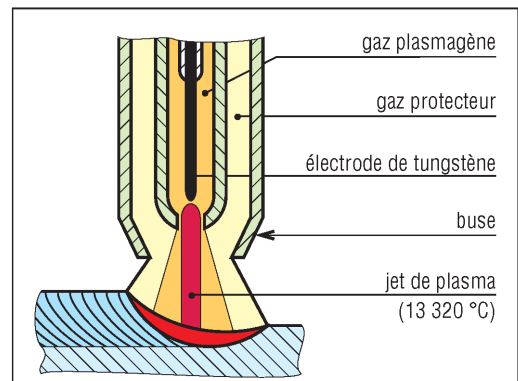
21. Principe du soudage à l'arc.



22. Principe des soudages MIG et MAG.



23. Principe du soudage TIG.



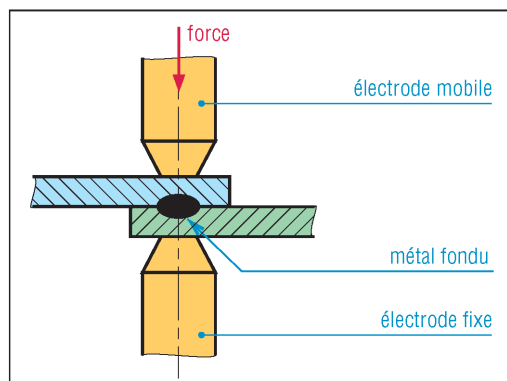
24. Principe du soudage au plasma.

2. Soudage par résistance

Les pièces à assembler sont maintenues en contact par un effort de compression puis soudées par recouvrement ou bout à bout sans métal d'apport. La fusion est provoquée par effet Joule : courant de forte intensité sous basse tension. Après coupure du courant, l'effort de compression, toujours appliqué, « forge » la soudure.

a) Soudage par points

Très utilisé en grande et petite série, rapide, il est réalisé entre deux électrodes. La fusion se produit à la frontière entre les deux pièces à souder.



25. Soudage par points.

b) Soudage à la molette

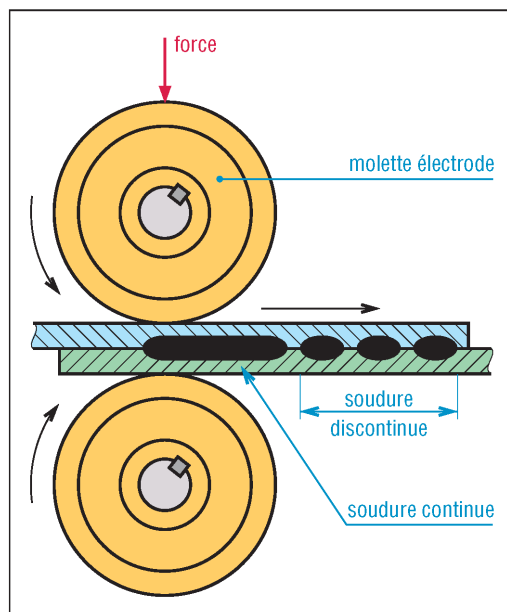
Variante du précédent permettant de réaliser des assemblages plans, cylindriques ou coniques et des soudures continues ou discontinues. Les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes.

c) Soudage par bossage

Autre variante permettant de souder plusieurs points en même temps. Les électrodes sont remplacées par des plateaux permettant de souder des formes en treillis, des tubes superposés et croisés...

d) Soudage en bout

Les pièces à souder, maintenues par des mâchoires, sont mises en contact puis chauffées soit par effet Joule (petites sections), soit par étincelage (par création de petits arcs électriques pour grosses sections). Après coupure du courant un refoulement « forge » la soudure.



26. Soudage à la molette.

3. Procédés divers

Ils sont nombreux : soudages par friction, par diffusion, par explosion, par ultrasons, par pression à froid... Les plus caractéristiques sont :

a) Soudage par faisceau d'électrons

Il se caractérise par la qualité de la soudure et est particulièrement intéressant pour le soudage des grosses épaisseurs, jusqu'à 250 mm. Le soudage est réalisé sous vide ou atmosphère et l'énergie nécessaire est obtenue par transformation en chaleur de l'énergie cinétique d'électrons venant frapper les matériaux à souder. La largeur de la zone fondue (cordon) est petite et les déformations engendrées très faibles. **Exemples** : pignons d'arbres de boîte de vitesses.

b) Soudage au laser (recommandations : NF EN 1011)

L'émission d'énergie produite sous forme lumineuse (photons) est récupérée puis amplifiée par des résonateurs optiques (miroirs à réflexion) puis focalisée afin d'obtenir une forte concentration d'énergie sur une très petite surface. Le soudage est limité aux petites épaisseurs, 10 mm maxi. Il est bien adapté au microsoudage (grande productivité) et est très flexible d'utilisation ; il permet le découpage et les traitements de surface. Cas : lasers CO₂ ; Nd : YAG.

VI - Indications sur le calcul des soudures

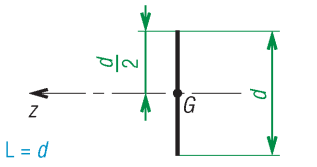
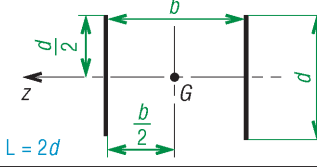
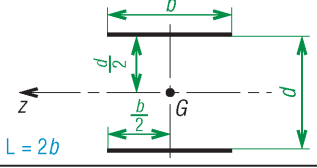
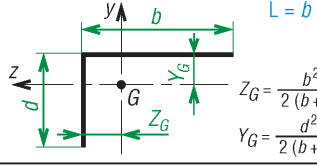
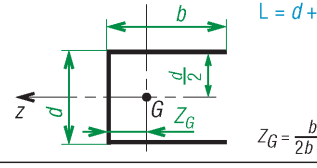
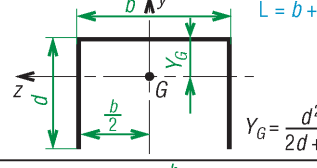
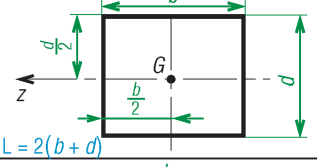
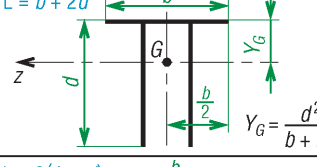
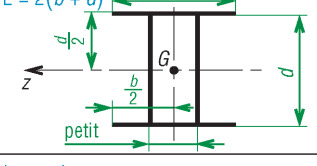
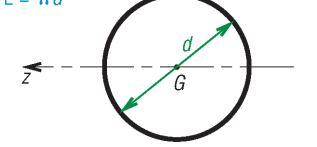
Seules sont abordées les notions générales faisant intervenir des calculs à partir de la résistance des matériaux classique et du critère de Von Mises. De nombreuses structures (constructions métalliques, appareils sous pression...) sont soumises à des législations et règles particulières (Eurocodes...) avec procédures de calculs, coefficients de sécurité normalisés.

1. Principaux cas

σ et τ : contraintes dans la plus petite section transversale du cordon ($a \times L$) ; σ_0 et τ_0 celles sur les bords ($h \times L$) ; σ_w contrainte de Von Mises ; σ_{adm} contrainte admissible du matériau.

| Cas | Exemples | Contraintes | |
|---|----------|----------------|---|
| | | Représentation | Formules |
| traction | | | $\sigma = \sigma_{\perp} = \sigma_w$ $(\tau_{\perp} = \tau_{\parallel} = 0)$ $\sigma_w = \frac{F}{a.L} \leq \sigma_{adm}$ |
| cisaillement | | | $\tau = \tau_{\parallel} = \frac{F}{a.L}$ $L = AB + CD$ $(\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = 0)$ $\sigma_w = \frac{\sqrt{3}.F}{a.L} \leq \sigma_{adm}$ |
| cisaillement avec traction | | | $\tau = \tau_0 = \tau_{\perp} = \frac{F}{a.\sqrt{2}.L}$ $L = AB + CD$ $(\tau_{\parallel} = 0)$ $\sigma_0 = \sigma = \sigma_{\perp} = \tau$ $\sigma_w = \frac{F.\sqrt{2}}{a.L} \leq \sigma_{adm}$ |
| torsion | | | $\tau = \tau_{\parallel} = \frac{M_t}{a.l_{UG} \frac{v}{v}}$ $(\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = 0)$ $\sigma_w = \frac{\sqrt{3}.M_t}{a.l_{UG} \frac{v}{v}} \leq \sigma_{adm}$ |
| flexion pure | | | $\sigma_0 = \sigma = \frac{M_f}{a.\sqrt{2}.l_{Uz} \frac{v}{v}}$ $\sigma = \sigma_{\perp} = \tau = \tau_0$ $\tau_{\parallel} = 0 ; \tau = \tau_{\perp}$ $\sigma_w = \frac{M_f.\sqrt{2}}{a.l_{Uz} \frac{v}{v}} \leq \sigma_{adm}$ |
| Contrainte équivalente de Von Mises (voir détails page 240) : $\sigma_w = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \sigma_{adm}$ | | | |

27. Principaux cas de charge et formules correspondantes (l_{UG} et l_{Uz} dont indiquées tableau page 239). K_f : si fatigue...

| Caractéristiques des cordons de soudures assimilés à une ligne | | |
|---|--|--|
| soudures | torsion | flexion |
|  <p>$L = d$</p> | $I_{UG} = \frac{d^3}{12}$ | $I_{UZ} = \frac{d^3}{12}$ |
|  <p>$L = 2d$</p> | $I_{UG} = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$ | $I_{UZ} = \frac{d^3}{6}$ |
|  <p>$L = 2b$</p> | $I_{UG} = \frac{b(3d^2 + b^2)}{6}$ | $I_{UZ} = \frac{bd^2}{2}$ |
|  <p>$L = b + d$</p> $Z_G = \frac{b^2}{2(b+d)}$ $Y_G = \frac{d^2}{2(b+d)}$ | $I_{UG} = \frac{(b+d)^4 - 6b^2d^2}{12(b+d)}$ | $\frac{I_{UZ}}{v} = \frac{4bd + d^2}{6}; \frac{I_{UZ}}{v} = \frac{d^2(4b+d)}{6(2b+d)}$ (sommet) (bas) |
|  <p>$L = d + 2b$</p> $Z_G = \frac{b^2}{2b+d}$ | $I_{UG} = \frac{(2b+d)^3}{12} - \frac{b^2(b+d)^2}{(2b+d)}$ | $I_{UZ} = \frac{d^2}{12}(6b+d)$ |
|  <p>$L = b + 2d$</p> $Y_G = \frac{d^2}{2d+b}$ | $I_{UG} = \frac{(b+2d)^3}{12} - \frac{d^2(b+d)^2}{(b+2d)}$ | $I_{UZ} = \frac{2d^3}{3} - 2d^2y_G + (b+2d)y_G^2$ |
|  <p>$L = 2(b+d)$</p> | $I_{UG} = \frac{(b+d)^3}{6}$ | $I_{UZ} = \frac{d^2}{6}(3b+d)$ |
|  <p>$L = b + 2d$</p> $Y_G = \frac{d^2}{b+2d}$ | $I_{UG} = \frac{(b+2d)^3}{12} - \frac{d^2(b+d)^2}{(b+2d)}$ | $I_{UZ} = \frac{2d^3}{3} - 2d^2y_G + (b+2d)y_G^2$ |
|  <p>$L = 2(b+d)$</p> <p>petit</p> | $I_{UG} = \frac{b^3 + 3bd^2 + d^3}{6}$ | $I_{UZ} = \frac{d^2}{6}(3b+d)$ |
|  <p>$L = \pi d$</p> | $I_{UG} = \frac{\pi d^3}{4}$ | $I_{UZ} = \frac{\pi d^3}{8}$ |

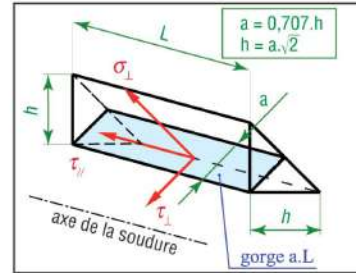
2. Contraintes dans un cordon de soudure

Les calculs de résistance utilisent les contraintes moyennes dans la plus petite section transversale du cordon ($a \cdot L$), même si le plan de rupture n'est pas ce plan.

La formule retenue ici (Eurocode3...) pour vérifier la résistance d'une soudure, basée sur le critère de Von Mises, prend en compte la résistance admissible de l'acier de base des tôles à souder (et pas celle du cordon) ; il existe aussi des formules simplifiées:

| | |
|--|---|
| Contraintes équivalentes de Von Mises : $\sigma_w = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \sigma_{adm} = \frac{Rr}{s}$ | |
| Eurocodes | $\sigma_w = \beta_w \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{Rr}{\gamma_{Mw}} = \frac{\text{résistance ultime acier de base (tôles)}}{\text{coefficient partiel de sécurité}}$ |
| | L'Eurocode 3 exige en plus : $\sigma_{\perp} \leq \frac{Rr}{\gamma_{Mw}}$ * $0,7 < \beta_w < 1,0$: coefficient dépendant de la nature de l'acier de base choisi. |
| σ_{\perp} | contrainte normale perpendiculaire au plan de la gorge ($a \times L$), fig. 28 |
| τ_{\perp} | contrainte de cisaillement dans le plan de la gorge et perpendiculaire à l'axe de la soudure |
| τ_{\parallel} | contrainte de cisaillement dans le plan de la gorge et parallèle à l'axe de la soudure |
| σ_w | contrainte normale équivalente (Von Mises) aux trois contraintes ci dessus dans la gorge ($a \times L$) |
| σ_{adm} | contrainte normale admissible ou limite de l'acier de base (tôles à souder) avec coefficients de sécurité |
| - * β_w : prend en compte la différence de résistance entre l'acier de base et l'acier du cordon (plus résistant sauf pour les aciers les plus résistants S420, S460...); voir tableau suivant. - s : coefficient global de sécurité (prenant en compte tous les autres). | |

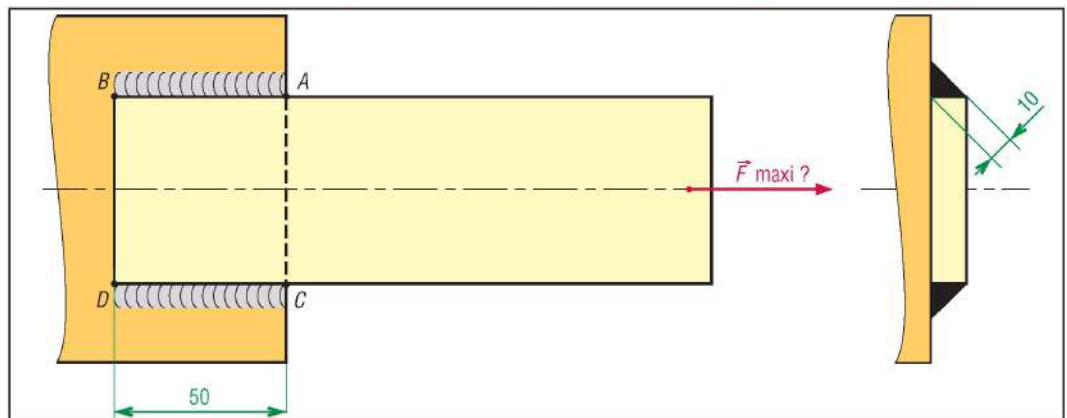
| acier de base | S235 | S275 | S355 | S420 | S460 |
|---|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| β_w | 0,80 | 0,85 | 0,90 | 1,00 | 1,00 |
| γ_{Mw} | 1,25 | 1,30 | 1,35 | 1,25 | 1,25 |
| Rr ou Rm ou f_u en N/mm ² | 340 à 360 | 370 à 430 | 470 à 510 | 520 | 550 |
| Re ou f_y N/mm ² | 235 3 à 16 mm | 275 3 à 16 mm | 355 3 à 16 mm | 420 16 à 40 mm | 460 16 à 40 mm |
| - Rr : résistance (ultime) à la rupture par traction de l'acier de base - Re : limite élastique (en traction) de l'acier de base | | | | | |



28. Contrainte dans une soudure d'angle.

Exemple 1 : soudures parallèles à la charge, soumises à du cisaillement pur.

Deux soudures d'angle AB et CD, chacune de longueur 50 mm, $a = 10$ mm, sont soumises à du cisaillement pur sous l'action de la charge F_{maxi} . Si pour l'acier de base (S275), on utilise un coefficient de sécurité complémentaire de 2, déterminer la charge maximale supportable.



29. Exemple 1. Cordons travaillant en cisaillement pur.

Contrainte de cisaillement dans le cordon (page 238) : $\tau_{\parallel} = \tau = \frac{F_{maxi}}{aL} = \frac{F_{maxi}}{10(50 + 50)} = \frac{F_{maxi}}{1000}$

Acier S275 : $\gamma_{Mw} = 1,3$ et $\beta_w = 0,85$; $Rr = 400$ MPa (donnée)

VonMises(p.238): $\sigma_w = \frac{\sqrt{3} \cdot F_{maxi}}{aL} = \frac{\sqrt{3} \cdot F_{maxi}}{1000} \leq \sigma_{adm} = \frac{Rr}{\beta_w \times \gamma_{Mw} \times s} = \frac{400}{0,85 \times 1,3 \times 2} \approx 181 \text{ MPa.}$

Résultats : $F_{maxi} = 181 \times 1000 / \sqrt{3} \approx 104\,500$ N et $\tau_{\parallel} = 104,5$ MPa.

3. Principe de calcul en torsion et flexion

Les moments quadratiques I_{u_G} et I_{u_Z} indiqués page 239 ne prennent pas en compte l'épaisseur des cordons ; chaque cordon est assimilé à un fil d'épaisseur égale à 1.

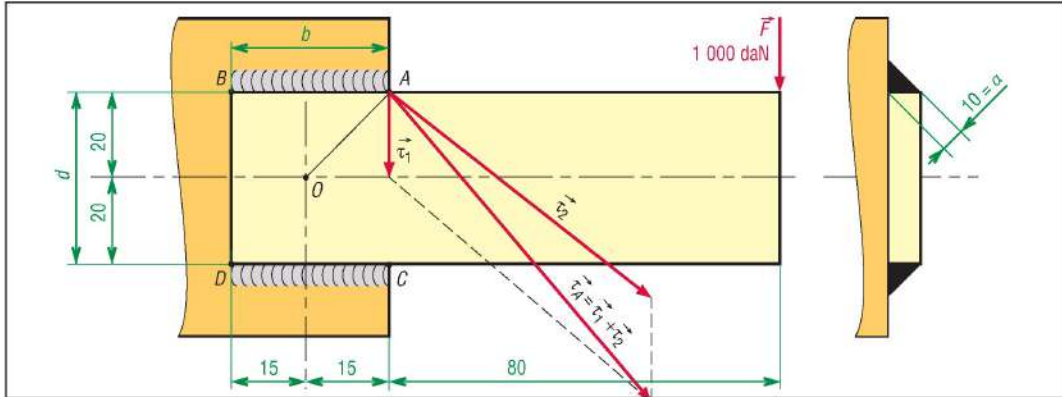
Les formules fournies page 238 tiennent compte de cette épaisseur en multipliant les valeurs de I_{u_G} et I_{u_Z} par a ou $0,707h$.

Torsion (point G) : $I_G = I_{u_G} \cdot a = I_{u_G} \cdot 0,707h$; **Flexion** (axe z) : $I_Z = I_{u_Z} \cdot a = I_{u_Z} \cdot 0,707h$

a) Exemple 2 : cordons supportant cisaillement avec traction plus torsion (fig. 30)

Les deux soudures d'angle AB et CD, longueur 30 mm et $a = 10$, sont soumises à une charge F de 1 000 daN, transversale et décalée, amenant à la fois cisaillement avec traction et torsion.

Déterminer la contrainte maximale exercée dans les cordons.



30. Exemple 2. (τ_2 perpendiculaire à OA). Angle θ entre τ_1 et τ_2 : $53,13^\circ$.

Le cisaillement avec traction créé par l'effort tranchant $T = F = 1\,000$ daN engendre les contraintes τ_1 et σ_1 . La torsion ($M_t = F \times (\text{distance entre } O \text{ et } \vec{F})$) autour du point O génère les contraintes de cisaillement (τ_2). L'étude de torsion montre que la contrainte est maximale en A.

Calculs préliminaires :

– moment de torsion : $M_t = (10\,000 \text{ N}) \times (80 + 15) = 950\,000 \text{ Nmm}$;

– distance V entre O et A : $V = OA = (15^2 + 20^2)^{1/2} = 25 \text{ mm}$;

– moment quadratique polaire (page 239) : $I_{u_G} = \frac{b(3d^3 + b^2)}{6} = \frac{30(3 \times 40^3 + 30^2)}{6} = 28\,500 \text{ mm}^3$;

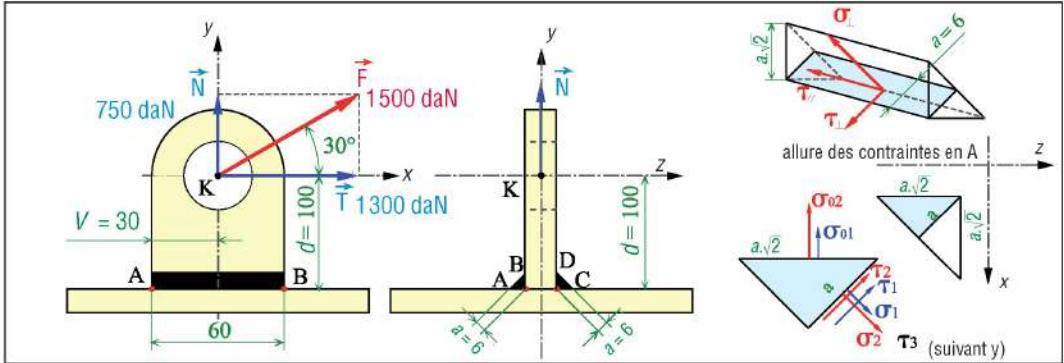
– angle θ entre les deux contraintes τ_1 et τ_2 : $\theta = \tan^{-1}(20/15) = 53,13^\circ$;

– contrainte de cisaillement résultante τ_A en A (fig 30) : $\vec{\tau}_A = \vec{\tau}_1 + \vec{\tau}_2 = \vec{\tau}_{1\perp} + \vec{\tau}_{2\perp} + \vec{\tau}_{2//}$.

| Contrainte maximale en A dans le cordon AB | | | |
|--|---|---|--|
| sollicitations | contraintes | valeurs dans ($a \times L$) | calculs et résultats |
| cisaillement avec traction $T = 1000 \text{ daN}$ | cisaillement τ_1 | $\tau_1 = \frac{T}{a \cdot \sqrt{2} \cdot L} = \tau_{1\perp}$ | $\tau_1 = \frac{10\,000 \text{ N}}{10 \cdot \sqrt{2} \cdot (30 + 30)} = 11,79 \text{ MPa}$ |
| | traction σ_1 | $\sigma_1 = \sigma_{\parallel} = \sigma_{1\perp} = \tau_1$ | $\sigma_1 = 11,79 \text{ MPa}$ |
| torsion $M_t = 950 \text{ Nm}$ | cisaillement τ_2 | $\tau_2 = \frac{M_t}{a \cdot I_{u_G} \cdot V}$ | $\tau_2 = \frac{950\,000 \times 25}{28\,500 \times 10} = 83,33 \text{ MPa}$ |
| | $\vec{\tau}_2 = \vec{\tau}_{2\perp} + \vec{\tau}_{2//}$ | $\tau_{2\perp} = \tau_2 \cos \theta$ $\tau_{2//} = \tau_2 \sin \theta$ | $\tau_{2\perp} = 83,33 \cos 53,13^\circ = 50 \text{ MPa}$ $\tau_{2//} = 83,33 \sin 53,13^\circ = 66,66 \text{ MPa}$ |
| contrainte équivalente de Von Mises en A | | $\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3((\tau_{1\perp} + \tau_{2\perp})^2 + \tau_{2//}^2)} = \sqrt{11,79^2 + 3 \times \tau_A^2}$ $\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{11,79^2 + 3((11,79 + 50)^2 + 66,66^2)} \approx 157,87 \text{ MPa}$ | |
| Résultats : contrainte équivalente maximale : $\sigma_{\text{Mises}} = 157,87 \text{ MPa}$ avec $\tau_A = \tau_{\text{max}} = 90,89 \text{ MPa}$ | | | |
| Remarques : les contraintes sont maximales en A et C ($\sigma_{\text{Mises}} = \sigma_{\text{civ}} = 157,87 \text{ MPa}$), avec $\tau_A = \tau_C$; en B et D elles sont minimales $\sigma_{\text{Mises}} = \sigma_{\text{civ}} = \sqrt{11,79^2 + 3((11,79 - 50)^2 + 66,66^2)} \approx 133,9 \text{ MPa}$ avec compensation entre $\tau_{2\perp}$ et $\tau_{1\perp}$; au milieu des deux cordons $\vec{\tau}_2 = \vec{\tau}_{2//}$ et $\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{11,79^2 + 3((11,79)^2 + 83,33^2)} = 146,25 \text{ MPa}$ | | | |

b) Exemple 3 : gousset en flexion simple et cisaillement plus traction (fig. 31)

Deux soudures d'angle parallèles AB, et CD, (symétrie x, y), maintiennent les deux plats du gousset proposé, longueur 80 mm et épaisseur a = 6 mm. Le gousset supporte en K la charge F de 1 500 daN inclinée de 30° par rapport à l'axe x, engendrant à la fois traction, cisaillement et flexion dans les cordons. Calculer la contrainte maximale exercée dans les cordons.



31. Exemple 3. gousset travaillent en flexion simple et cisaillement plus traction.

La projection de F sur x et y donne : $F \cos 30 \approx 1\,300$ daN et $N = F \sin 30 = 750$ daN. Dans les sections ($a \times L$) des deux cordons, l'effort T engendre à la fois de la flexion ($M_f = T \times d$) et du cisaillement (T) créant les contraintes τ_1, σ_1 et τ_3 (τ_3 supposée uniforme). L'effort N amène un phénomène de cisaillement avec traction créant les contraintes τ_2 et σ_2 . L'étude en flexion (T, $M_f \dots$) montre que les contraintes sont maximales en A et C extrémités des cordons opposées à T. Si, en A et C, il y a addition de deux tractions et des contraintes correspondantes (τ et σ) ; en B et D, il y a un phénomène de compression compensé par une traction.

Calculs préliminaires :

- distance entre les points (A et B) ou (C et D) et le plan neutre (« K, y, z ») : $V = 30$ mm
- moment fléchissant à l'encastrement : $M_f = T \times d = 13\,000 \text{ N} \times 100 \text{ mm} = 1\,300\,000 \text{ Nmm}$
- moment quadratique : $I_{uz} = \frac{d^3}{6} = \frac{(60+0)^3}{6} = \frac{120^3}{6} = 288\,000 \text{ mm}^3$ (table page 239) ;
- longueur totale des deux cordons : $L = 2 \times 60 = 120$ mm.

| Contraintes dans les deux cordons en A-C (formule page 238) | | | |
|---|-------------------------------|---|--|
| sollicitations | contraintes | valeurs dans ($a \times L$) | calculs et résultats |
| effort tranchant $T = 1\,300 \text{ daN}$ | cisaillement τ_3 | $\tau_3 = \frac{T}{aL} = \tau_{3y}$ | $\tau_3 = \frac{13\,000 \text{ N}}{6 \times 120} = 18,05 \text{ MPa}$ |
| flexion $M_f = 1\,300 \text{ Nm}$ | contrainte normale σ_2 | $\sigma_2 = \sigma_{02} = \frac{M_f}{a\sqrt{2} \cdot I_{uz}}$ | $\sigma_2 = \frac{1\,300\,000 \times 30}{6 \times \sqrt{2} \times 288\,000} = 15,95 \text{ MPa}$ |
| | cisaillement τ_2 | $\tau_2 = \tau_{02} = \tau_{2L} = \sigma_2 = \sigma_{2L}$ | $\tau_2 = 15,95 \text{ MPa}$ |
| cisaillement avec traction $N = 750 \text{ daN}$ | cisaillement τ_1 | $\tau_1 = \tau_{01} = \tau_{1L} = \frac{N}{hL} = \frac{N}{a\sqrt{2} \cdot L}$ | $\tau_1 = \frac{7\,500 \text{ N}}{6 \cdot \sqrt{2} \cdot 120} = 7,37 \text{ MPa}$ |
| | traction σ_1 | $\sigma_1 = \sigma_{01} = \sigma_{1L} = \tau_1$ | $\sigma_1 = 7,37 \text{ MPa}$ |
| contrainte équivalente de Von Mises en σ_w | | $\sigma_w = \sqrt{\sigma_1^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_2^2)} = \sqrt{(7,37 + 15,95)^2 + 3((7,37 + 15,95)^2 + 18,05^2)}$ $\sigma_w = \sqrt{(7,37 + 15,95)^2 + 3((7,37 + 15,95)^2 + 18,05^2)} = 56,14 \text{ MPa}$ | |
| Résultats : contraintes équivalentes maximales : $\sigma_{Aw} = \sigma_{Cw} = 56,14 \text{ MPa} = -\sigma_{Bw} = -\sigma_{Dw}$ | | | |
| Remarques : contraintes de traction en A et C et de compression en B et D ; au niveau du plan neutre : $\sigma_2 = \tau_2 = 0$ et $\sigma_w = \sqrt{(7,37 + 0)^2 + 3((7,37 + 0)^2 + 18,05^2)} = 34,36 \text{ MPa}$ | | | |

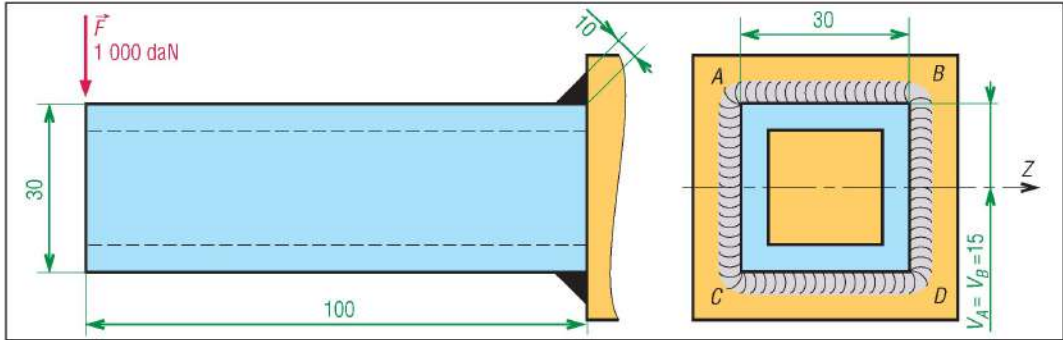
c) Exemple 4 : poutre encastree en flexion simple (fig.32)

Les quatre soudures d'angle en carré AB, BC, CD et DA de longueur 30 mm et d'épaisseur a = 10 mm, sont soumises à une charge F de 1 000 daN, transversale et décalée, engendrent cisaillement et flexion. Calculer la contrainte maximale exercée dans les cordons. L'étude en flexion de la poutre (diagrammes T et $M_f \dots$) montre que les contraintes sont maximales en A, B, C et D. L'effort tranchant T donne un cisaillement dans les cordons verticaux

AC et BD (contrainte τ_1 supposée uniforme) et du cisaillement avec traction dans les cordons horizontaux AB et CD (contraintes τ_3 et σ_3). Le moment de flexion à l'encastrement M_f engendre des contraintes τ_2 et σ_2 dans les sections ($a \times L$) des cordons.

Calculs préliminaires :

- Distance entre les points (A et B) ou (C et D) et le plan neutre (« axe z ») : $V = 15$ mm.
- Moment fléchissant à l'encastrement : $M_f = (10\,000\text{ N}) \times (100\text{ mm}) = 1\,000\,000\text{ Nmm}$.
- Moment quadratique : $I_{u_z} = \frac{d^2(3b+d)}{6} = \frac{30^2(3 \times 30 + 30)}{6} = 18\,000\text{ mm}^3$ (table page 239).



32. Exemple 4.

| Contraintes maximales dans les cordons en A-B-C-D (formules page 238) | | | |
|--|-------------------------------|--|---|
| Sollicitations | contraintes | valeurs dans ($a \times L$) | calculs et résultats |
| cisaillement pur T dans AC et BD | cisaillement τ_1 | $\tau_1 = \frac{T}{a.L} = \tau_{10}$ | $\tau_1 = \frac{10\,000\text{ N}}{10 \times 30 \times 4} = 8,33\text{ MPa}$ |
| flexion $M_f = 1\,000\text{ Nm}$ | contrainte normale σ_2 | $\sigma_2 = \sigma_{02} = \frac{M_f}{a\sqrt{2}.I_{u_z}} = \sigma_{21}$ | $\sigma = \frac{1\,000\,000 \times 15}{18\,000 \times 10 \times \sqrt{2}} = 58,93\text{ MPa}$ |
| | cisaillement τ_2 | $\tau_2 = \tau_0 = \tau_{21} = \sigma_2$ | $\tau_2 = 58,93\text{ MPa}$ |
| cisaillement avec traction T dans AB et CD | cisaillement τ_3 | $\tau_3 = \tau_{03} = \tau_{31} = \frac{T}{hL} = \frac{T}{a\sqrt{2}.L}$ | $\tau_1 = \frac{10\,000\text{ N}}{10 \cdot \sqrt{2} \cdot 120} = 5,89\text{ MPa}$ |
| | traction σ_3 | $\sigma_3 = \sigma_{03} = \sigma_{31} = \tau_3$ | $\sigma_3 = 5,89\text{ MPa}$ |
| cordons verticaux AC et BD contrainte équivalente σ_{eq1} | | $\sigma_w = \sqrt{\sigma_2^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_2^2)} = \sqrt{58,93^2 + 3(8,33^2 + 58,93^2)} = 118,73\text{ MPa}$ Résultats : $\sigma_{A01} = \sigma_{B01} = 118,73\text{ MPa} = -\sigma_{C01} = -\sigma_{D01}$ | |
| Remarques : depuis A et B, les contraintes diminuent en allant vers le plan neutre (axe z) pour atteindre : $\sigma_{0z} = \sqrt{0^2 + 3(0^2 + 8,33^2)} = 14,43\text{ MPa}$ (avec $\sigma_2 = \tau_2 = 0$) ; même remarque pour C et D. | | | |
| cordons horizontaux AB et CD contrainte équivalente σ_{eq2} « τ_2 et τ_3 de signes opposés » | | $\sigma_w = \sqrt{(\sigma_2 + \sigma_3)^2 + 3((\tau_2 - \tau_3)^2 + 0^2)}$ $= \sqrt{(58,93 + 5,89)^2 + 3(58,93^2 - 5,89^2)} = 120,48\text{ MPa}$ Résultats : $\sigma_{A02} = \sigma_{B02} = 112,43\text{ MPa} = -\sigma_{C02} = -\sigma_{D02}$ | |
| Remarques : tous les points entre A et B ont même contrainte équivalente $\sigma_{eq2} = \sigma_{A02} = \sigma_{B02} = 112,43\text{ MPa}$ (traction) ; même remarque entre C et D (compression) | | | |

VII - Tolérances générales NF EN ISO 13920

Les extraits indiqués s'appliquent aux assemblages et structures soudés et sont basés sur la précision courante des ateliers.

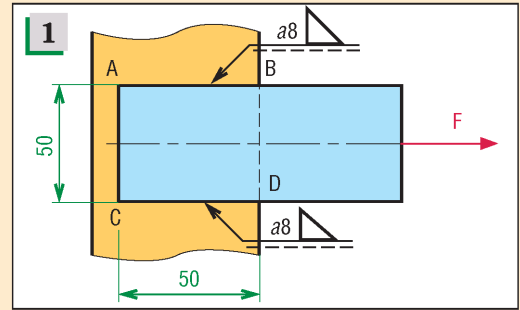
Exemple d'indication sur les dessins (près ou dans le cartouche) : « EN ISO 13920-B »

| Tolérances générales relatives aux constructions soudées | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------|------------|-------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------------------------|---------------|-----------|
| classe de tolérance | L. dimensions linéaires en mm | | | | | | | | angles : sur plus petit côté | | |
| | 2 à 30 | > 30 à 120 | > 120 à 400 | > 400 à 1 000 | > 1 000 à 2 000 | > 2 000 à 4 000 | > 4 000 à 8 000 | > 8 000 à 12 000 | 0 à 400 | > 400 à 1 000 | > 1 000 |
| | tolérances ΔL en mm | | | | | | | | $\Delta \alpha$ (degrés, minutes) | | |
| A | ± 1 | ± 1 | ± 1 | ± 2 | ± 3 | ± 4 | ± 5 | ± 6 | $\pm 20'$ | $\pm 15'$ | $\pm 10'$ |
| B | ± 1 | ± 2 | ± 2 | ± 3 | ± 4 | ± 6 | ± 8 | ± 10 | $\pm 45'$ | $\pm 30'$ | $\pm 20'$ |
| C | ± 1 | ± 3 | ± 4 | ± 6 | ± 8 | ± 11 | ± 14 | ± 18 | ± 1 | $\pm 45'$ | $\pm 30'$ |
| D | ± 1 | ± 4 | ± 7 | ± 9 | ± 12 | ± 16 | ± 21 | ± 27 | $\pm 1\ 30'$ | $\pm 1\ 15'$ | ± 1 |

VIII - Exercices

Exercice 1

L'assemblage proposé est réalisé à partir de deux soudures d'angle AB et CD parallèles à la charge F . Pour quelle valeur de F la contrainte de cisaillement dans le cordon est égale à 8 daN/mm^2 ?

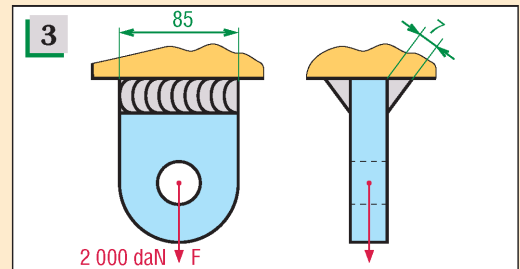


Exercice 2

Refaire l'exercice 1 avec trois soudures d'angle AB , AC et CD de même épaisseur $a = 8$.

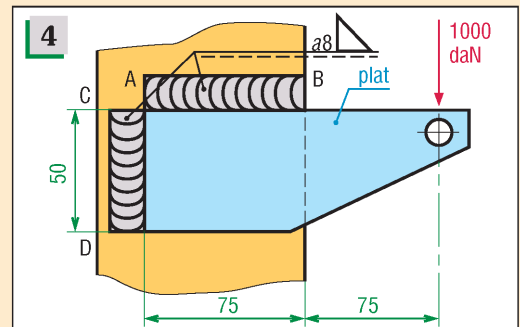
Exercice 3

Pour l'assemblage proposé, déterminer la contrainte de cisaillement dans les deux cordons. En déduire la contrainte équivalente de Von Mises σ_w .



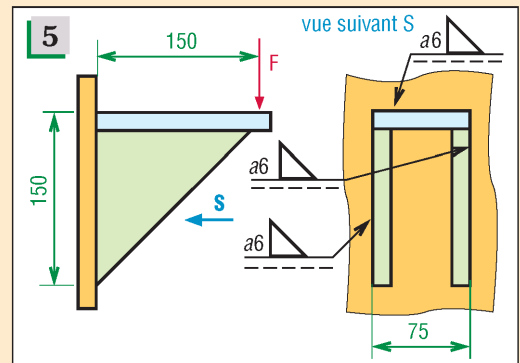
Exercice 4

L'assemblage proposé est réalisé à partir de deux soudures d'angle AB et CD de même épaisseur 8 mm . Déterminer la contrainte de cisaillement maximale dans les cordons. En déduire la contrainte équivalente σ_w .



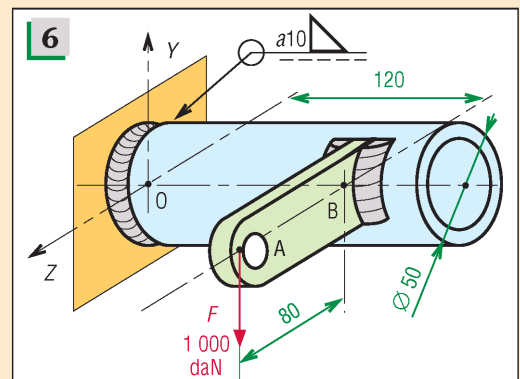
Exercice 5

La console proposée est assemblée sur un bâti par trois soudures d'angle de même épaisseur (6) formant un U. Quelle est la charge maximale, F étant située dans le plan de symétrie, supportable si la contrainte équivalente maximale σ_w est inférieure ou égale à 120 MPa ?



Exercice 6

L'assemblage proposé se compose d'un tube de diamètre extérieure 50 mm soudé sur le bâti par une soudure d'angle périphérique d'épaisseur 10 mm . La charge agit sur une patte soudée perpendiculairement au tube. Déterminer la contrainte maximale exercée dans le cordon.



22

SYSTÈMES DE LIAISON ARBRES/MOYEUX

OBJECTIFS

- Décrire les principaux dispositifs utilisés : goupilles, clavettes, cannelures, éléments biconiques, frettage, cônes.
- Indiquer les principales dimensions normalisées.

Ces systèmes permettent de lier en rotation un arbre avec un moyeu ou logement (exemples : poulie, roue dentée) et, par là, de transmettre des efforts (couple...).

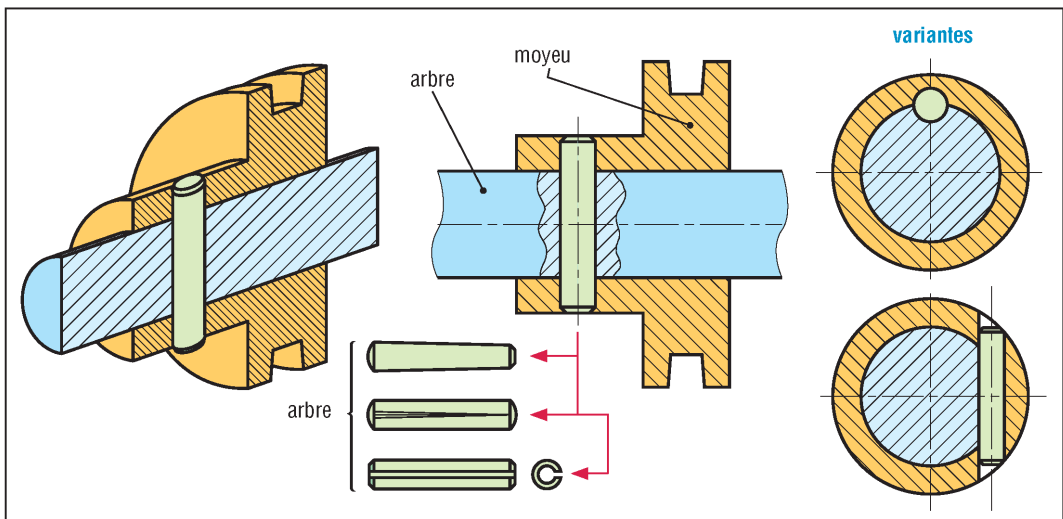
Pour le calcul des arbres de transmission utiliser les normes NF E 22-057-1 et 2 avec exemples FD E 22-057-2. Bouts d'arbres : NF E 22-050 a 056.

I - Liaisons par goupilles

Elles conviennent aux assemblages simples et économiques sous couples modérées. La goupille peut faire office de pièce de sécurité, seule pièce qui casse en cas de surcharge.

En fonctionnement la goupille ne doit pas pouvoir s'échapper ; l'immobilisation doit être suffisante : à cette fin, utiliser des goupilles cannelées, coniques ou élastiques (voir dimensions chapitre 20 : éléments d'assemblage).

Inconvénient : le trou de perçage amène des concentrations de contraintes dans l'arbre.



1. Utilisation des goupilles (voir pages 212 et 213).

II - Liaisons par clavettes

1. Clavettes parallèles

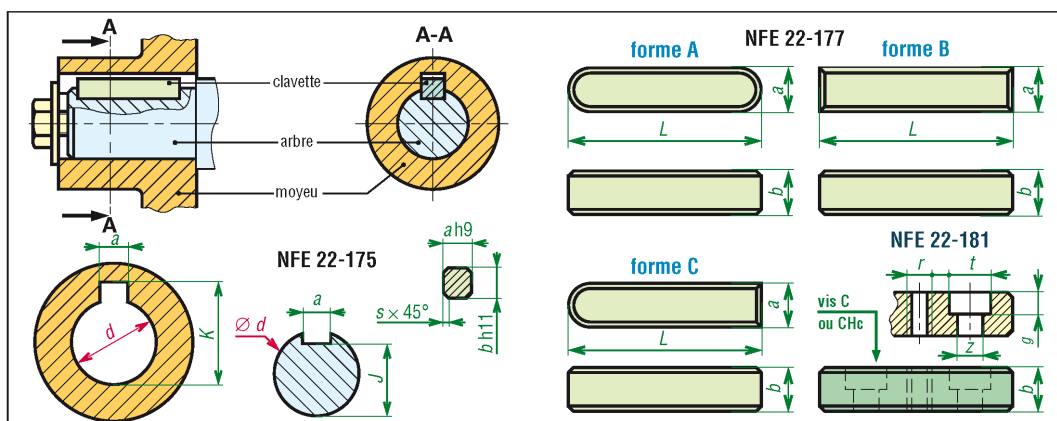
Simple, économique, elles sont souvent utilisées. Le couple transmissible, bien que plus élevé qu'avec les goupilles, reste limité. Aux couples élevés préférer les cannelures. Elles peuvent être utilisées comme organe de sécurité, seule pièce qui casse en cas de surcharge. Matériaux : aciers - $R_r \geq 600$ MPa.

Inconvénient : les rainures affaiblissent les arbres et engendrent des concentrations de contraintes.

Exemple de désignation : clavette parallèle, forme B, 14 x 9 x 50, NFE 22-177.

Clavetage libre de 14 x 9, NFE 22-175.

| Tolérances | Type de clavetage | | |
|------------------------------|---------------------|-----------|-----------|
| | Libre | Normal | Serré |
| a_{arbre} | H9 | N9 | P9 |
| a_{moyeu} | D10 | JS9 | P9 |
| a_{clavette} | h9 | h9 | h9 |
| Tolérances (μm) | | J | K |
| Série normale | $6 \leq d \leq 22$ | 0 -100 | +100 0 |
| | $22 < d \leq 130$ | 0 -200 | +200 0 |
| Série mince | $12 \leq d \leq 50$ | 0 -100 | +100 0 |
| | $50 < d \leq 150$ | 0 -200 | +200 0 |



2. Clavettes parallèles : principales dimensions normalisées.

| Clavettes parallèles : principales dimensions normalisées | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|----|------|-------|-------|----------|-------------|-------|-------|----------------------------|-----|-----|------|-----|
| de - à (inclus) | série normale | | | | | | série mince | | | cas d'une fixation par vis | | | | |
| | a | b | s | J | K | L | b* | J* | K* | vis | t | z | g | r |
| 6 à 8 | 2 | 2 | 0,16 | d-1,2 | d+1 | 6 à 20 | | | | | | | | |
| 9 à 10 | 3 | 3 | à | d-1,8 | d+1,4 | 6 à 36 | | | | | | | | |
| 11 à 12 | 4 | 4 | 0,25 | d-2,5 | d+1,8 | 8 à 45 | | | | | | | | |
| 13 à 17 | 5 | 5 | 0,25 | d-3 | d+2,3 | 10 à 56 | 3 | d-1,8 | d+1,4 | | | | | |
| 18 à 22 | 6 | 6 | à | d-3,5 | d+2,8 | 14 à 70 | 4 | d-2,5 | d+1,8 | M2,5-6 | 5 | 2,9 | 3 | 2,5 |
| 23 à 30 | 8 | 7 | 0,40 | d-4 | d+3,3 | 18 à 90 | 5 | d-3 | d+2,3 | M3-8 | 6,5 | 3,4 | 3,5 | 3 |
| 31 à 38 | 10 | 8 | 0,40 | d-5 | d+3,3 | 22 à 110 | 6 | d-3,5 | d+2,8 | M4-10 | 8 | 4,5 | 4,5 | 4 |
| 39 à 44 | 12 | 8 | à | d-5 | d+3,3 | 28 à 140 | 6 | d-3,5 | d+2,8 | M5-10 | 10 | 5,5 | 5,5 | 5 |
| 45 à 50 | 14 | 9 | 0,60 | d-5,5 | d+3,8 | 36 à 160 | 6 | d-3,5 | d+2,8 | M6-10 | 12 | 6,6 | 6,5 | 6 |
| 51 à 58 | 16 | 10 | 0,60 | d-6 | d+4,3 | 45 à 180 | 7 | d-4 | d+3,3 | M6-10 | 12 | 6,6 | 6,5 | 6 |
| 59 à 65 | 18 | 11 | à | d-7 | d+4,4 | 50 à 200 | 7 | d-4 | d+3,3 | M8-12 | 16 | 9 | 8,5 | 8 |
| 66 à 75 | 20 | 12 | 0,80 | d-7,5 | d+4,9 | 56 à 220 | 8 | d-5 | d+3,3 | M8-12 | 16 | 9 | 8,5 | 8 |
| 76 à 85 | 22 | 14 | 1 | d-9 | d+5,4 | 63 à 250 | 9 | d-5,5 | d+3,8 | M10-12 | 20 | 11 | 10,5 | 10 |
| 86 à 95 | 25 | 14 | à | d-9 | d+5,4 | 70 à 280 | 9 | d-5,5 | d+3,8 | M10-12 | 20 | 11 | 10,5 | 10 |
| 96 à 110 | 28 | 16 | 1,2 | d-10 | d+6,4 | 80 à 320 | 10 | d-6 | d+4,3 | M10-16 | 20 | 11 | 10,5 | 10 |

2. Autres familles de clavettes

- Clavettes inclinées - NFE 22-176 et 178 : pour clavetage forcé ; pente de 1 % pour clavette et moyeu ; variante avec talon ; formes A-B-C ; séries normales et minces.

- Clavettes disques - NFE 22-179 : pour petits diamètres ($d < 65$) et arbres coniques.

- Clavettes tangentielles - NFE 22-182 : clavetage avec 2 clavettes superposées de même pente.

III – Liaisons par cannelures et dentelures

1. Cannelures à flancs parallèles

Les plus anciennes, elles sont de plus en plus souvent remplacées par les cannelures en développante plus résistantes et moins bruyantes. Cependant, du fait de leur simplicité, elles sont encore utilisées dans les petites séries. Elles ne conviennent pas aux grandes vitesses de rotation.

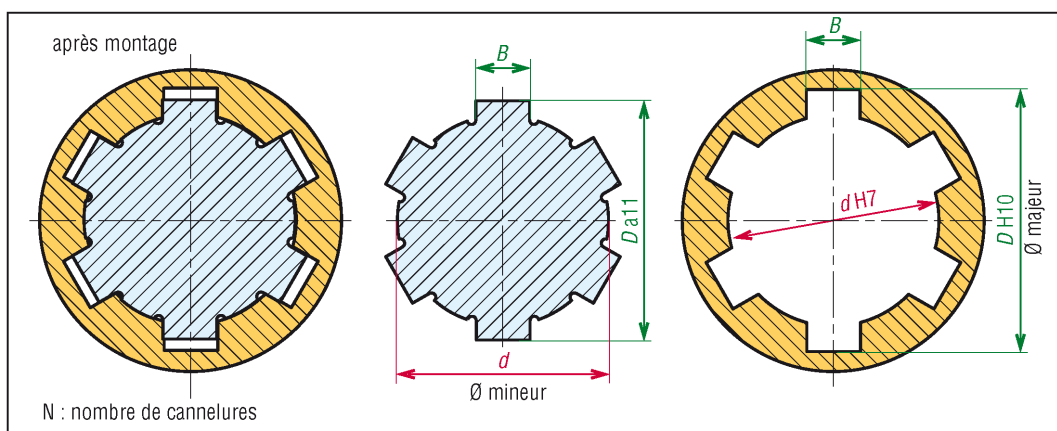
Variantes : une série légère, plutôt pour assemblages fixes ; une série moyenne, plutôt pour assemblages glissants sous charges.

Pour les séries légères et moyennes, le centrage de l'arbre est réalisé sur le diamètre d (centrage intérieur), tolérance de symétrie sur B-IT7.

Exemple de désignation : cas de 8 cannelures, $N = 8$, $d = 36$ et $D = 42$.

Moyeu cannelé à flancs parallèles de $8 \times 36 \times 42$, NF E 22-131.

Arbre cannelé à flancs parallèles de $8 \times 36 \times 42$, NF E 22-131.



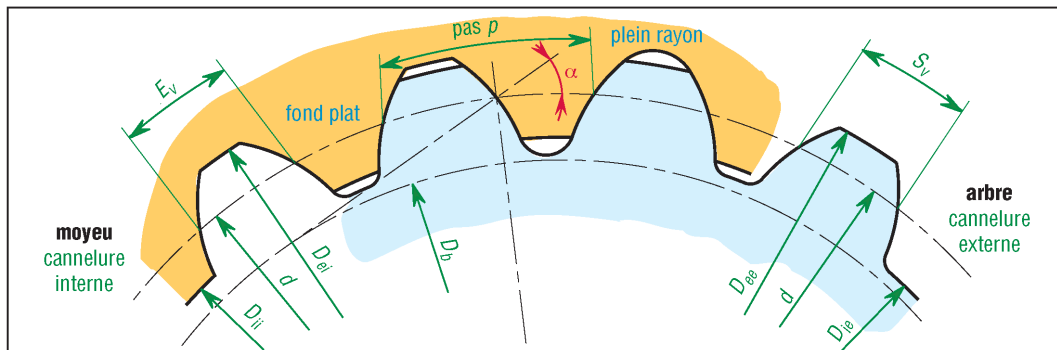
3. Cannelures à flancs parallèles NF E 22-131.

| Cannelures à flancs parallèles : principales dimensions normalisées (NF E 22-131) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| série légère | | | | | | | | série moyenne | | | | | | | | | | | | |
| d | D | N | B | d | D | N | B | d | D | N | B | d | D | N | B | d | D | N | B | |
| 23 | 26 | 6 | 6 | 56 | 62 | 8 | 10 | 11 | 14 | 6 | 3 | 28 | 34 | 6 | 7 | 62 | 72 | 8 | 12 | |
| 26 | 30 | 6 | 6 | 62 | 68 | 8 | 12 | 13 | 16 | 6 | 3,5 | 32 | 38 | 8 | 6 | 72 | 82 | 10 | 12 | |
| 28 | 32 | 6 | 7 | 72 | 78 | 10 | 12 | 16 | 20 | 6 | 4 | 36 | 42 | 8 | 7 | 82 | 92 | 10 | 12 | |
| 32 | 36 | 8 | 6 | 82 | 88 | 10 | 12 | 18 | 22 | 6 | 5 | 42 | 48 | 8 | 8 | 92 | 102 | 10 | 14 | |
| 36 | 40 | 8 | 7 | 92 | 98 | 10 | 14 | 21 | 25 | 6 | 5 | 46 | 54 | 8 | 9 | 102 | 112 | 10 | 16 | |
| 42 | 46 | 8 | 8 | 102 | 108 | 10 | 16 | 23 | 28 | 6 | 6 | 52 | 60 | 8 | 10 | 112 | 125 | 10 | 18 | |
| 46 | 50 | 8 | 9 | 112 | 120 | 10 | 18 | 26 | 32 | 6 | 6 | 56 | 65 | 8 | 10 | | | | | |
| 52 | 58 | 8 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| tolérances de l'arbre | | | | d | D | | B | tolérances du moyeu | | | | d | D | | B | | | | | |
| | glissant | | | f7 | a11 | | d10 | | non traité | | | | H7 | H10 | | H9 | | | | |
| | fixe | | | h7 | a11 | | h10 | | traité après brochage | | | | H7 | H10 | | H11 | | | | |
| | glissant juste | | | g7 | a11 | | f9 | | | | | | | | | | | | | |

2. Cannelures à flancs en développante, de cercle

Elles sont une application indirecte des engrenages en développante (voir chapitre 29 : engrenages). Elles permettent de plus grandes vitesses de rotation et sont plus silencieuses que les précédentes.

Variantes : cannelures à fond plat, pour pièces minces, et cannelures à plein rayon, plus grande résistance à la fatigue. Quatre classes de tolérance (4-5-6-7) et six classes d'ajustement : serré H/k et H/js ; avec jeu incertain H/h ; avec jeu H/f, H/e et H/d.



4. Cannelures en développante de cercle : NF ISO 4156-1 à 3 (E 22-144-1 à 3) et NFE 22-141 et 142.

| Normes | NF ISO 4156-1 à 3 classées E22-144-1 à 3 | | | | NF E22-141 et NF E22-142 | | |
|----------------|--|-----------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--|-------------|
| | 30° fond plat | 30° plein rayon | 37,5° plein rayon | 45° plein rayon | 20° fond plat | 20° plein rayon | |
| $D_{ee\ maxi}$ | $d + m$ | $d + m$ | $d + 0,9 m$ | $d + 0,8 m$ | $D_{ei} = A$ | $d + 2 m$ | $d + 2,3 m$ |
| $D_{ei\ mini}$ | $d + 1,5 m$ | $d + 1,8 m$ | $d + 1,4 m$ | $d + 1,2 m$ | D_{ji} | d | d |
| | $m \leq 0,75$ | | $0,75 < m < 2$ | $m \leq 2$ | D_{ie} | $d - 0,4 m$ | $d - 0,4 m$ |
| $D_{ee\ mini}$ | $D_{ee\ maxi} - IT10$ | | $D_{ee\ maxi} - IT11$ | $D_{ee\ maxi} - IT12$ | | | |
| $D_{ji\ maxi}$ | $D_{ji\ mini} + IT10$ | | $D_{ji\ mini} + IT11$ | $D_{ji\ mini} + IT12$ | D_{ee} | $d + 1,8 m$ | $d + 1,8 m$ |
| Modules | 0,5-0,75-1,00-1,25-1,75-2-2,5-3-4-5-6-8-10 | | | | Modules | 0,5-(0,75)-1,00-1,25-1,667-2,5-(3,75)-5-(7,5)-10 | |

| Caractéristiques | |
|-------------------|-----------------------|
| Diamètre primitif | $d = mZ$ |
| Pas | p |
| Module | $m = pas/\pi$ |
| Angle de pression | α |
| Nombre de dent | Z |
| Diamètre de base | $d_b = d \cos \alpha$ |

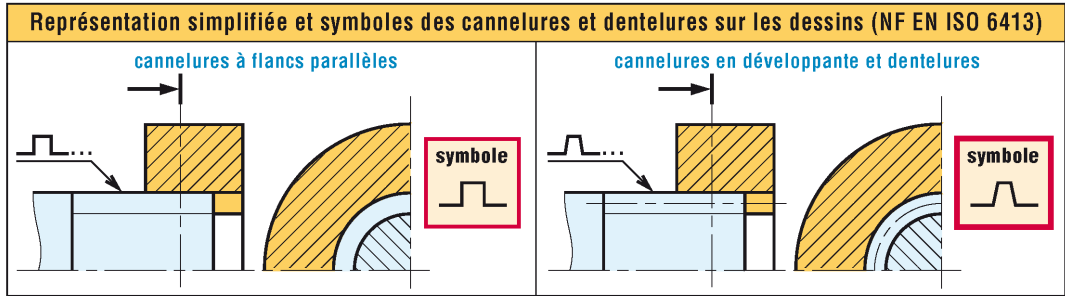
| Paramètres | | |
|-------------------|--|--------------------------------|
| Cannelure externe | diamètre majeur diamètre mineur épaisseur circulaire effective | D_{ee} D_{e^e} S_v |
| cannelure interne | diamètre majeur diamètre mineur intervalle circulaire effectif | D_{ei} D_{i^e} E_v |

| $\alpha = 30^\circ - m = 0,5 - E_{v\ mini} = S_{v\ maxi} = 0,785$ | | | | | | | | $\alpha = 30^\circ - m = 1 - E_{v\ mini} = S_{v\ maxi} = 1,571$ | | | | | | | |
|---|------|---------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------------------|-------------------------|---|-------|---------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------------------|-------------------------|
| Z | d mm | D_{ei} maxi plein rayon | D_{ei} maxi fond plat | D_{ji} mini | D_{ee} maxi | D_{ie} mini plein rayon | D_{ie} mini fond plat | Z | d mm | D_{ei} maxi plein rayon | D_{ei} maxi fond plat | D_{ji} mini | D_{ee} maxi | D_{ie} mini plein rayon | D_{ie} mini fond plat |
| 6 | 3 | 4,06 | 3,91 | 2,72 | 3,50 | 1,94 | 2,09 | 6 | 6,00 | 8,00 | 7,70 | 5,43 | 7,00 | 4,00 | 4,30 |
| 8 | 4 | 5,07 | 4,92 | 3,66 | 4,50 | 2,93 | 3,08 | 8 | 8,00 | 10,01 | 9,71 | 7,31 | 9,00 | 5,99 | 6,29 |
| 10 | 5 | 6,07 | 5,92 | 4,62 | 5,50 | 3,93 | 4,08 | 10 | 10,00 | 12,01 | 11,71 | 9,24 | 11,00 | 7,99 | 8,29 |
| 12 | 6 | 7,07 | 6,92 | 5,60 | 6,80 | 4,93 | 5,08 | 12 | 12,00 | 14,02 | 13,72 | 11,20 | 13,00 | 9,98 | 10,28 |
| 15 | 7,5 | 8,58 | 8,43 | 7,08 | 8,00 | 6,42 | 6,57 | 15 | 15,00 | 17,02 | 16,72 | 14,16 | 16,00 | 12,98 | 13,28 |
| 18 | 9 | 10,08 | 9,93 | 8,56 | 9,50 | 7,92 | 8,07 | 18 | 18,00 | 20,03 | 19,73 | 17,13 | 19,00 | 15,97 | 16,27 |
| 20 | 10 | 11,08 | 10,93 | 9,56 | 10,50 | 8,92 | 9,07 | 20 | 20,00 | 22,03 | 21,73 | 19,11 | 21,00 | 17,97 | 18,27 |
| 22 | 11 | 12,09 | 11,94 | 10,55 | 11,50 | 9,91 | 10,06 | 22 | 22,00 | 24,03 | 23,73 | 21,10 | 23,00 | 19,97 | 20,27 |
| 25 | 12,5 | 13,59 | 13,44 | 12,05 | 13,00 | 11,41 | 11,56 | 25 | 25,00 | 27,04 | 26,74 | 24,09 | 26,00 | 22,96 | 23,26 |
| 28 | 14 | 15,09 | 14,94 | 13,54 | 14,50 | 12,91 | 13,06 | 30 | 30,00 | 32,04 | 31,74 | 29,07 | 31,00 | 27,96 | 28,26 |
| 30 | 15 | 16,09 | 15,94 | 14,54 | 15,50 | 13,91 | 14,06 | 35 | 55,00 | 37,05 | 36,75 | 34,06 | 36,00 | 32,95 | 33,25 |
| 35 | 17,5 | 18,60 | 18,45 | 17,09 | 18,00 | 16,41 | 16,55 | 40 | 40,00 | 42,05 | 41,75 | 39,06 | 41,00 | 37,95 | 38,25 |

| $\alpha = 30^\circ - m = 1,25 - E_{v\ mini} = S_{v\ maxi} = 1,963$ | | | | | | | | $\alpha = 30^\circ - m = 1,75 - E_{v\ mini} = S_{v\ maxi} = 2,749$ | | | | | | | |
|--|-------|---------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------------------|-------------------------|--|-------|---------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------------------|-------------------------|
| Z | d mm | D_{ei} maxi plein rayon | D_{ei} maxi fond plat | D_{ji} mini | D_{ee} maxi | D_{ie} mini plein rayon | D_{ie} mini fond plat | Z | d mm | D_{ei} maxi plein rayon | D_{ei} maxi fond plat | D_{ji} mini | D_{ee} maxi | D_{ie} mini plein rayon | D_{ie} mini fond plat |
| 6 | 7,50 | 9,97 | 9,59 | 6,79 | 8,75 | 5,04 | 5,41 | 6 | 10,50 | 13,89 | 13,37 | 9,50 | 12,25 | 7,11 | 7,63 |
| 8 | 10,00 | 12,47 | 12,10 | 9,14 | 11,25 | 7,53 | 7,90 | 8 | 14,00 | 17,40 | 16,88 | 12,79 | 15,75 | 10,60 | 11,12 |
| 10 | 12,50 | 14,98 | 14,69 | 11,55 | 13,75 | 10,02 | 10,40 | 10 | 17,50 | 20,91 | 20,38 | 16,17 | 19,25 | 14,09 | 14,62 |
| 12 | 15,00 | 17,48 | 17,11 | 14,00 | 16,25 | 12,52 | 12,89 | 12 | 21,00 | 24,41 | 23,89 | 19,60 | 22,75 | 17,59 | 18,11 |
| 15 | 18,75 | 21,24 | 20,87 | 17,69 | 20,00 | 16,26 | 16,63 | 15 | 26,25 | 29,67 | 29,14 | 24,77 | 28,00 | 22,83 | 23,36 |
| 18 | 22,50 | 25,00 | 24,62 | 21,41 | 23,75 | 20,00 | 20,38 | 18 | 31,50 | 34,93 | 34,40 | 29,97 | 33,25 | 28,07 | 28,60 |
| 20 | 25,00 | 27,50 | 27,12 | 23,86 | 26,25 | 22,50 | 22,88 | 20 | 35,00 | 38,43 | 37,90 | 33,45 | 36,75 | 31,57 | 32,10 |
| 22 | 27,50 | 30,00 | 29,63 | 26,38 | 28,75 | 25,00 | 25,37 | 22 | 38,50 | 41,93 | 41,41 | 36,93 | 40,25 | 35,07 | 35,59 |
| 25 | 31,25 | 33,76 | 33,38 | 30,11 | 32,50 | 28,74 | 29,12 | 25 | 43,75 | 47,19 | 46,46 | 42,16 | 45,50 | 40,31 | 40,84 |
| 30 | 37,50 | 40,01 | 39,64 | 36,34 | 38,75 | 34,99 | 35,36 | 30 | 52,50 | 55,95 | 55,42 | 50,88 | 54,25 | 49,05 | 49,58 |
| 35 | 46,75 | 46,27 | 45,89 | 42,58 | 45,00 | 41,23 | 41,61 | 35 | 61,25 | 64,70 | 64,18 | 59,61 | 63,00 | 57,80 | 58,32 |
| 40 | 50,00 | 52,53 | 52,15 | 48,82 | 51,25 | 47,47 | 47,85 | 40 | 70,00 | 73,46 | 72,93 | 68,35 | 71,75 | 66,54 | 67,07 |

| $\alpha = 30^\circ - m = 2,5 - E_{\text{mini}} = S_{\text{maxi}} = 3,927$ | | | | | | | | $\alpha = 30^\circ - m = 4 - E_{\text{mini}} = S_{\text{maxi}} = 6,283$ | | | | | | | |
|---|--------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---|--------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Z | d mm | D_{ei}^{maxi} plein rayon | D_{ei}^{maxi} fond plat | D_{ji}^{mini} | D_{ee}^{maxi} | D_{je}^{mini} plein rayon | D_{je}^{mini} fond plat | Z | d mm | D_{ei}^{maxi} plein rayon | D_{ei}^{maxi} fond plat | D_{ji}^{mini} | D_{ee}^{maxi} | D_{je}^{mini} plein rayon | D_{je}^{mini} fond plat |
| 6 | 15,00 | 19,78 | 19,03 | 13,58 | 17,50 | 10,22 | 10,97 | 6 | 24,00 | 31,52 | 30,32 | 21,72 | 28,00 | 16,48 | 17,68 |
| 8 | 20,00 | 24,78 | 24,03 | 18,28 | 22,50 | 15,22 | 15,97 | 8 | 32,00 | 39,53 | 38,33 | 29,24 | 36,00 | 24,47 | 25,67 |
| 10 | 25,00 | 29,79 | 29,04 | 23,11 | 27,50 | 20,21 | 20,96 | 10 | 40,00 | 47,54 | 46,34 | 36,97 | 44,00 | 32,46 | 33,66 |
| 12 | 30,00 | 34,80 | 34,05 | 28,00 | 32,50 | 25,20 | 25,95 | 12 | 48,00 | 55,55 | 54,35 | 44,79 | 52,00 | 40,45 | 41,65 |
| 15 | 37,50 | 42,30 | 41,55 | 35,39 | 40,00 | 32,70 | 33,45 | 15 | 60,00 | 67,56 | 66,36 | 56,62 | 64,00 | 52,44 | 53,64 |
| 18 | 45,00 | 49,81 | 49,06 | 42,82 | 47,50 | 40,19 | 40,94 | 18 | 72,00 | 79,57 | 78,37 | 68,51 | 76,00 | 64,43 | 65,63 |
| 20 | 50,00 | 54,82 | 54,07 | 47,79 | 52,50 | 45,18 | 45,93 | 20 | 80,00 | 87,57 | 86,37 | 76,46 | 84,00 | 72,43 | 73,63 |
| 22 | 55,00 | 59,82 | 59,07 | 52,68 | 57,50 | 50,18 | 50,93 | 22 | 88,00 | 95,58 | 94,38 | 84,41 | 92,00 | 80,42 | 81,62 |
| 25 | 62,50 | 67,33 | 66,58 | 60,50 | 65,00 | 57,67 | 58,42 | 25 | 100,00 | 107,59 | 106,39 | 93,36 | 104,00 | 92,42 | 93,62 |
| 30 | 75,00 | 79,83 | 79,08 | 72,00 | 77,50 | 67,17 | 67,92 | 30 | 120,00 | 127,59 | 126,39 | 112,40 | 124,00 | 112,41 | 113,61 |
| 35 | 87,50 | 92,34 | 91,59 | 82,00 | 90,00 | 78,66 | 79,41 | 35 | 140,00 | 147,60 | 146,40 | 132,40 | 144,00 | 132,40 | 133,60 |
| 40 | 100,00 | 104,85 | 104,10 | 94,00 | 102,50 | 90,15 | 90,90 | 40 | 160,00 | 167,61 | 166,41 | 152,40 | 164,00 | 152,39 | 153,59 |

| $\alpha = 30^\circ - m = 1,25 - E_{\text{mini}} = S_{\text{maxi}} = 9,425$ | | | | | | | | $\alpha = 30^\circ - m = 1,75 - E_{\text{mini}} = S_{\text{maxi}} = 15,708$ | | | | | | | |
|--|--------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---|--------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Z | d mm | D_{ei}^{maxi} plein rayon | D_{ei}^{maxi} fond plat | D_{ji}^{mini} | D_{ee}^{maxi} | D_{je}^{mini} plein rayon | D_{je}^{mini} fond plat | Z | d mm | D_{ei}^{maxi} plein rayon | D_{ei}^{maxi} fond plat | D_{ji}^{mini} | D_{ee}^{maxi} | D_{je}^{mini} plein rayon | D_{je}^{mini} fond plat |
| 6 | 36,00 | 47,17 | 45,37 | 32,58 | 42,00 | 24,83 | 26,63 | 6 | 60,00 | 78,44 | 75,44 | 54,31 | 70,00 | 41,56 | 44,56 |
| 8 | 48,00 | 59,18 | 57,38 | 43,36 | 54,00 | 36,82 | 38,62 | 8 | 80,00 | 98,46 | 95,46 | 73,11 | 90,00 | 61,54 | 64,54 |
| 10 | 60,00 | 71,19 | 69,38 | 55,45 | 66,00 | 48,81 | 50,61 | 10 | 100,00 | 118,47 | 115,47 | 92,42 | 110,00 | 81,53 | 84,53 |
| 12 | 72,00 | 83,20 | 81,40 | 67,19 | 78,00 | 60,80 | 62,60 | 12 | 120,00 | 138,48 | 135,48 | 111,98 | 130,00 | 101,52 | 104,52 |
| 15 | 90,00 | 101,21 | 99,41 | 84,93 | 96,00 | 78,79 | 80,54 | 15 | 150,00 | 168,49 | 165,49 | 141,56 | 160,00 | 131,51 | 134,51 |
| 18 | 108,00 | 119,22 | 117,42 | 102,77 | 114,00 | 96,78 | 98,58 | 18 | 180,00 | 198,51 | 195,51 | 171,28 | 190,00 | 161,49 | 164,49 |
| 20 | 120,00 | 131,23 | 129,43 | 114,69 | 126,00 | 108,77 | 110,57 | 20 | 200,00 | 218,52 | 215,52 | 191,15 | 210,00 | 181,49 | 184,49 |
| 22 | 132,00 | 143,23 | 141,43 | 126,62 | 138,00 | 120,77 | 122,57 | 22 | 220,00 | 238,52 | 235,52 | 211,04 | 230,00 | 201,48 | 204,48 |
| 25 | 150,00 | 161,24 | 159,44 | 144,54 | 156,00 | 138,76 | 140,56 | 25 | 250,00 | 268,53 | 265,53 | 240,91 | 260,00 | 231,47 | 234,47 |
| 30 | 180,00 | 191,25 | 189,45 | 174,45 | 186,00 | 168,75 | 170,55 | 30 | 300,00 | 318,55 | 315,55 | 290,75 | 310,00 | 281,45 | 284,45 |
| 35 | 210,00 | 221,27 | 219,47 | 204,38 | 216,00 | 198,73 | 200,53 | 35 | 350,00 | 368,56 | 365,56 | 340,64 | 360,00 | 331,44 | 334,44 |
| 40 | 240,00 | 251,28 | 249,48 | 234,33 | 246,00 | 228,72 | 230,52 | 40 | 400,00 | 418,57 | 415,57 | 390,56 | 410,00 | 381,44 | 384,44 |



Voir aussi page 579.

3. Axes dentelés pour petites commandes

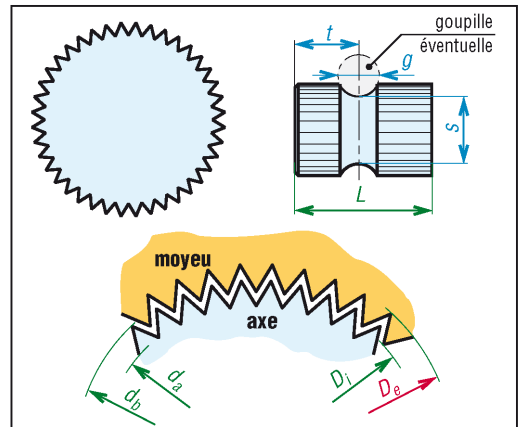
Ces axes permettent le calage angulaire d'un organe de commande dans plusieurs positions. L'immobilisation de l'organe peut être obtenue par pincement, goupillage...

Applications :

petits leviers de commande, axes de volants de robinets...

Désignation :

dentures pour axe 10 NF L 32-350



6. Axes dentelés. NF L 32-50

| Axes dentelés : principales dimensions normalisées (NF L 32-350) | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----|-------------------|-------------------|
| diamètre nominal d | nombre de dents Z | d_a | $d_b^{+0,1}_{+0}$ | $D_i^{+0,1}_{+0}$ | $D_e^{+0,1}_{+0}$ | L_{mini} | t | S_{mini} | g_{mini} |
| 8 | 24 | 6,88 | 7,8 | 7,1 | 8 | 10,5 | 5,5 | 6,7 | 4 |
| 10 | 36 | 8,9 | 9,8 | 9,1 | 10 | 14 | 7 | 8 | 5 |
| 15 | 48 | 13,98 | 14,8 | 14,1 | 15 (+0,15) | 18 | 9 | 12 | 6 |

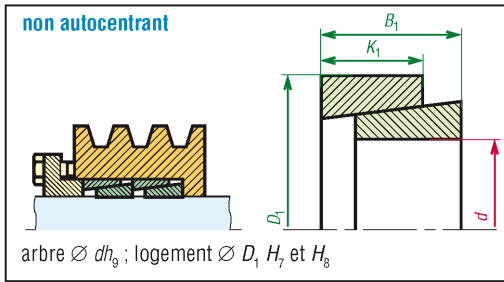
IV - Éléments d'assemblage biconiques

Il existe de nombreuses variantes, toutes basées sur le même principe : la liaison arbre-moyeu est obtenue par déformation et coincement d'une bague conique ou biconique fendue. Les vis sont serrées à la clé dynamométrique.

Avantages : utilisation d'un arbre lisse sans usinage, ni rainure de clavette, ni cannelures. Les grands diamètres sont possibles, de 500 à 1 000 mm, et les démontages faciles.

Certaines solutions ne réalisent pas le centrage entre arbre et moyeu.

Dans les tableaux de dimensions, les couples C_1 à C_2 et les charges axiales F_1 à F_2 sont les efforts transmissibles entre arbre et moyeu.

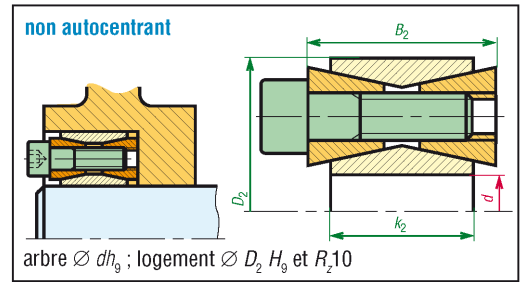


7. Éléments TLK 300, Ringblock RB 1060, Bikon 5000.

| d | D_1 | B_1 | K_1 | C_1 | F_1 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10 | 13 | 4,5 | 3,7 | 7 | 1,4 |
| 12 | 15 | 4,5 | 3,7 | 10 | 1,6 |
| 15 | 19 | 6,3 | 5,3 | 23 | 3,0 |
| 18 | 22 | 6,3 | 5,3 | 33 | 3,6 |
| 20 | 25 | 6,3 | 5,3 | 40 | 4,0 |
| 24 | 30 | 6,3 | 5,3 | 62 | 5,0 |
| 28 | 35 | 6,3 | 5,3 | 90 | 6,0 |
| 32 | 40 | 7 | 6 | 135 | 7,9 |
| 36 | 45 | 8 | 6,6 | 195 | 9,9 |

| d | D_1 | B_1 | K_1 | C_1 | F_1 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 45 | 52 | 10 | 8,6 | 325 | 14,5 |
| 50 | 57 | 10 | 8,6 | 405 | 16,0 |
| 55 | 62 | 10 | 8,6 | 490 | 17,5 |
| 60 | 68 | 12 | 10,4 | 705 | 23,5 |
| 65 | 73 | 12 | 10,4 | 825 | 25,5 |
| 70 | 79 | 14 | 12,2 | 1 120 | 32,0 |
| 80 | 91 | 17 | 15 | 1 800 | 45,0 |
| 100 | 114 | 21 | 18,7 | 3 500 | 70,0 |

d - D_1 - B_1 - K_1 (en mm) ; C_1 (en Nm) ; F_1 (en kN)

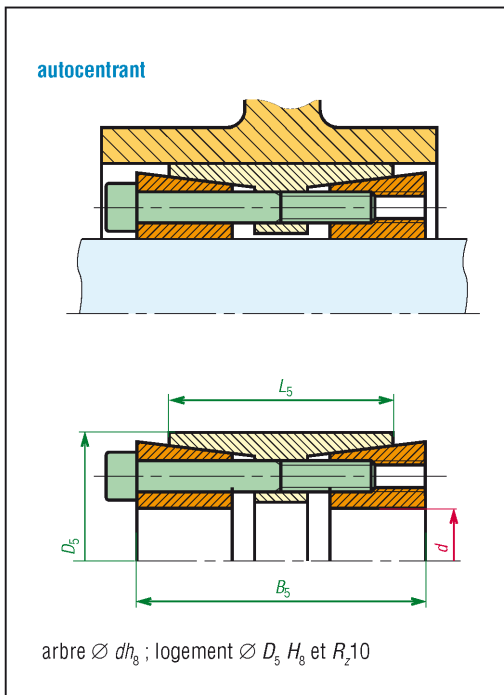


8. Tollok, TLK 200, Bikon 4000 ; RB 1120....

| d | D_2 | k_2 | B_2 | C_2 | F_2 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20 | 47 | 17 | 20 | 310 | 30 |
| 25 | 50 | 17 | 20 | 440 | 35 |
| 30 | 55 | 17 | 20 | 700 | 47 |
| 35 | 60 | 17 | 20 | 820 | 47 |
| 40 | 65 | 17 | 20 | 1 170 | 59 |
| 45 | 75 | 20 | 24 | 1 900 | 80 |
| 50 | 80 | 20 | 24 | 2 050 | 80 |
| 60 | 90 | 20 | 24 | 3 000 | 100 |
| 70 | 110 | 24 | 28 | 5 600 | 160 |

| d | D_2 | k_2 | B_2 | C_2 | F_2 |
|-----|-------|-------|-------|--------|-------|
| 80 | 120 | 24 | 28 | 6 400 | 160 |
| 90 | 130 | 24 | 28 | 8 450 | 180 |
| 100 | 145 | 26 | 33 | 12 100 | 240 |
| 110 | 155 | 26 | 33 | 13 300 | 240 |
| 120 | 165 | 26 | 33 | 17 000 | 280 |
| 140 | 190 | 34 | 38 | 25 500 | 360 |
| 170 | 225 | 38 | 44 | 45 100 | 530 |
| 200 | 260 | 45 | 52 | 69 000 | 690 |

d - D_2 - k_2 - B_2 (en mm) ; C_2 (en Nm) ; F_2 (en kN)



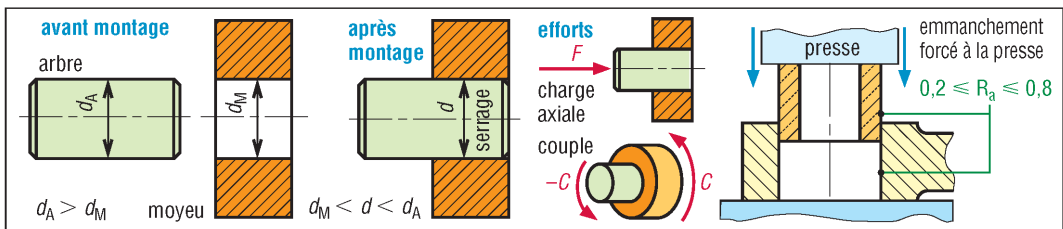
9. Bikon 1012 ; RB 1800 ; Tollok TLK 451...

| d | D_5 | B_5 | L_5 | C_5 | F_5 | Vis |
|-----|-------|-------|-------|---------|-------|-----|
| 25 | 55 | 40 | 32 | 830 | 65 | M6 |
| 30 | 55 | 40 | 32 | 1 000 | 65 | M6 |
| 35 | 60 | 54 | 42 | 1 550 | 85 | M6 |
| 40 | 75 | 54 | 42 | 2 800 | 140 | M8 |
| 45 | 75 | 54 | 42 | 3 150 | 140 | M8 |
| 50 | 80 | 64 | 51 | 4 000 | 160 | M8 |
| 60 | 90 | 64 | 51 | 6 000 | 200 | M8 |
| 70 | 110 | 78 | 64 | 11 400 | 320 | M10 |
| 80 | 120 | 78 | 64 | 14 400 | 360 | M10 |
| 90 | 130 | 78 | 64 | 17 600 | 390 | M10 |
| 100 | 145 | 100 | 84 | 26 600 | 530 | M12 |
| 120 | 165 | 100 | 84 | 37 700 | 630 | M12 |
| 140 | 190 | 114 | 96 | 60 100 | 800 | M14 |
| 160 | 210 | 114 | 96 | 74 000 | 920 | M14 |
| 180 | 235 | 148 | 126 | 121 900 | 1 350 | M16 |
| 200 | 260 | 148 | 126 | 144 500 | 1 400 | M16 |
| 220 | 285 | 150 | 128 | 178 800 | 1 600 | M16 |
| 240 | 305 | 150 | 128 | 205 900 | 1 700 | M16 |
| 260 | 325 | 150 | 128 | 234 000 | 1 800 | M16 |
| 300 | 375 | 180 | 156 | 400 300 | 2 650 | M20 |

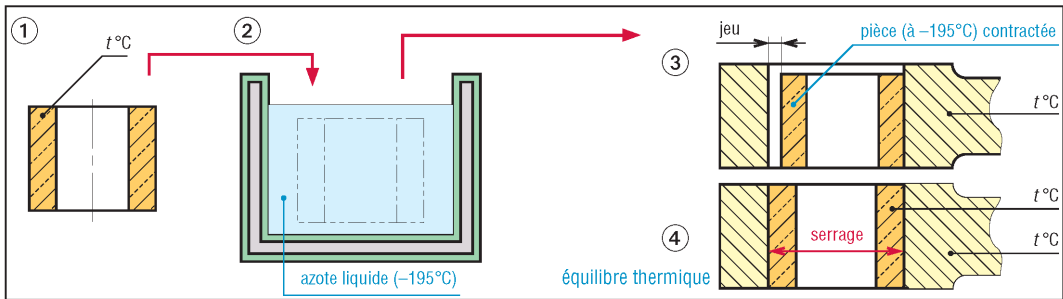
V - Frettage et emmanchements forcés

Ils permettent de réaliser les assemblages par ajustements serrés. Ces solutions sont intéressantes si l'assemblage arbre/moyeu n'est jamais démonté car le démontage est impossible sans destruction de la liaison. Voir aussi NF E 22-620, 621, 622, 624 et 625.

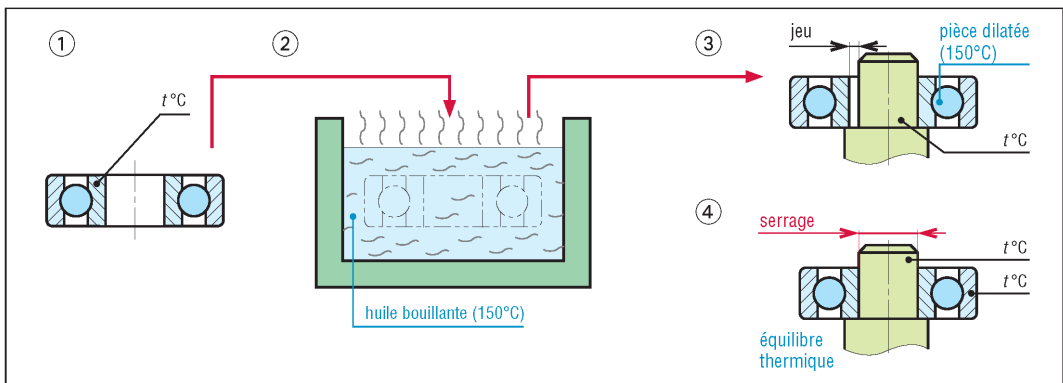
| Exemples d'ajustements serrés | | observations | |
|-------------------------------|--|--|--|
| H7u6 H7s6 | assemblage fortement serré pouvant transmettre des efforts importants | presse lourde ou frettage | avec détérioration des pièces au démontage |
| H7r6 | assemblage assez serré | presse | |
| H7p6 | assemblage serré pouvant transmettre des efforts sans organes d'arrêt | | |
| H7n6 | assemblage sous faible pression organe d'arrêt (clavette...) nécessaire en rotation organe d'arrêt pas forcément nécessaire en translation | assemblage parfois possible au maillet | sans détérioration des pièces au démontage |
| H7m6 | assemblage légèrement serré organes d'arrêt nécessaires en rotation et translation | | |



10. Assemblages par ajustements serrés. Emmanchements à la presse.



11. Principe du frettage par contraction.



12. Principe du frettage par dilatation.

a) Emmanchements forcés : ils sont réalisés à la presse ou par un dispositif équivalent. Les deux pièces sont assemblées à la même température. La réussite dépend de la précision des formes, de l'état des surfaces et du mode opératoire.

b) Frettage : si les pièces sont de grandes dimensions, si l'assemblage à la presse n'est pas envisageable, si les assemblages exigent une certaine précision ou une manipulation délicate, on utilise le frettage.

Principe : le frettage est basé sur le changement des dimensions des objets suite à une variation contrôlée de la température. On note trois cas : le frettage par contraction de l'arbre, le frettage par dilatation du logement et le frettage par combinaison des deux.

Remarques :

– La contraction ou la dilatation de l'une des pièces rend l'assemblage possible. Le serrage est obtenu dès que les deux pièces retrouvent la même température (la température ambiante t °C).

| Frettage par contraction de l'arbre | Frettage par dilatation du logement | Frettage par contraction et par dilatation |
|--|---|---|
| Le raccourcissement δd_A du diamètre de l'arbre est : $\delta d_A = \alpha_A \cdot d_A \cdot \delta T_A = J + S$ | L'accroissement ou la dilatation δd_M du diamètre du moyeu est : $\delta d_M = \alpha_M \cdot d_M \cdot \delta T_M = J + S$ | $\delta T = \delta T_A + \delta T_M = \frac{J + S}{d} \left(\frac{1}{\alpha_A} + \frac{1}{\alpha_M} \right)$ |
| δT_A : diminution de la température de l'arbre δT_M : augmentation de la température du moyeu δT : différence de température arbre moyeu | d_A : diamètre de l'arbre avant montage d_M : diamètre du logement avant montage $d \approx d_A \approx d_M$ | α_A : coeff. dilatation matériau arbre α_M : coeff. dilatation matériau moyeu J : jeu souhaité pour le montage S : serrage voulu = $d_A - d_M$ |

– La rugosité des surfaces a une influence sur le serrage S . Arêtes et crêtes de rugosité sont écrasées à l'assemblage.

Si R_{aA} et R_{aM} sont les rugosités de l'arbre et du moyeu, prendre :

$$S' = S + 4(R_{aA} + R_{aM}) = \text{serrage à appliquer}$$

Exemple :

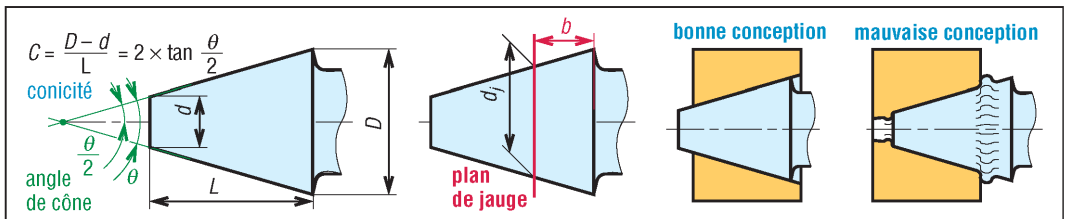
$$S = 0,20 ; R_{aA} = R_{aM} = 0,8 \mu\text{m}$$

$$S' = 0,20 + 4 \times 2 \times 0,0008 = 0,0264 \text{ mm}$$

VI – Liaison arbre/moyeu par cône

La liaison par cône permet un assemblage sans jeu (radial) et évite l'usinage d'un épaulement. Cette propriété est abondamment utilisée pour le positionnement des outils de coupe dans le nez des broches des machines-outils.

Inconvénient : la position axiale précise entre arbre et moyeu est plus difficile à obtenir dans la mesure où une erreur (« tolérance ») sur le diamètre se retrouve amplifiée axialement (multipliée par $\tan(\theta/2)^{-1}$).



13. Cônicité C, plan de jauge, suggestions de conception des liaisons par cône. Cotation : NF EN ISO 3040.

Plan de jauge : défini par le diamètre de jauge tolérancé d_j , c'est un plan qui sert de référence pour positionner axialement certains éléments. Ce plan est commun aux deux pièces à assembler.

Cotation d'un cône : elle nécessite l'angle θ , le diamètre de jauge d_j et une cote axiale b entre le plan de jauge et une surface de référence. Voir aussi ISO 3040.

Coincement et non-coinement des cônes : si θ est inférieur à deux fois l'angle de frottement ($\approx 11,4^\circ$ pour un contact acier/acier), il y a coinement entre l'arbre et le moyeu et la transmission d'un couple modéré est possible sans organe d'arrêt (clavette...). Les cônes morses normalisés pour outils fonctionnent sur ce principe. Si les valeurs de θ sont supérieures à deux fois l'angle de frottement, le coinement n'est plus possible et la transmission des efforts exige des organes d'arrêt. C'est le cas des cônes 7/24 pour broches (page 222).

Série N°1 (préférentielle) d'angles θ normalisés (NF EN ISO 1119 ; norme GPS) : 120°-90°-60°-45°-30°-1:3-1:5-1:10-1:20-1:50-1:100-1:200-1:500.

23

PALIERIS LISSES COUSSINETS ROTULES

OBJECTIFS

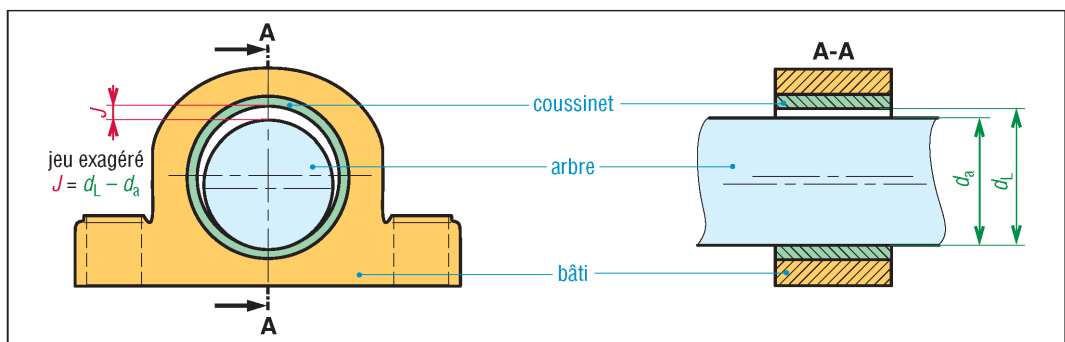
- Décrire et indiquer les caractéristiques, les propriétés et les dimensions normalisées des principales familles de coussinets et de rotules lisses.
- Fournir des éléments pour leur calcul.
- Donner le principe du palier lisse hydrodynamique.

I - Coussinets

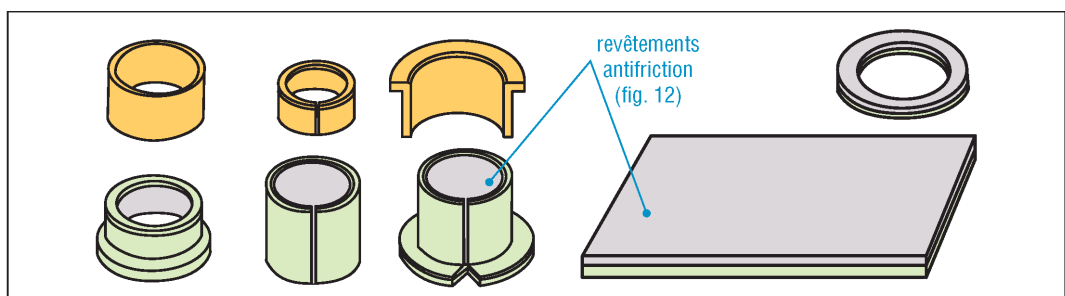
Économiques, souvent utilisés, les coussinets sont des bagues cylindriques, de forme tubulaire, avec ou sans collerette, interposés entre un arbre et son logement pour faciliter le mouvement de rotation.

Construits à partir de matériaux présentant de bonnes qualités frottantes (bronze, étain, plomb, graphite, Téflon, PTFE, polyamide), ils peuvent, suivant les variantes, être utilisés à sec ou avec lubrification.

Il existe de nombreuses familles aux dimensions normalisées et de nombreux produits dérivés : rondelles, rotules, bandes de frottement, pièces sur mesure.



1. Principe de montage d'un coussinet.



2. Diverses formes de coussinets.

1. Principales familles

a) Coussinets autolubrifiants

Ils sont fabriqués en métal fritté à base de bronze, poreux (porosités entre 15 et 35 % en volume), avec incorporation de lubrifiant (huile, graphite, etc.) dans les porosités. Dans le cas de l'huile, la structure, comparable à une éponge, restitue l'huile en fonctionnement et l'absorbe à l'arrêt.

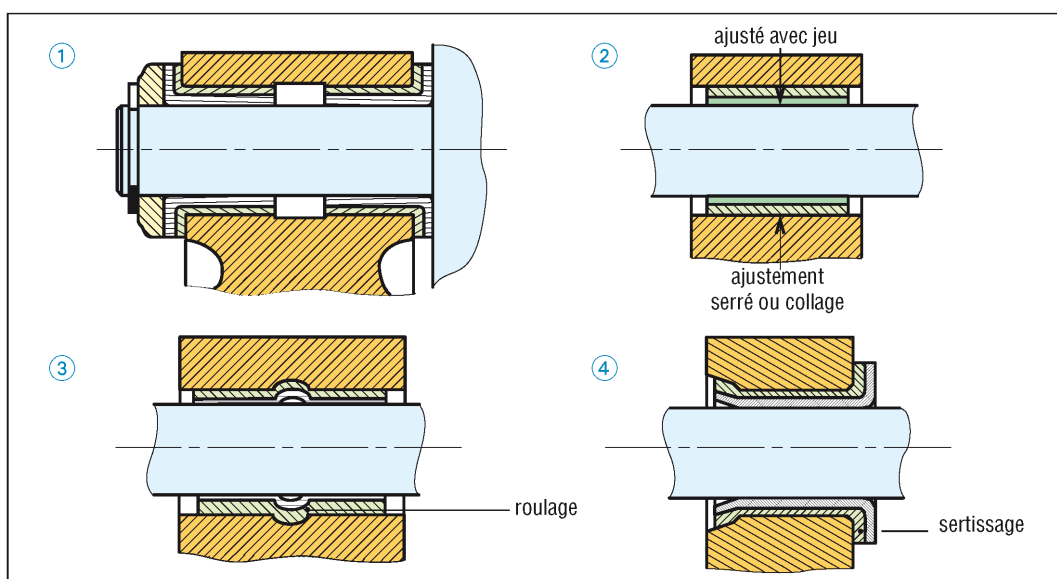
Variantes : solutions fonctionnant à sec jusqu'à des vitesses périphériques de 6 m/s ; solutions tout carbone ou graphite supportant des vitesses élevées, jusqu'à 13 m/s...

b) Coussinets composites type glacier

Ils peuvent fonctionner à sec ou avec un léger graissage au montage sous des vitesses périphériques inférieures à 3 m/s.

Ils sont constitués de trois couches différentes. La base est une tôle d'acier roulée recouverte d'une couche de bronze fritté. La surface frottante peut être en résine acétal ou en PTFE avec addition d'un lubrifiant solide : plomb, graphite, bisulfure de molybdène MoS_2 ...

Montages typiques : les cas 1 et 2 conviennent aussi aux autres coussinets.



3. Exemples de montages de coussinets composites type glacier.

c) Coussinets polymères (Nylon, PTFE, acétal...)

Surtout utilisés lorsqu'il est nécessaire d'avoir une grande résistance chimique (acides, bases...).

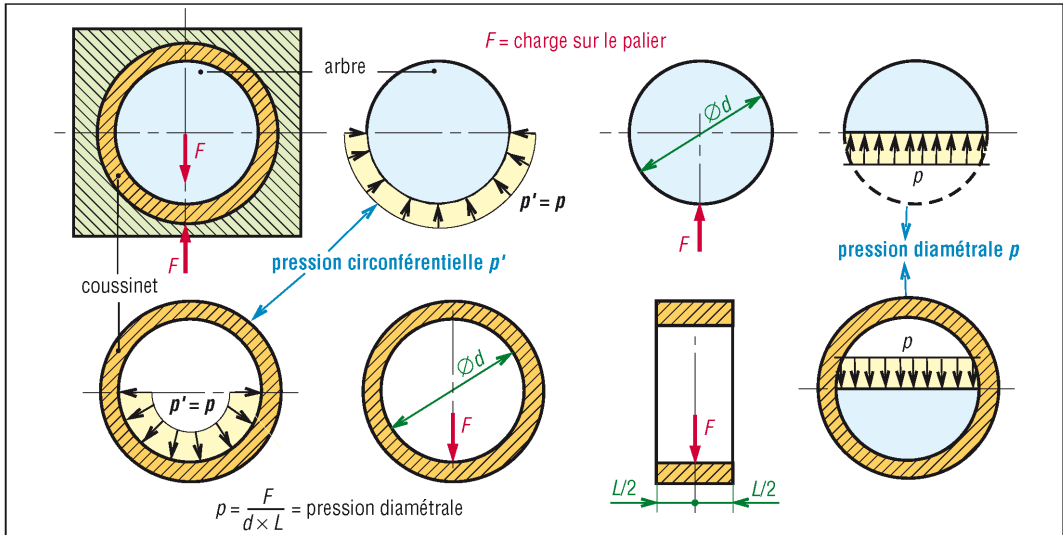
Inconvénients : le fluage sous charge et un faible coefficient de conductivité thermique empêchant une bonne évacuation des calories.

| Performances indicatives comparatives des coussinets usuels | | | | |
|---|-------------------------------|---|--|---|
| type du coussinet | vitesse maxi admissible (m/s) | températures limites de fonctionnement (°C) | pression admissible en fonctionnement (N/mm^2) | produit pV admissible ($\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{m/s}$) |
| glacier acétal | 2 à 3 | -40 à 110 | 70 | 3 |
| glacier PTFE | 2 à 3 | -200 à 280 | 50 | 1,8 à 3,6 |
| graphite | 13 | 400 | 5 | 0,5 |
| bronze-étain | 7 à 8 | > 250 | 7 à 35 | 1,7 |
| bronze-plomb | 7 à 8 | 250 | 20 à 30 | 1,8 à 2,1 |
| Nylon | 2 à 3 | -80 à 120 | 7 à 10 | 0,1 à 0,3 |
| acétal | 2 à 3 | -40 à 100 | 7 à 10 | 0,1 |

2. Calcul des coussinets (régime non hydrodynamique)

La procédure de calcul varie sensiblement d'une famille à l'autre et d'un fabricant à l'autre. Pour des choix précis utiliser des documents constructeurs. Cependant ces calculs (durée de vie, longueur du coussinet, facteur d'usure...) font régulièrement intervenir les notions de pression diamétrale p et de produit pV .

a) Pression diamétrale p



4. Pression diamétrale p et pression circonférentielle p' .

$$p = \frac{F}{d \times L}$$

avec

F : charge sur le palier (N)

d : diamètre de l'alésage (mm)

L : longueur du coussinet (mm)

p : pression diamétrale (MPa ou N/mm²)

On démontre en statique que la pression circonférentielle p' , répartie uniformément sur une demi-périphérie, est égale à la pression diamétrale p répartie uniformément sur la surface diamétrale $d.L$.

b) Facteur ou produit pV

Il est déterminant. Sa valeur permet de mesurer la capacité du matériau à supporter l'énergie engendrée par le frottement.

En cas de dépassement, la température du palier augmente et la destruction est rapide.

$$pV = \text{pression diamétrale (N/mm}^2\text{)} \times \text{vitesse circonférentielle (m/s)}$$

Exemples

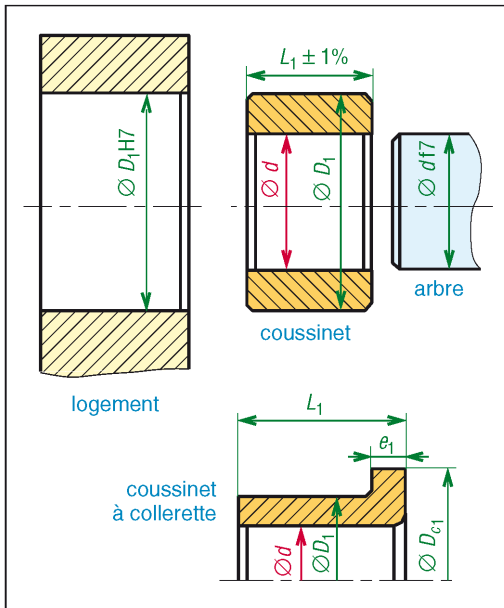
a) Un palier supporte une charge radiale F de 100 daN ; le diamètre de l'arbre est de 40 mm ; la vitesse de rotation de 500 tr/min et la largeur du coussinet de 50 mm. Quelle est la valeur du produit pV ?

$$p = \frac{F}{d \times L} = \frac{1\,000}{40 \times 50} = 0,5 \text{ N/mm}^2 ; \quad V = \frac{\pi \cdot N \cdot d}{30 \times 2} = \frac{\pi \times 500 \times 20}{60} = 1\,047 \text{ mm/s} \approx 1,05 \text{ m/s}$$

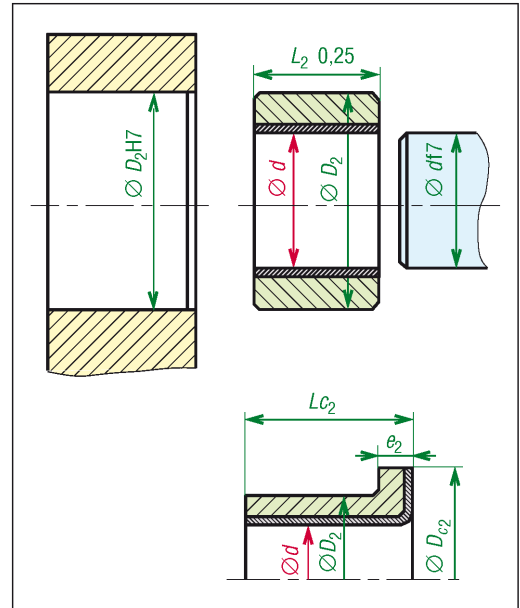
$$pV = 0,5 \times 1,05 = 0,524 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{m/s}$$

b) En reprenant les données ci-dessus, si on impose un pV admissible de 2 Nm/mm².s, quelle doit être la longueur minimale (L_{mini}) du coussinet ?

$$pV = \frac{F}{d \cdot L} \cdot v \leq 2 ; \quad L \geq \frac{Fv}{2d} = \frac{1\,000 \times 1,05}{40 \times 2} = 13,1 \text{ mm}$$



5. Coussinets frittés autolubrifiants (Métafram...)



6. Coussinets glaciers (INA, SIC, SKF...).

| Coussinets – extrait de dimensions normalisées (mm) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|-----------------|----------------|----------------|---|----------------|-----------------|----------------|----------------|---|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Frittés autolubrifiants NFE 22-510 | | | | | Massifs en alliages cuivre NF ISO 4379 | | | | | Coussinets glacier (dimensions INA, SIC, SKF...) | | | | | |
| d | D ₁ | D _{c1} | e ₁ | L ₁ | d | D ₁ | D _{c1} | e ₁ | L ₁ | d | D ₂ | L ₂ | D _{c2} | e ₂ | L _{c2} |
| 3 | 6 | 9 | 1,5 | 4 | 6 | 12 | 14 | 3 | 6-10 | 3 | 4,5 | 3-5-6 | | | |
| 4 | 8 | 12 | 2 | 3-4-6 | 8 | 14 | 18 | 3 | 6-10 | 4 | 5,5 | 3-4-6-10 | | | |
| 5 | 9 | 13 | 2 | 4-5-8 | 10 | 16 | 20 | 3 | 6-10 | 5 | 7 | 5-8-10 | | | |
| 6 | 10 | 14 | 2 | 4-6-10 | 12 | 18 | 22 | 3 | 10-15-20 | 6 | 8 | 6-8-10 | 12 | 1 | 4-8 |
| 8 | 12 | 16 | 2 | 6-8-12 | 14 | 20 | 25 | 3 | 10-15-20 | 8 | 10 | 6-8-10-12 | 15 | 1 | 5,5-7,5-9,5 |
| 9 | 14 | 19 | 2,5 | 6-10-14 | 15 | 21 | 27 | 3 | 10-15-20 | 10 | 12 | 8-10-12-15-20 | 18 | 1 | 7-9-12-17 |
| 10 | 16 | 22 | 3 | 8-10-16 | 16 | 22 | 28 | 3 | 12-15-20 | 12 | 14 | 8-10-12-15-20 | 20 | 1 | 7-9-12-17 |
| 12 | 18 | 24 | 3 | 8-12-20 | 18 | 24 | 30 | 3 | 12-20-30 | 14 | 16 | 8-10-12-15-20 | 22 | 1 | 12-17 |
| 14 | 20 | 26 | 3 | 10-14-20 | 20 | 26 | 32 | 3 | 15-20-30 | 15 | 17 | 10-12-15-20-25 | 23 | 1 | 9-12-17 |
| 15 | 21 | 27 | 3 | 10-15-25 | 22 | 28 | 34 | 3 | 15-20-30 | 16 | 18 | 10-12-15-20-25 | 24 | 1 | 12-17 |
| 16 | 22 | 28 | 3 | 12-16-25 | 25 | 32 | 38 | 4 | 20-30-40 | 18 | 20 | 15-20-25 | 26 | 1 | 12-17-22 |
| 18 | 24 | 30 | 3 | 12-18-30 | 28 | 36 | 42 | 4 | 20-30-40 | 20 | 23 | 10-15-20-25-30 | 30 | 1,5 | 12-17-22 |
| 20 | 26 | 32 | 3 | 15-20-25 | 30 | 38 | 44 | 4 | 20-30-40 | 22 | 25 | 15-20-25-30 | | | 11,5-16,5-21,5 |
| 22 | 28 | 34 | 3 | 15-20-25 | 32 | 40 | 46 | 4 | 20-30-40 | 25 | 28 | 15-20-25-30-40 | 35 | 1,5 | 11,5-16,5-21,5 |
| 25 | 32 | 39 | 3,5 | 20-25-30 | 35 | 45 | 50 | 5 | 30-40-50 | 28 | 32 | 15-20-25-30 | | | |
| 28 | 36 | 44 | 4 | 20-25-30 | 38 | 48 | 54 | 5 | 30-40-50 | 30 | 34 | 15-20-25-30-40 | 42 | 2 | 16-26 |
| 30 | 38 | 46 | 4 | 20-25-30 | 40 | 50 | 58 | 5 | 30-40-60 | 35 | 39 | 20-30-35-40-50 | 47 | 2 | 16-26 |
| 32 | 40 | 48 | 4 | 20-25-30 | 42 | 52 | 60 | 5 | 30-40-60 | 40 | 44 | 20-30-40-50 | 52 | 2 | 16-26 |
| 35 | 45 | 55 | 5 | 25-35-40 | 45 | 55 | 63 | 5 | 30-40-60 | 45 | 50 | 20-30-40-45-50 | | | |
| 38 | 48 | 58 | 5 | 25-35-45 | 48 | 58 | 66 | 5 | 40-50-60 | 50 | 55 | 20-30-40-50-60 | | | |
| 40 | 50 | 60 | 5 | 30-40-50 | 50 | 60 | 68 | 5 | 40-50-60 | 55 | 60 | 20-25-30-40-50 | | | |
| 45 | 55 | 65 | 5 | 35-45-55 | 55 | 65 | 73 | 5 | 40-50-70 | 60 | 65 | 20-30-40-60-70 | | | |
| 50 | 60 | 70 | 5 | 35-50 | 60 | 75 | 83 | 7,5 | 40-60-60 | 65 | 70 | 30-50-70 | | | |
| 55 | 65 | 75 | 5 | 40-55 | 65 | 80 | 88 | 7,5 | 50-60-80 | 70 | 75 | 40-50-70 | | | |
| 60 | 72 | 84 | 6 | 50-60-70 | 70 | 85 | 95 | 7,5 | 50-70-90 | 75 | 80 | 60-80 | | | |
| | | | | | 75 | 90 | 100 | 7,5 | 50-70-90 | 80 | 85 | 60-100 | | | |
| | | | | | 80 | 95 | 105 | 7,5 | 60-80-100 | 85 | 90 | 30-60-100 | | | |

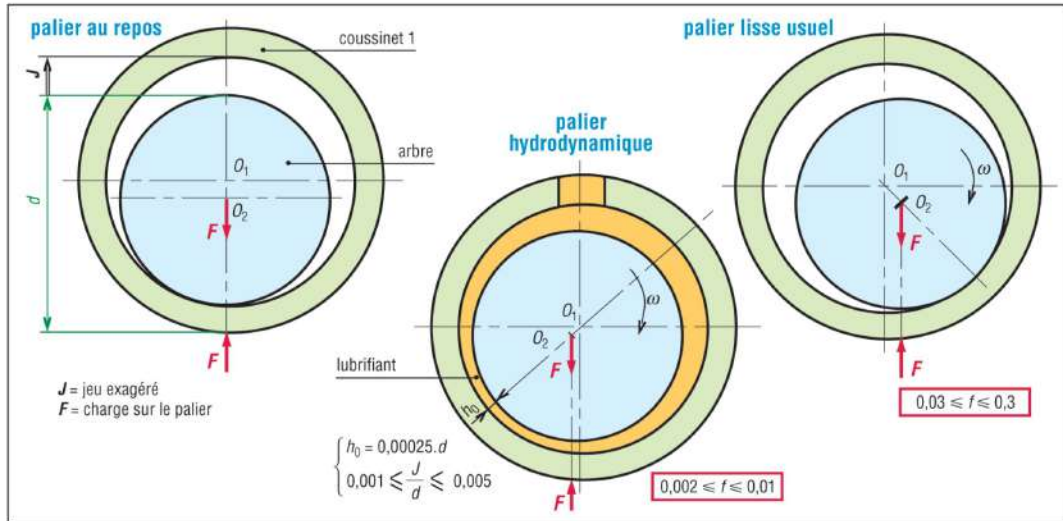
| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Tolérance : D logement : H7 ; après emmanchement, D bague : H7 ou H8 si D ≥ 50 ; D _c , ac et L : js13 ; concentricité d/D IT9 ; chanfreins à 45° | | | | | Tolérance : D logement H7 ; D bague : s6 et d : E6 (H8 après emmanchement) ; D _c : d11 ; L : h13 ; concentricité d/D : IT8 ; chanfreins à 45° ; Ra, d et D : 1,6 µm | | | | | Tolérance : D logement H7 ; longueur L ± 0,25 ; d arbre : f7 avec Ra ≤ 0,4 µm | | | | | |
|--|--|--|--|--|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

| Coussinets glacier usuels : performances indicatives | | | | | | |
|---|--|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|--|
| Type fonctionnement | Composition | Températures d'utilisation | Pression statique admissible | Vitesse maximale admissible | Produit pv maxi N/mm ² · m/s | Exemple |
| Glacier PTFE : sans entretien à sec | PTFE + Pb + bronze... | - 200 à 280 °C | 250 N/mm ² | 2 à 3 m/s | p _v continu : 1,8 p _v temporaire : 3,6 (p < 140 N/mm ²) | INA : permaglide P1 SIC : DU SKF : glycodur F... |
| Glacier acétal : entretien réduit, avec lubrification | résine acétal, PVDF, PTFE, Pb, bronze... | - 40 à 110 °C | 250 N/mm ² | 2 à 3 m/s | p _v continu : 3 (p < 140 N/mm ²) | INA : permaglide P2 SIC : DX SKF : glycodur A... |

Les coussinets ci-dessus existent en plusieurs matériaux avec des performances différentes.

II - Paliers lisses, hydrodynamiques

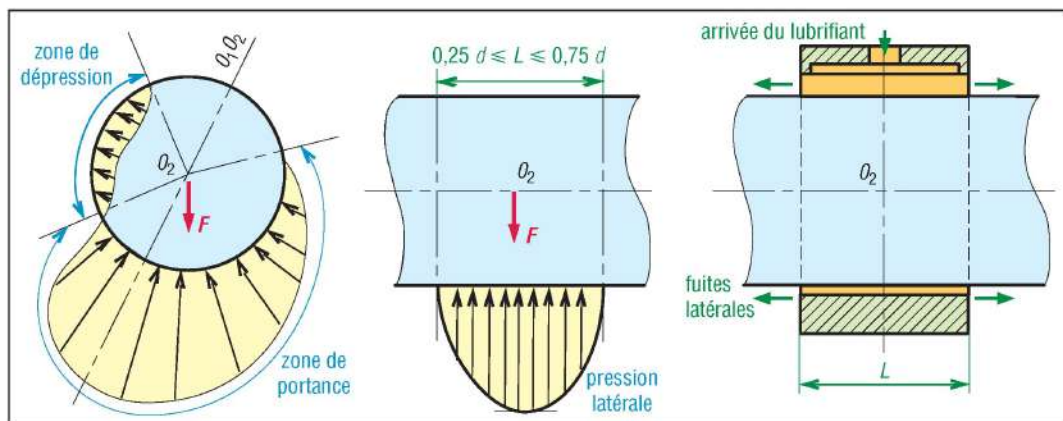
Ils ressemblent aux précédents, avec une principale différence : en fonctionnement normal il n'y a jamais contact métal sur métal entre l'arbre et le coussinet, sauf au démarrage. En permanence un film d'huile sépare les deux surfaces respectives (régime hydrodynamique). Grâce à ce système les paliers peuvent tourner plus vite et plus longtemps.



7. Palier au repos ; palier lisse usuel ; palier hydrodynamique.

Principe de fonctionnement : il utilise le principe de la lubrification hydrodynamique (voir chapitre 34 : lubrification) analogue à celui du ski nautique. La portance de l'arbre, comme celle du skieur, n'est possible qu'à partir d'une certaine vitesse. La formation du film séparateur dépend principalement de la vitesse, de la viscosité du lubrifiant et de la pression de l'huile au contact. Terminologie et symboles : NF ISO 4738-1 à 5.

Remarque : l'alimentation en huile doit être suffisante pour compenser les fuites latérales.



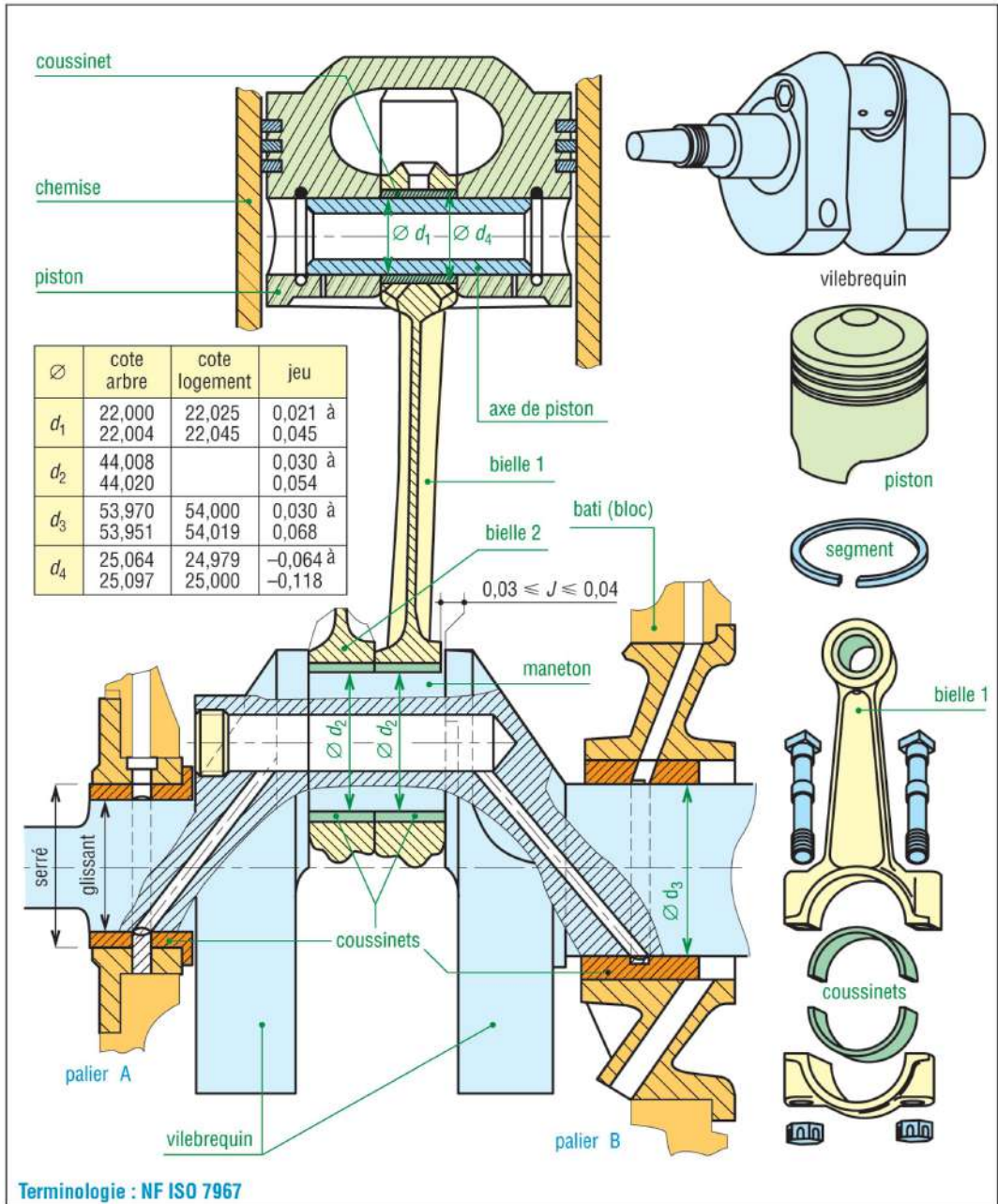
8. Forces de pression sur l'arbre.

L'épaisseur la plus faible (h_0) du film séparateur varie entre 0,008 mm et 0,020 mm ($d < 100$ mm).

C'est dans la zone de portance que l'arbre est soutenu. La résultante des forces de pression sur toute la périphérie est égale et opposée à la charge F sur le palier.

Les alimentations (canal d'arrivée, rainure de graissage, bassin relais) sont généralement placées dans la zone où il y a dépression.

Utilisations : paliers des moteurs thermiques (bielles, vilebrequin, etc.), des turbines...



9. Paliers hydrodynamiques d'un moteur de moto : palier A, palier B et paliers vilebrequin/bielles.

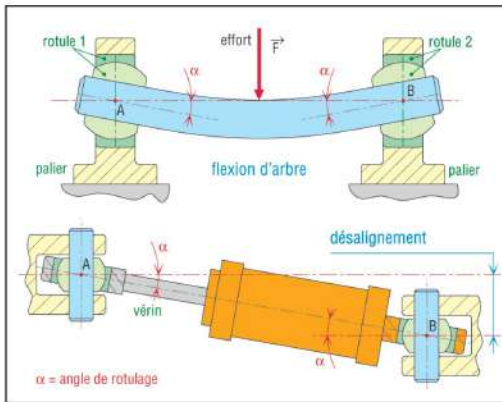
| Comparaison entre paliers à roulement et paliers hydrodynamiques | |
|--|--|
| avantages des roulements | avantages du palier hydrodynamique |
| <ul style="list-style-type: none"> - préférable si le couple de démarrage est élevé - lubrification plus facile à réaliser - moins encombrants axialement - peuvent supporter des charges combinées - facilement interchangeables (normes ISO) - une avarie est signalée par un bruit croissant du palier - permettent un centrage précis des arbres - supportent mieux les surcharges momentanées | <ul style="list-style-type: none"> - moins encombrant radialement - coût initial moins élevé - moins sensible aux poussières et aux corps étrangers - une durée de vie non limitée par le phénomène de fatigue - supportent mieux les chocs et les vibrations |

III - Articulations sphériques - Rotules lisses

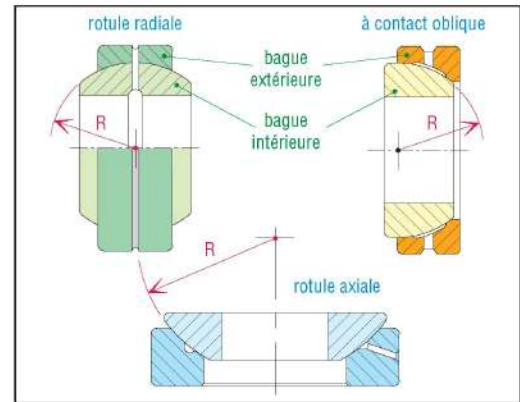
Les rotules sphériques intéressent de nombreuses industries et occupent une place prépondérante en aéronautique : articulations de trains, de gouvernes, de volets, rotules d'assemblage de réacteurs. Vocabulaire : NF ISO 6811.

On peut les considérer comme des paliers lisses de forme sphérique. Elles permettent de corriger les défauts d'alignement, les flexions d'arbre et se calculent de la même façon que les roulements. Détails divers, rotules autolubrifiantes : NF EN 4540.

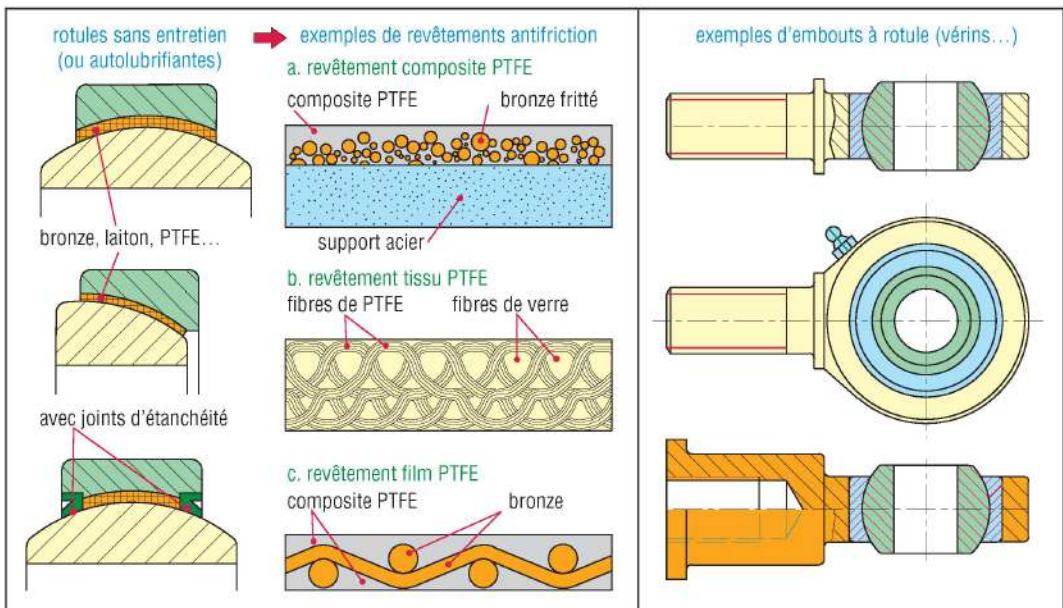
Variantes (avec ou sans joints d'étanchéité) : rotules radiales ; rotules à contact oblique ; butées... Utilisations : mouvements oscillatoires et de basculement pas trop rapides ; articulations diverses ; paliers prêts à l'emploi ; embouts pour vérins ; éléments d'assemblage (ne bougent pas mais évitent les efforts d'encastrement)...



10. Flexion d'arbre et désalignement.



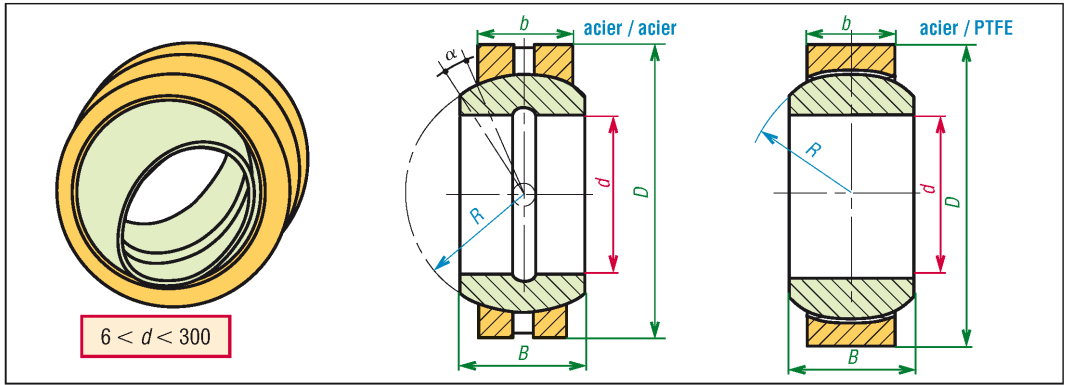
11. Principales familles de rotules lisses. NF ISO 12240-1 à 3.



12. Rotules autolubrifiantes et embouts à rotule : exemples de variantes (Voir aussi NF ISO 12240-4).

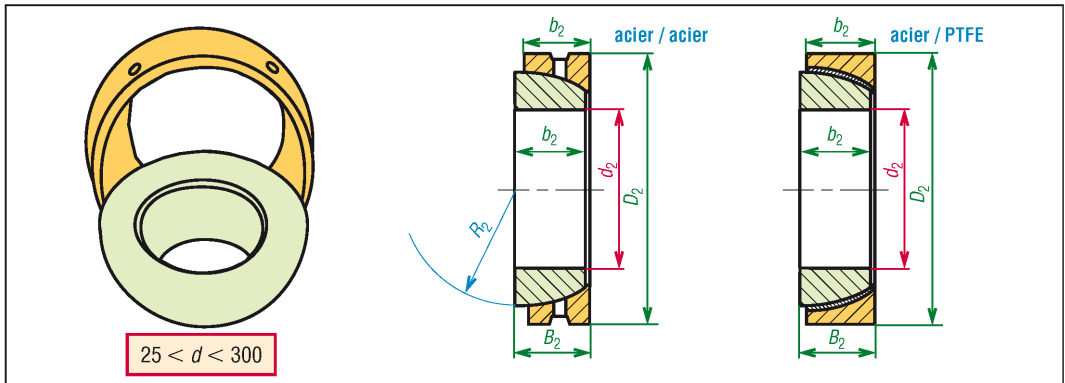
a) Rotules acier/acier (100Cr6, X100CrMo17...) : supportent des charges statiques élevées, des charges alternées et des chocs. Avec ou sans trous de graissage, elles doivent être lubrifiées périodiquement (200 à 400 °C maxi) et ne prennent pas de jeu au fonctionnement.

b) Rotules autolubrifiantes (-50 à 200 °C) : caractérisées par un faible entretien et un faible frottement, mais prise de jeu avec le temps. Même technologie que les coussinets : PTFE, bronze fritté imprégné de lubrifiant qui exige une lubrification mais ne prend pas de jeu.



13. Rotules radiales : $C_{acier/acier} = C_{acier/PTFE}$; C_{O1} (acier/acier) ; C_{O2} (PTFE/acier).

| Rotules radiales – Extrait série E – NF ISO 12240-1 | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------------|--------|---------|----------------|----------------|--|
| d (mm) | D (mm) | B (mm) | b (mm) | α (°) | R (mm) | C (daN) | C_{O1} (daN) | C_{O2} (daN) | |
| 6 | 14 | 6 | 4 | 13 | 5 | 340 | 1 700 | 900 | |
| 8 | 16 | 8 | 5 | 15 | 6,5 | 550 | 2 750 | 1 460 | |
| 10 | 19 | 9 | 6 | 12 | 8 | 815 | 4 050 | 2 160 | |
| 12 | 22 | 10 | 7 | 11 | 9 | 1 080 | 5 400 | 2 850 | |
| 15 | 26 | 12 | 9 | 8 | 11 | 1 700 | 8 500 | 4 400 | |
| 17 | 30 | 14 | 10 | 10 | 12,5 | 2 120 | 10 600 | 5 600 | |
| 20 | 35 | 16 | 12 | 9 | 14,5 | 3 000 | 14 600 | 7 800 | |
| 25 | 42 | 20 | 16 | 7 | 18 | 4 800 | 24 000 | 12 700 | |
| 30 | 47 | 22 | 18 | 6 | 20,5 | 6 200 | 31 000 | 16 600 | |
| 35 | 55 | 25 | 20 | 6 | 23,5 | 8 000 | 40 000 | 22 400 | |
| 40 | 62 | 28 | 22 | 7 | 26,5 | 10 000 | 50 000 | 28 000 | |
| 45 | 68 | 32 | 25 | 7 | 30 | 12 700 | 64 000 | 36 000 | |
| 50 | 75 | 35 | 28 | 6 | 33 | 15 600 | 78 000 | 44 000 | |
| 60 | 90 | 44 | 36 | 6 | 40 | 24 500 | 122 000 | 69 500 | |
| 70 | 105 | 49 | 40 | 6 | 46 | 31 500 | 156 000 | 88 000 | |
| 80 | 120 | 55 | 45 | 6 | 52,5 | 40 000 | 200 000 | 114 000 | |



14. Rotules à contact oblique : C et C_{O1} cas acier/acier ; cas PTFE/acier : C_{O2} et C_2 ; $\alpha \leq 3^\circ$.

| Rotules à contact oblique – Extrait série A – NF ISO 12240-2 | | | | | | | | |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------|----------------|-------------|----------------|
| d ₂ (mm) | D ₂ (mm) | B ₂ (mm) | b ₂ (mm) | R ₂ (mm) | C (daN) | C_{O1} (daN) | C_2 (daN) | C_{O2} (daN) |
| 25 | 47 | 15 | 14 | 21 | 4 750 | 23 600 | 7 100 | 14 000 |
| 28 | 52 | 16 | 15 | 23,5 | 6 000 | 30 000 | 9 000 | 18 000 |
| 30 | 50 | 17 | 16 | 25 | 6 300 | 33 500 | 9 500 | 19 000 |
| 32 | 58 | 17 | 16 | 26,5 | 6 800 | 37 000 | 10 200 | 20 500 |
| 35 | 62 | 18 | 17 | 28 | 7 700 | 43 000 | 11 600 | 23 000 |
| 40 | 68 | 19 | 18 | 30 | 9 000 | 49 500 | 13 400 | 27 000 |
| 45 | 75 | 20 | 19 | 33 | 10 600 | 58 000 | 16 000 | 32 000 |
| 50 | 80 | 20 | 19 | 37 | 11 800 | 65 000 | 17 800 | 36 000 |
| 55 | 90 | 23 | 22 | 40 | 14 600 | 82 000 | 22 000 | 44 000 |
| 60 | 95 | 23 | 22 | 43 | 16 000 | 87 000 | 24 000 | 48 000 |
| 65 | 100 | 23 | 22 | 46 | 17 300 | 96 000 | 26 000 | 52 000 |
| 70 | 110 | 25 | 24 | 51 | 20 800 | 114 000 | 31 500 | 63 000 |
| 80 | 125 | 29 | 27 | 57,5 | 25 000 | 140 000 | 37 500 | 75 000 |

| Ajustements recommandés pour le montage des rotules | | | | | | |
|---|----------------|-------|----------------|-----------|--------------------|-----------|
| rotules radiales et rotules à contact oblique | | arbre | logement acier | | logement aluminium | |
| | | | B.I.T.C.* | B.E.T.C.* | B.I.T.C.* | B.E.T.C.* |
| acier sur acier | charge normale | k6 | J7 | K7 | K7 | M7 |
| | charge élevée | m6 | J7 | N7 | K7 | P7 |
| acier/PTFE | charge normale | h6 | H7 | H7 | J7 | M7 |

* B.I.T.C. : bague intérieure tournante par rapport à la charge ; B.E.T.C. : bague extérieure tournante % charge.

24

ROULEMENTS ÉTUDE GÉNÉRALE

OBJECTIFS

- Indiquer les principaux constituants des roulements, principes de normalisation.
- Définir la résistance au roulement.
- Décrire les principaux types de roulements et préciser les critères de choix.

L'idée qui consiste à remplacer le glissement avec frottement par du roulement remonte à l'Antiquité. Les Assyriens et les Égyptiens utilisèrent ce principe pour construire leurs édifices. Dès cette époque, les axes des chariots commencèrent à utiliser des sortes de roulements à rouleaux. C'est Léonard de Vinci, au XV^e siècle, qui le premier approcha les formes des roulements actuels. L'industrialisation à la fin du XIX^e siècle, les premières productions en série d'automobiles, de cycles et de machines diverses entraînèrent leur essor.

En 1920 la normalisation commence. La technique du roulement est aujourd'hui à maturité, elle est soumise aux normes internationales... Composants de base d'un grand nombre de machines les roulements, moins de 1 mm à plus de 7 m, sont des pièces de précision et de qualité. Plusieurs milliards en sont fabriqués chaque année, les deux tiers sont des roulements rigides à billes (à contact radial).

Vocabulaire général NF ISO 5593.

Définitions et Tolérances NF ISO 1132 ;

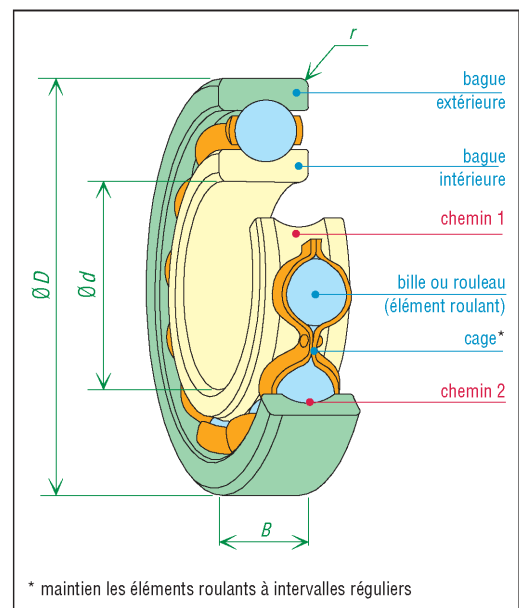
Symboles NF ISO 15241.

I - Généralités

1. Constitution des roulements

Principaux éléments d'un roulement :

- La bague extérieure : qui se positionne dans le logement.
- La bague intérieure : qui s'ajuste sur l'arbre.
- Les éléments roulants : billes ou rouleaux de formes et matériaux divers qui roulent sur les chemins des deux bagues.
- La cage : qui maintient les éléments roulants à intervalles réguliers.

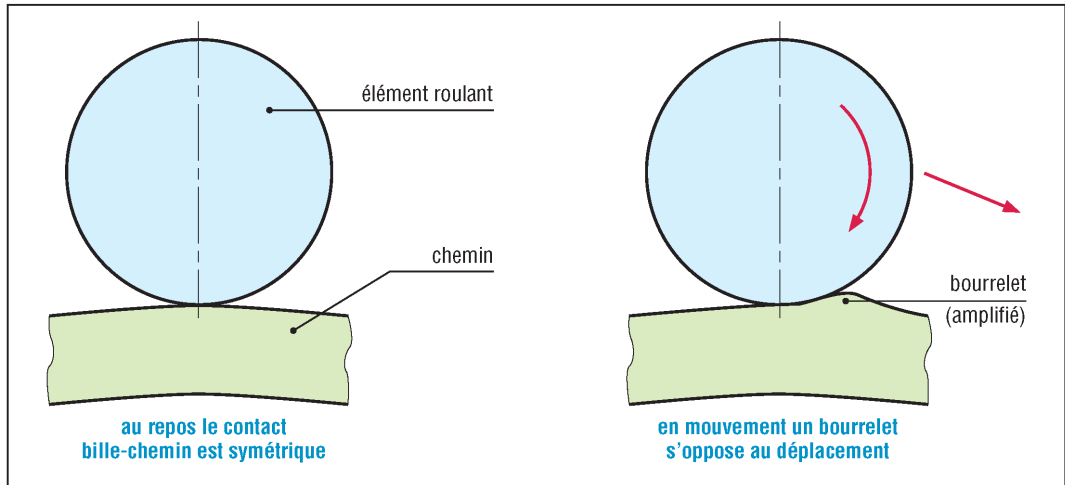


1. Constitution d'un roulement rigide à billes.

2. Phénomène de résistance au roulement

Sous charge, la zone de contact entre chemin et élément roulant se comprime, puis se détend après passage, comme un ressort. En mouvement, il en résulte, devant l'élément roulant, la formation d'un bourrelet métallique s'opposant au mouvement. C'est le phénomène de résistance au roulement.

À ce phénomène, s'ajoute parfois des frottements parasites supplémentaires entre éléments roulants et certaines parties des chemins.



2. Phénomène de résistance au roulement.

Couple de résistance au roulement (C_f) : il permet d'évaluer la résistance générale à l'avancement (en rotation) d'un roulement. Sa valeur approximative est :

$$C_f = f \cdot F_r \cdot R_m$$

avec f : « frottement interne » du roulement
 F_r : charge radiale exercée
 C_f : couple résistant
 R_m : rayon moyen = $(d + D)/2$

| roulements | rigides à billes | billes contact obl. | rouleaux cyl. | rouleaux coniq. | à aiguilles |
|--------------|------------------|---------------------|---------------|-----------------|-------------|
| f ou μ | 0,0015 | 0,0020 | 0,0011 | 0,0020 | 0,0025 |

Remarques : ces valeurs sont à comparer avec le frottement interne des coussinets variant entre 0,05 et 0,15 suivant les réalisations : Nylon, PTFE...

3. Charges supportées par les roulements

Les actions mécaniques de contact exercées par les éléments roulants sur l'une ou l'autre bague sont en général schématisées par des forces ou des charges.

On observe trois cas :

a) Charge radiale (F_r) : sa direction, perpendiculaire à l'axe de rotation, passe par le centre géométrique du roulement. F_r est toujours portée par un rayon, d'où le nom de charge radiale.

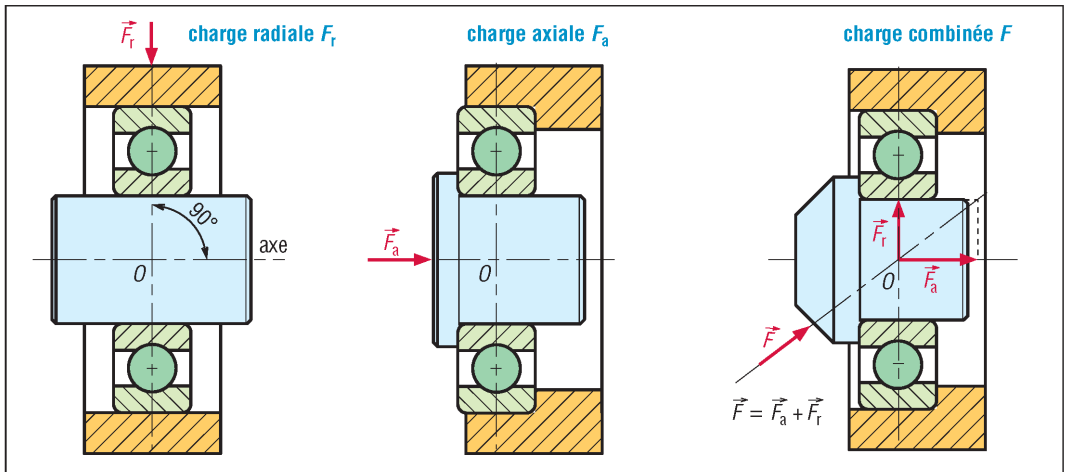
b) Charge axiale (F_a) : sa direction est celle de l'axe de rotation du roulement.

c) Charge combinée (F) : c'est la combinaison des deux cas précédents. La direction de F , quelconque, passe par le centre géométrique du roulement.

– La projection de F sur l'axe de rotation donne une composante axiale F_a .

– La projection de F sur un rayon perpendiculaire à l'axe donne une composante radiale F_r .

Remarque : F_a et F_r sont deux projections orthogonales possibles de F .



3. Charges supportées par un roulement.

4. Normalisation internationale des roulements (ISO)

Reprise par l'AFNOR, elle porte sur les dimensions, les tolérances de fabrication, les contrôles de qualités, les conditions d'utilisation, les méthodes de calculs et les accessoires utilisés : écrous à encoches, manchons coniques...

a) Désignation

The chart details the ISO bearing designation system. It includes a grid for 'Séries de diamètres' (0-5) and 'Séries de largeurs' (0-5). Below this is a table for 'Séries de dimensions' with columns for different diameter ranges and rows for 'Symbole alésage (mm)' and 'alésage (mm)'. A legend defines suffixes (E: acier cémenté, F: acier inoxydable, H: acier pour hautes vitesses, L: bague libre de rlt séparable, R: roulement séparable...) and prefixes (6: rlt rigide à billes, 3: 03, 07: d = 35).

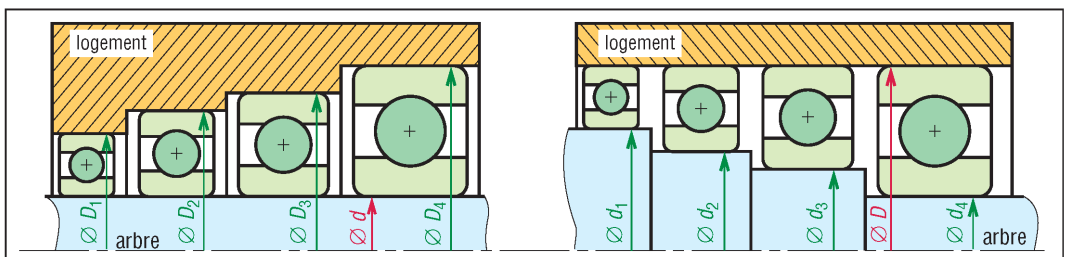
The example designation **6307 2ZNR** is broken down as follows:

- 6**: Prefix (rigid ball bearing)
- 3**: Prefix (03 series)
- 07**: Prefix (d = 35 mm)
- 2**: Suffix (2 flanges)
- Z**: Suffix (special cage)
- N**: Suffix (special tolerance)
- R**: Suffix (separable bearing)

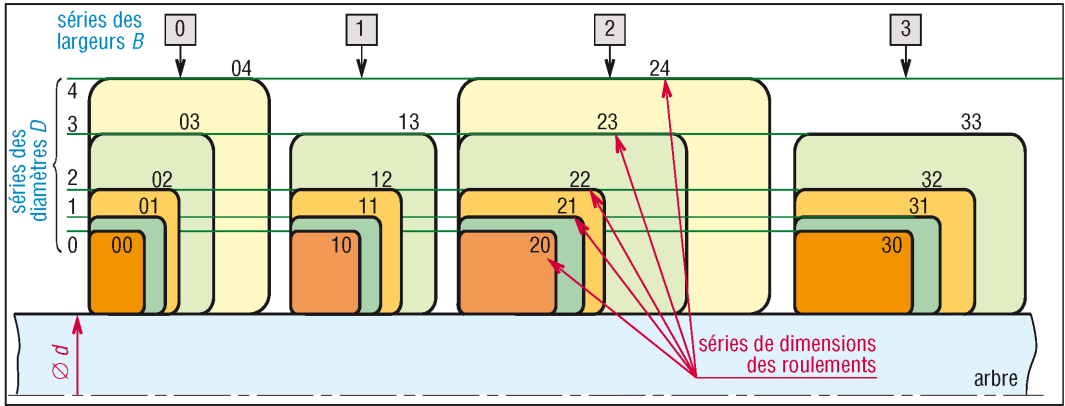
4. Désignation normalisée des roulements. 6 : rlt rigide à billes ; 3 = 03, largeur 0, Ø3 ; 07 : d = 35.

Remarque : le numéro complémentaire précise les particularités : cages, flasques, joints, jeu interne, tolérances, lubrifiant, exigences spéciales... 2 ZNR = 2 flasques + rainure + segment d'arrêt.

b) Normalisation des dimensions : les principales dimensions normalisées sont le diamètre de l'alésage du roulement (d), le diamètre extérieur (D), la largeur (B) et le rayon de l'arrondi des bagues (r). Pour un même alésage d , plusieurs D (séries : 7-8-9-0-1-2-3-4) sont possibles et inversement. Pour un même couple (d et D), plusieurs largeurs B sont possibles (séries de largeurs : 0-1-2-3-4) (fig. 6). Tolérances dimensionnelles et géométriques : NF ISO 92 et 199.



5. À un même diamètre d'arbre correspond plusieurs diamètres extérieurs D , et inversement.



6. Séries de diamètres (autres cas : 8-9) et séries de largeurs (autres cas : 4-5-6-8).

c) Normalisation des classes de tolérances du jeu interne et des matériaux

Cinq classes de tolérances sont proposées : 0-6-5-4-2 avec des caractéristiques de plus en plus serrées en allant de 0 à 2. La classe 0 est la plus courante : roulements sans spécifications particulières. De la même manière il existe cinq catégories de jeu interne (C_1 à C_5).

Pour chaque classe sont définies : la précision des dimensions (d , D , B et r), le voilage axial, le voilage radial, le faux rond et le parallélisme des faces latérales.

| Groupes d'aciers | Principales nuances normalisées NF EN ISO683-17 |
|----------------------------|---|
| trempe à cœur (1 à 2 % Cr) | 100 Cr6 ; 100 CrMnSi6-4 ; 100 CrMo7 ; 100 CrMo7-4 ; 100 CrMnMoSi8-4-6 |
| cémentation | 20 Cr3 ; 20 Cr4 ; 20MnCr4-2 ; 19 MnCr5 ; 20 CrMo4 ; 20 NiCrMo7... |
| trempe par induction | C56E2 ; 56 Mn4 ; 70 Mn4 ; 43 CrMo4 |
| aciers inoxydables | X47Cr14 ; X65Cr14 ; X108CrMo17 ; X89CrMoV18-1 ; X40CrMoVN16-12 |
| résistant à chaud | 35CrMoV12-9 ; 80MoCrV42-16 ; 13MoCrNi42-16-14 ; X75WCrV18-4-1... |

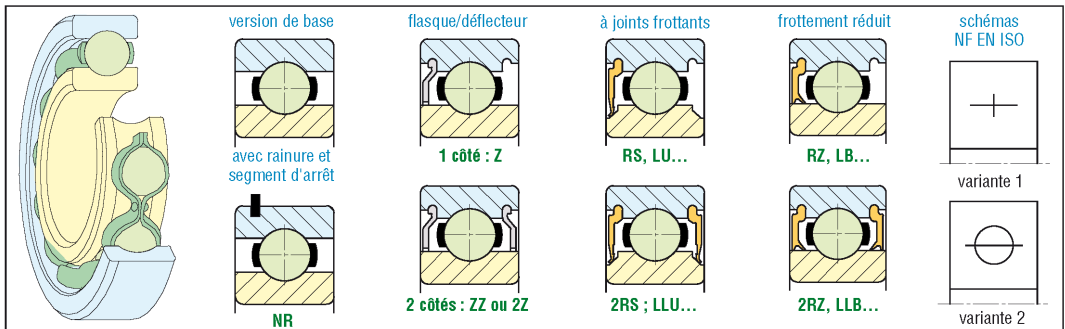
– Autres matériaux : oxydes d'aluminium, céramiques (nitride silicium), plastiques, etc. ($T \geq 550$ °C). Les cages des roulements sont fabriqués en acier, en polyamide, en bronze...

II – Différents types de roulements

1. Roulements à billes

a) Roulements à billes à contact radial : très économiques, ce sont les plus utilisés en petites et moyennes dimensions. Ils supportent tous les types de charges (modérées à moyennes) : axiales, radiales et combinées. Sous charge, ils se comportent comme un roulement à contact oblique dont l'angle d'inclinaison (α) serait variable.

Variantes : versions avec rainure et segment d'arrêt, versions étanches d'un ou des deux côtés (étanchéité par flasques en tôle ou par joints élastomères). Les versions étanches des deux côtés sont graissées à vie.

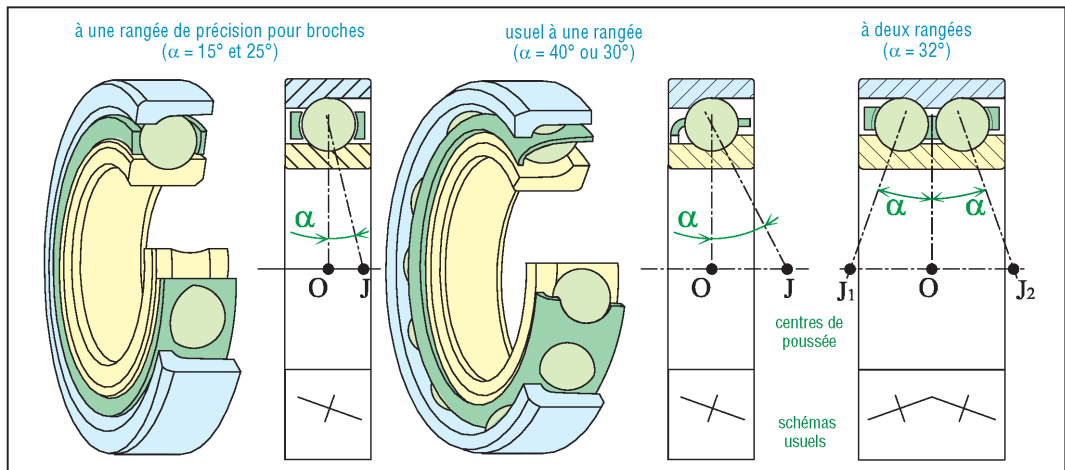


7. Principaux roulements rigides à billes (ou à gorges profondes ou contact radial). Schémas : voir aussi page 610.

b) Roulements à contact oblique : ils supportent tous les types de charge mais uniquement des charges axiales dans un seul sens (point d'application le centre de poussée J). Les bagues ne sont pas séparables. Les angles α de 15° , 25° et 40° sont les plus courants.

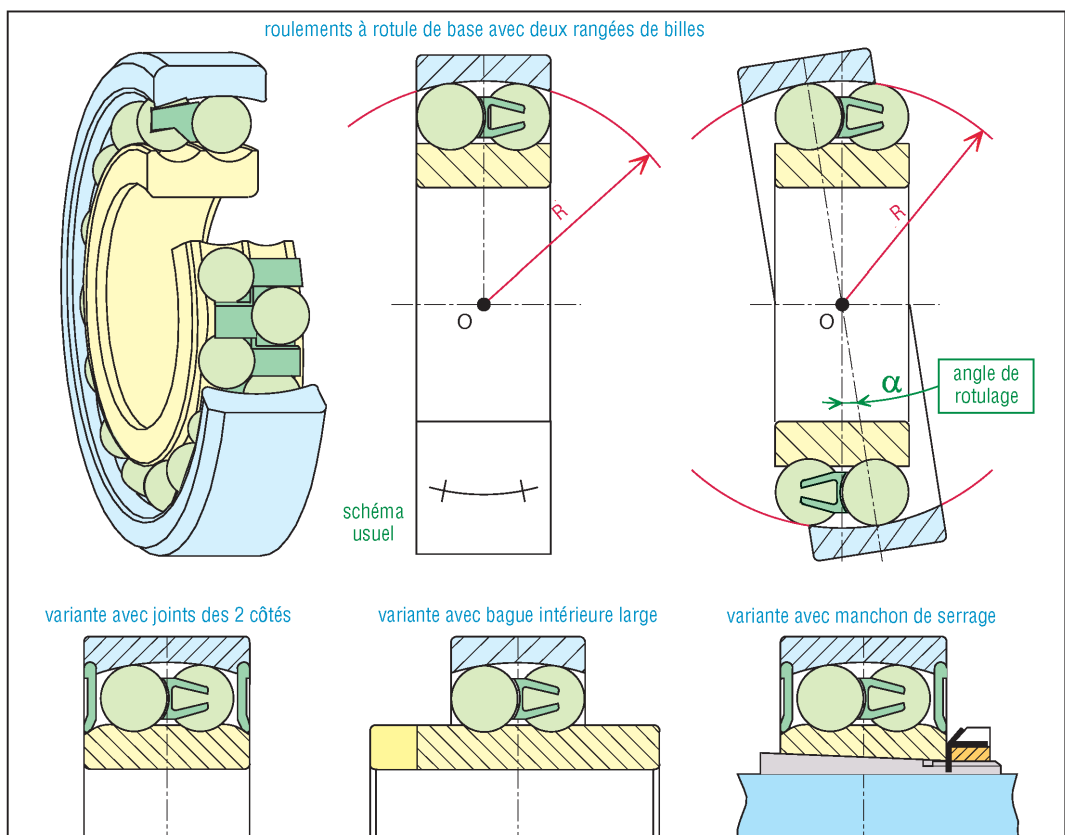
Ils doivent être montés au minimum par paire et en opposition ; ils offrent la possibilité de régler le jeu interne de la liaison par précharge du montage.

La version à deux rangées peut être utilisée seule (cas d'arbre court).



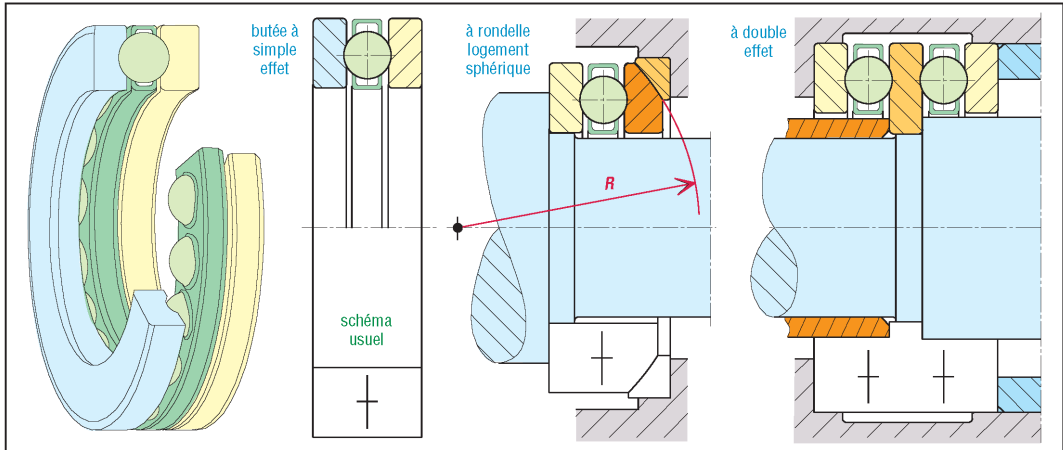
8. Roulements à contact oblique et schématisation (voir aussi page 610).

c) Roulements à rotule sur billes : le chemin extérieur est sphérique. Ils supportent tous les types de charges, mais faiblement les charges axiales. L'angle de rotulage, assez important (entre $2,5$ et 4°), autorisent les défauts d'alignement des portées de paliers et des flexions d'arbres élevées. Les variantes à alésage conique s'utilisent avec des manchons de serrage ou de démontage (pour montage sur arbre lisse avec paliers « semelle ou applique »).



9. Roulement à rotule sur billes.

d) Butées à billes : peu utilisées, elles supportent des charges axiales uniquement dans un seul sens. Les vitesses de rotation sont limitées à cause de la force centrifuge sur les billes. Certaines versions ont des rondelles sphériques pour compenser des défauts d'alignement. Ne réalisant aucun centrage arbre/logement, elles doivent être montées avec d'autres types de roulements.



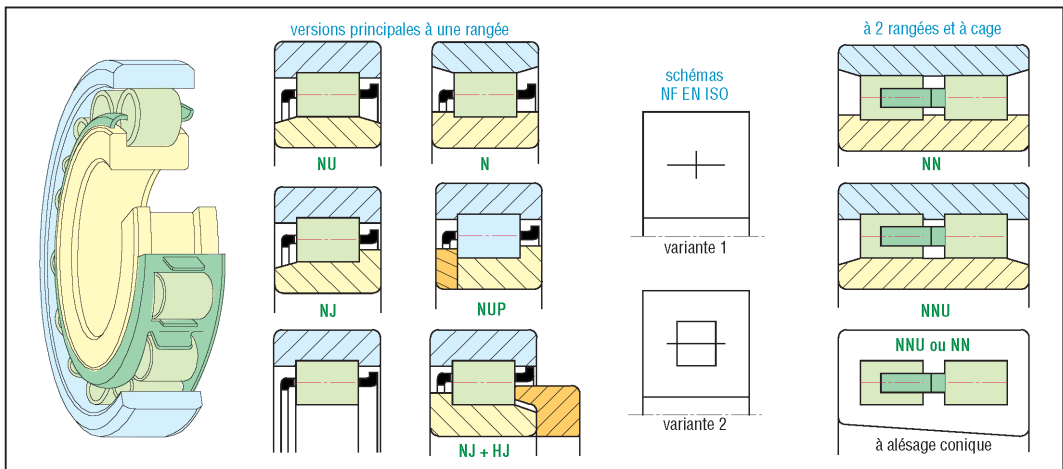
10. Butées à billes.

2. Roulements à rouleaux

L'effort de contact rouleau/chemin est réparti sur une ligne (un « point » dans le cas des billes). En conséquence, à taille identique, ils supportent des charges plus élevées que les roulements à billes (capacités de charge plus élevées).

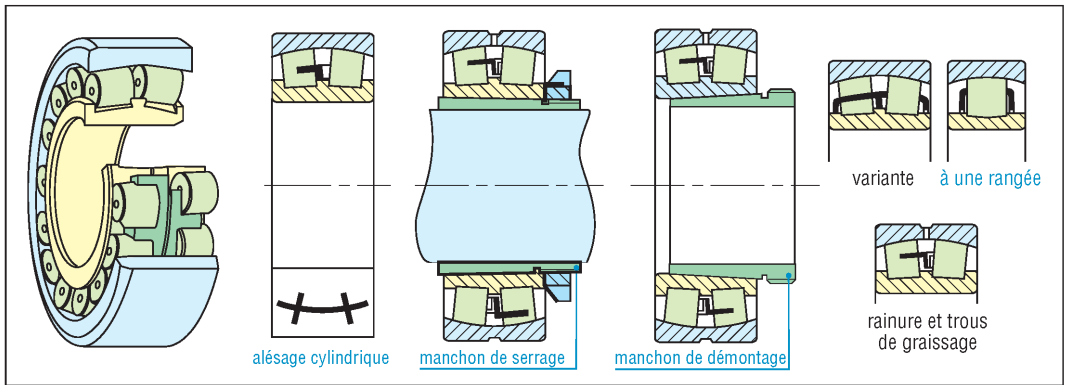
Ils sont conseillés en cas de chocs, vibrations et surcharges possibles. En revanche, les vitesses de rotation permises sont un peu plus faibles et ils sont plus coûteux.

a) Roulements à rouleaux cylindriques : ils supportent des charges radiales importantes mais pas les charges axiales, sauf les versions épaulées NJ avec $F_a \approx F_r/10$. Les vitesses de rotation permises sont assez élevées. Les deux bagues sont dissociables ou séparables, ce qui facilite les montages et démontages. Ils compensent peu, ou pas, les défauts d'alignement et les flexions d'arbres, les versions à deux rangées ne compensant rien. En conséquence, les portées d'arbre et de logement devront présenter une très bonne coaxialité.



11. Principaux roulements à rouleaux cylindriques et schémas usuels (voir aussi page 610).

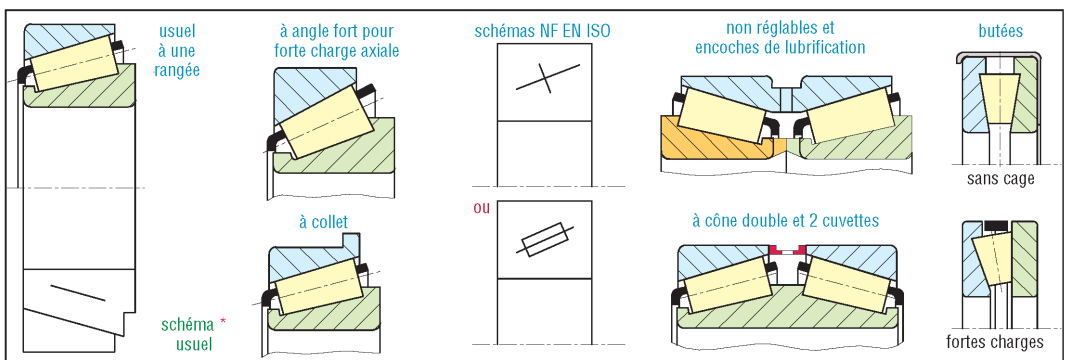
b) Roulements à rotule sur rouleaux : ils présentent les mêmes caractéristiques que les versions sur billes. Les rouleaux ont la forme de tonnelets. La capacité de charge est très élevée et les vitesses permises modérées. Les frottements internes élevés imposent une lubrification à l'huile.



12. Roulements à rotule sur rouleaux.

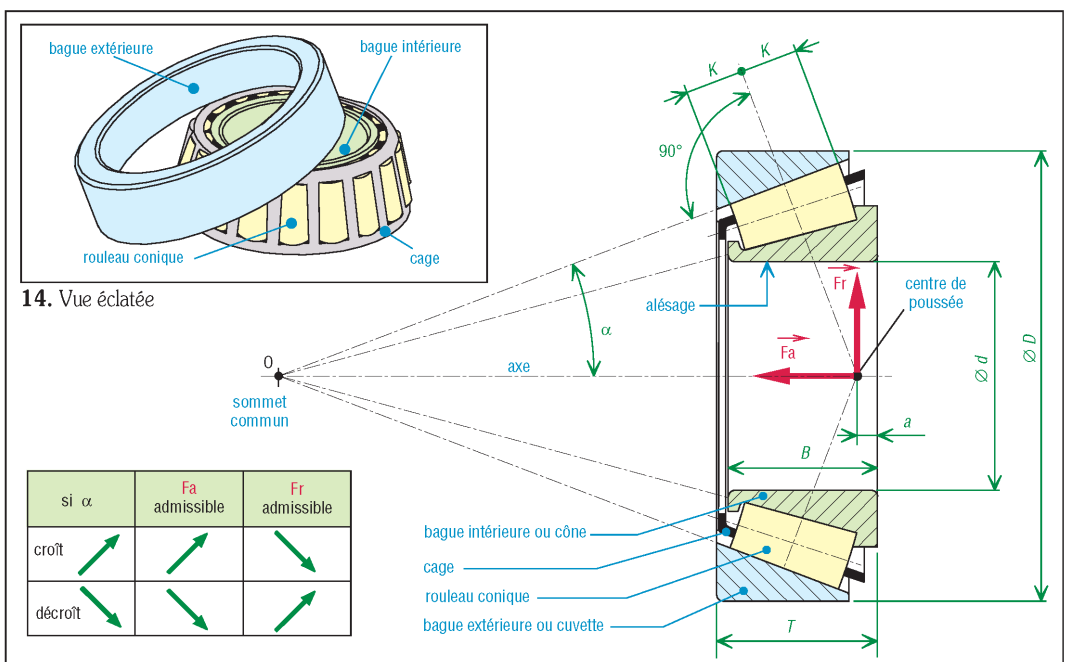
c) Roulements à rouleaux coniques : ils présentent les mêmes principes que les billes à contact oblique : P , point d'application des charges ; charges axiales dans un seul sens ; montage minimum par paire et en opposition ; possibilité de réglage du jeu interne de fonctionnement par précharge. **Désignation : NF ISO 10317.**

Les rouleaux ont une forme conique. Tous les cônes des bagues et des rouleaux ont même sommet. Les fréquences de rotation permises sont moyennes. La bague extérieure est séparable. Ils sont très appréciés là où le gain de poids et de place sont recherchés, le rapport « capacité de charge/poids » est élevé (aviation, automobile...).



13. Roulements à rouleaux coniques : principales variantes et schématisation (voir aussi page 610).

* ancienne norme



15. Caractéristiques générales des roulements à rouleaux coniques.

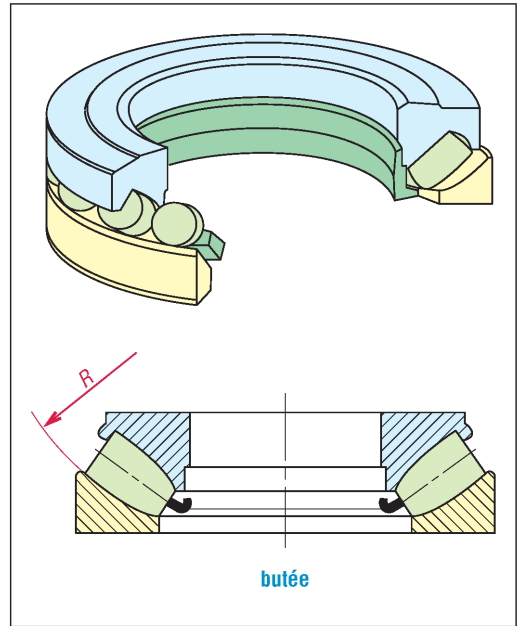
d) Butées à rotule sur rouleaux

Elles se comportent comme une rotule et supportent des charges axiales élevées. La vitesse de rotation doit être modérée. Elles sont généralement lubrifiées à l'huile (pour grosse machinerie).

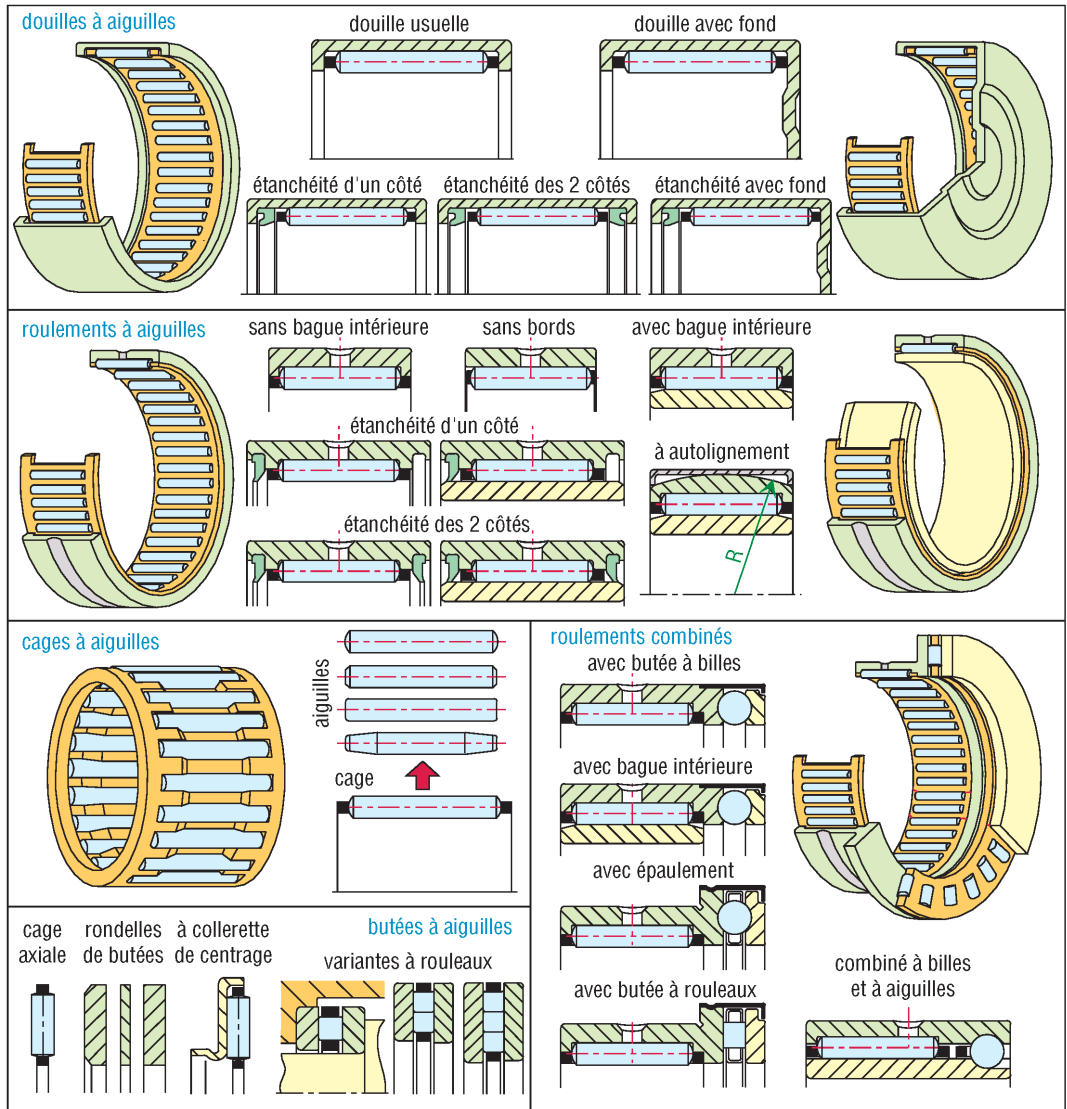
e) Roulements à aiguilles

Souvent utilisés, comparables aux roulements à rouleaux cylindriques, ils sont peu encombrants radialement et de prix modique ; ils supportent uniquement des charges radiales. Il existe un grand nombre de variantes et certaines ne sont pas normalisées.

Ils peuvent être montés sans bague intérieure (douilles et roulements) et même sans bague extérieure (cages à aiguilles). La dureté requise des chemins en contact avec les éléments roulants doit être au minimum de 58 HRC (R_a de l'ordre de 0,4 maxi).



16. Roulement à rotule sur rouleaux. Schéma page 610.



17. Roulements, douilles et cages à aiguilles : principales variantes. Voir schématisation page 610.

III – Choix d'un type de roulement

Il est toujours judicieux d'envisager au préalable une solution utilisant les roulements les plus économiques : billes à contact radial, rouleaux cylindriques et aiguilles. À eux seuls ils représentent plus de 80 % des roulements vendus.

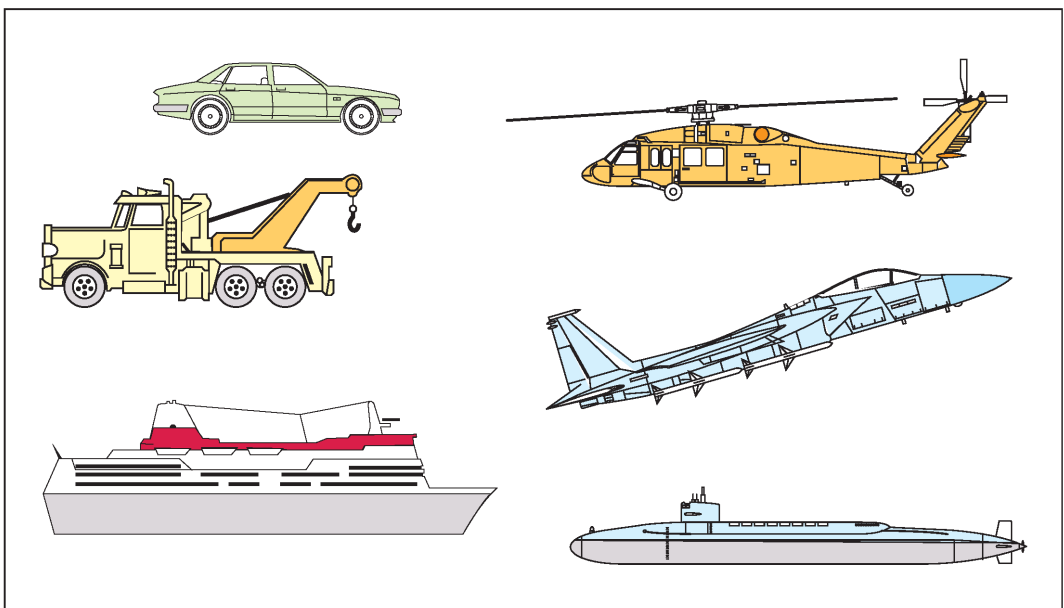
Un roulement plus coûteux au départ peut parfois simplifier le montage, les opérations de maintenance et diminuer le coup global d'un appareil.

Critères de choix


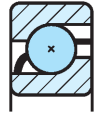
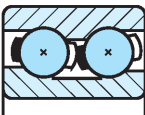
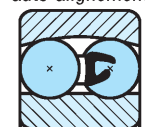
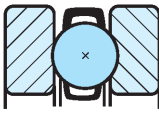



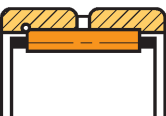
- Nature des charges : axiale, radiale ou combinée.
- Importance des charges (intensité).
- Vitesse de rotation.
- Perturbations : chocs, vibrations, niveau sonore...
- Montage et démontage : mise en place, accessibilité, réglage...
- Précision exigée : coaxialité, faux rond, précision de rotation...
- Rigidité exigée : déformations admissibles, désalignement des paliers...
- Encombrement, place disponible, dimensions des roulements.
- Longévité, durée de vie souhaitée.
- Conditions ambiantes : pollution, températures, lubrification, prix et disponibilité...

Remarques :

- Les roulements à billes à contact radial conviennent parfaitement aux petits paliers fonctionnant à grande vitesse.
- Pour les gros paliers fortement chargés les roulements à rouleaux sont les seuls possibles.
- S'il y a des défauts d'alignement appréciables, les roulements à rotule sont à choisir.
- Certains roulements ne supportent qu'un type de charge : axiale pour les butées, radiale pour les aiguilles et les rouleaux cylindriques non épaulés.
- Les roulements à rouleaux coniques supportent, à dimensions et à masse égale, des charges combinées plus élevées que les billes à contact radial. Le réglage automatisé du jeu est possible en grandes séries. Ils sont utilisés dans de nombreuses transmissions : automobiles, camions, hélicoptères, avions, bateaux ...



18. Exemples d'objets ou systèmes utilisant des liaisons par roulements.

| Guide comparatif des principaux roulements de base | | charges admissibles | | | aptitude à la vitesse | fonctionnement silencieux | rigidité élevée | aptitude au désalignement | angle de rotulage |
|--|--|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------|
| | | radiale | axiale | combinée | | | | | |
| roulements à billes |  une rangée à contact radial | ** | * ↔ | ** | ***** | ***** | * | * | 2 à 16' |
| |  une rangée à contact oblique | ** | 15° ** ← 40° *** 40° | 15° ** 40° *** | 15° ***** 40° *** | *** | * | * | 1 à 2' |
| |  deux rangées à contact oblique | *** | ** ↔ | *** | ** | * | ** | 0 | ≈ 0 |
| |  sphérique à auto-alignement | * | * à ≈ 0 ↔ | * | ** | * | 0 | *** | 2 à 4° |
| |  butée à une rangée | 0 | ** ← | 0 | * | * | * | 0 | 0 |
| roulements à rouleaux |  cylindrique à une rangée | **** | 0 | 0 | ***** | ** | *** | * | 1 à 7' |
| |  conique à une rangée | *** | *** ← | ***** | *** | ** | ** | * | 1 à 4' |
| |  sphérique à auto-alignement | **** | ** ↔ | ***** | ** | * | *** | *** | 0,5 à 2° |
| |  à aiguilles | *** | 0 | 0 | *** | ** | ** | 0 | 0 à 2' |
| | | ↔ 2 sens | ← 1 sens | **** excellent | *** bon | ** moyen | * faible | 0 inadapté | |

25

MONTAGES DE ROULEMENTS RÈGLES USUELLES

OBJECTIFS

- Indiquer les règles usuelles concernant la conception des montages de roulements : choix des ajustements, fixation latérale des bagues, choix du graissage et de l'étanchéité.
- Exemples typiques de montage.

Dans les machines évoluées, automatisées ou non, les liaisons mécaniques du type pivot, réalisées par roulements, sont parmi les plus nombreuses. Elles reviennent régulièrement dans les projets.

Sur le plan pédagogique, les montages de roulements, avec les engrenages et divers éléments de construction, sont particulièrement intéressants car ils permettent les premiers contacts avec la conception des systèmes mécaniques évolués et la notion de projet. L'étudiant, placé en situation d'inventeur ou d'ingénieur, doit faire travailler son imagination, son esprit créatif et utiliser judicieusement certaines notions développées dans cet ouvrage : dessin industriel, normalisation, méthodes d'analyses, qualité, connaissance des composants...

I – Remarques et suggestions pour la conception

Le choix du type de roulement effectué, la conception d'un montage de roulements comporte trois sortes de difficultés :

- Le choix des ajustements : arbre/bague intérieure et logement/bague extérieure.
- La fixation latérale des bagues de roulement ou « épaulements »
- L'étanchéité et le graissage.

Recommandations et suggestions :

- Faire une conception aussi simple que possible et utiliser un nombre total de pièces ou de composants aussi réduit que possible, ce qui améliore entre autre la fiabilité.
- Choisir les pièces auxiliaires nécessaires en priorité dans les séries normalisées : écrous à encoches, circlips, joints...
- Limiter le nombre des pièces « sur mesure » ou à fabriquer et les remplacer, chaque fois que c'est possible, par des composants normalisés.
- Veiller à la possibilité, à la facilité et à l'ordre de montage de toutes les pièces de l'ensemble. Éliminer les montages impossibles ou difficiles.

II - Choix des ajustements

1. Règle

En règle générale, chaque roulement d'un même montage a une bague ajustée serrée et l'autre ajustée avec jeu. Le jeu simplifie les assemblages, compense les dilatations et évite les oppositions mutuelles entre les roulements.

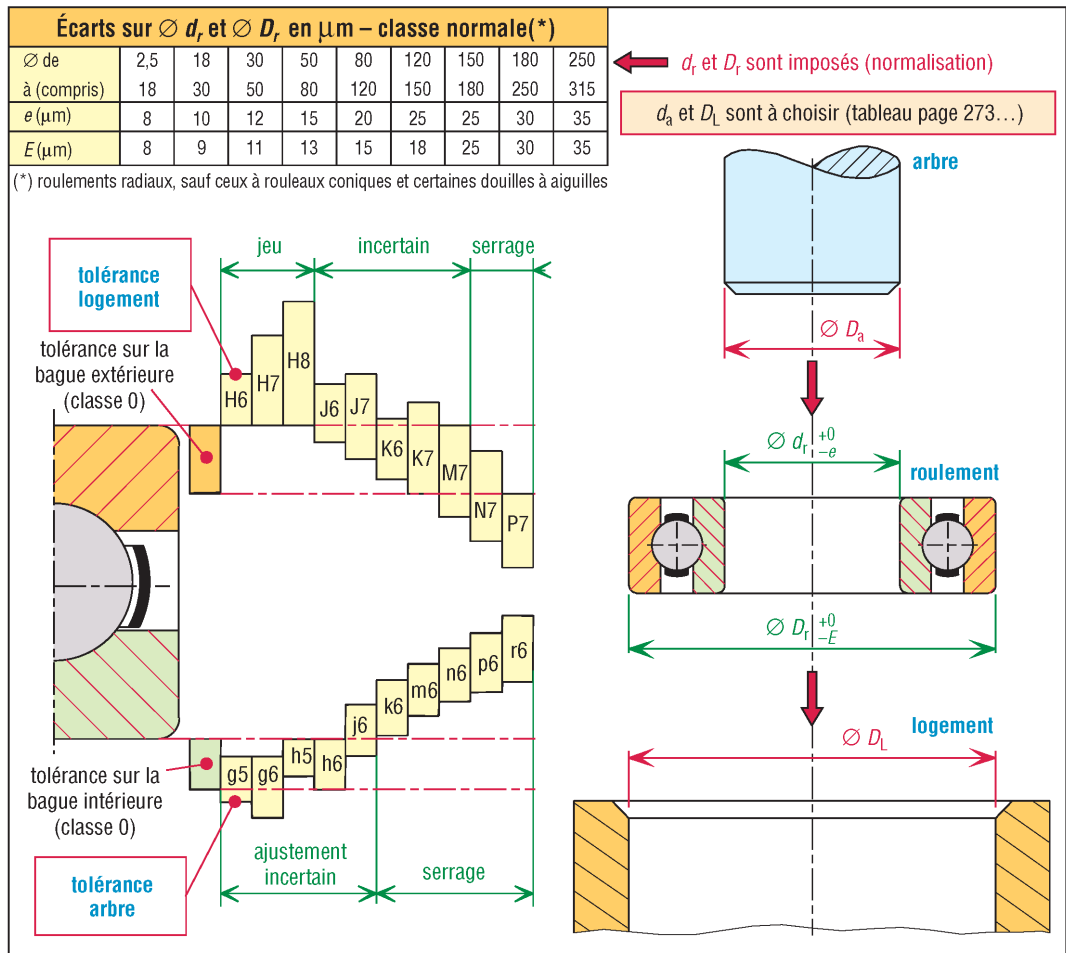
Règle : si une bague tourne par rapport à la direction de la charge exercée sur le roulement (F_a , F_r ou F), elle doit être ajustée avec serrage. Si elle est fixe, ou non tournante, par rapport à la direction de cette charge, elle doit être ajustée avec jeu.

Remarques :

- La charge est fixe par rapport à une bague lorsqu'elle agit toujours au même point pendant une révolution. Elle est tournante si, pendant une révolution, toute la circonférence de la bague reçoit la charge. Si la direction d'une charge forte n'est pas constante, elle sera assimilée à une charge tournante.
- Si une bague devant être montée serrée ne l'est pas, elle risque de subir un phénomène de détérioration par roulement. La bague est laminée entre les éléments roulants et l'arbre ou le logement.

2. Normalisation

Les diamètres d_r et D_r du roulement et leurs tolérances, domaine du fabricant, sont normalisés. Seuls les diamètres d_a (arbre) et D_L (logement) sont à choisir par le concepteur.



1. Ajustements, diamètres à choisir par le concepteur d'un montage. Classe normale = classe 0 = classe 6X = ABEC-1...

Les valeurs d'ajustements proposées dans le tableau ci-dessous sont normalisées pour des portées en acier ou en fonte. Il faut prendre des ajustements un peu plus serrés avec les alliages légers et les parois minces.

Remarque : les qualités 6 (arbres rectifiés) et 7 (logement rectifiés ou alésés fin) suffisent pour la plupart des constructions courantes.

Plus l'intensité de la charge exercée est grande, plus le serrage doit être accentué.

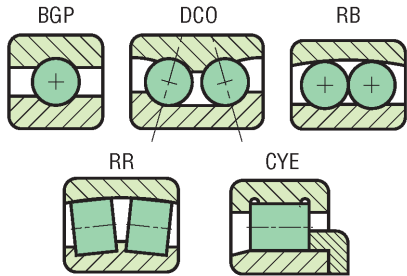
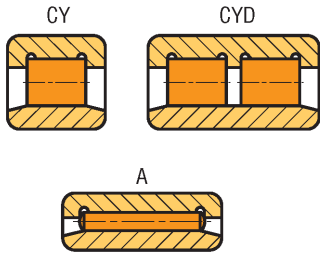
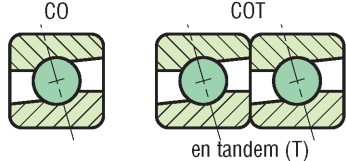
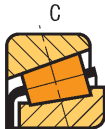
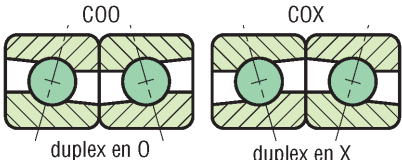
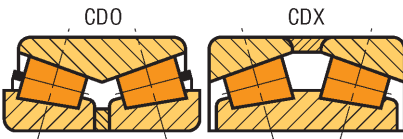
| Ajustements usuels des roulements (fabricants) | | | | | | | | | | | | |
|--|--|-----------------------------------|---|--|--------------------|--------------------|--------------------------------|--|-------------------------------|--|---------------------------------|--|
| particularités de la charge | roulements à billes (tous) | | roulements à rotule sur rouleaux | | | | roulements à rouleaux coniques | | | roulements à aiguilles sans bague intérieure | | |
| | | | $d \leq 40$ | $40 < d \leq 100$ | $100 < d \leq 140$ | $140 < d \leq 400$ | $d \leq 120$ | $120 < d \leq 180$ | $180 < d \leq 400$ | | | |
| | | | roulements à rix cylindr. + aiguilles avec b.i. | | | | | | | | | |
| | | $d \leq 100$ | $100 < d \leq 200$ | $d \leq 40$ | $40 < d \leq 140$ | $140 < d \leq 200$ | $200 < d \leq 400$ | | | | | |
| tolérance des arbres | charge tournante par rapport à la bague intérieure | faible $\frac{C}{P} > 10$ | j6 | k6 | j6 | k6 | m6 | | m6 | n6 | n6 | h5 (h6) si $d \leq 80$ g5 ($d > 80$) |
| | | normale $5 < \frac{C}{P} \leq 10$ | k6 (k5) | m6 (m5) | k6 (k5) | m6 (m5) | n6 | p6 | m6 | n6 | p6 | |
| | | forte $\frac{C}{P} \leq 5$ | k6 | m6 $d > 200$ n6 | - | n6 | p6 | r6 | n6 | p6 | r6 | |
| | charge fixe par rapport à la bague intérieure | g6 (BC) h6 (BNC) | | g6 (BC) h6 (bague intérieure non coulissante) | | | | g6 (BC) h6 (BNC) | | | g5 | |
| tolérance des logements | charge tournante par rapport à la bague extérieure | faible $\frac{C}{P} > 10$ | M7 | | M7 | | | | | | M7 | N7 douilles |
| | | normale $5 < \frac{C}{P} \leq 10$ | N7 | | N7 | | | | P7 ou R7 (forte charge) | | N7 | |
| | | forte $\frac{C}{P} \leq 5$ | P7 | | P7 | | | | | | P7 | |
| | charge fixe par rapport à la bague extérieure | H7 (BC) K6 (PR) G7 (EA) | | H7 (bague coulissante) K6 (PR) G7 (EA) | | | | bague ext. réglable bague ext. non réglable | | J7 P7 (R7) | H7 (bague coulissante) ou J7 | |

BNC : bague non coulissante ; BC : bague coulissante ; PR : précision de rotation ; EA : si échauffement de l'arbre.

| Ajustements : cas des butées ou roulements axiaux | | | | | | | | |
|---|--|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------|---|----------|
| particularités de la charge | tolérance des arbres | | tolérance des logements | | | | | |
| | butées à billes et à rouleaux cylindriques | à rotule sur rouleaux | à billes et à rouleaux cylindriques | à rotule sur rouleaux | | | | |
| axiale pure (centrée) | h6 | h6 | H8 (billes) H7 (rouleaux) | E8 G7 (charge forte) | | | | |
| charge fixe sur rondelle arbre (tourne % logement) | / | | / | | K7 (usuel) M7 (forte charge) | | | |
| charge tournante sur rondelle arbre ou indéterminée | | | | | k6 | $d \leq 200$ | / | J7 ou H7 |
| | | | | | m6 | $200 < d \leq 400$ | | |
| | n6 | $d > 400$ | | | | | | |

III – Fixation latérale des bagues de roulements

Elle dépend d'abord de la nature des roulements utilisés : bagues séparables ou non, etc. Les roulements exigeant un montage en opposition (rouleaux coniques et contacts obliques) sont étudiés au paragraphe 3.

| Règles de montage | | |
|---|---|---|
| règles | roulements à bagues non séparables | roulements à bagues séparables |
| cas général (pages 274 à 279) |  <p>BGP DCO RB</p> <p>RR CYE</p> |  <p>CY CYD</p> <p>A</p> <p>(règles pages 282 et 283)</p> |
| cas exigeant un montage en opposition (pages 280 à 282) |  <p>CO COT</p> <p>en tandem (T)</p> |  <p>C</p> |
| groupements particuliers (combinaison des deux cas précédents) |  <p>COO COX</p> <p>duplex en O duplex en X</p> |  <p>CDO CDX</p> |

2. Règles de montage et symboles utilisés dans la figure 3 pour le repérage des roulements.

1. Règles

a) Les bagues, tournantes par rapport à la charge et ajustées serrées, doivent être fixées latéralement ou « épaulées » des deux côtés.

b) La fixation latérale des bagues ajustées avec jeu, ou montées glissantes, doit tenir compte des points suivants :

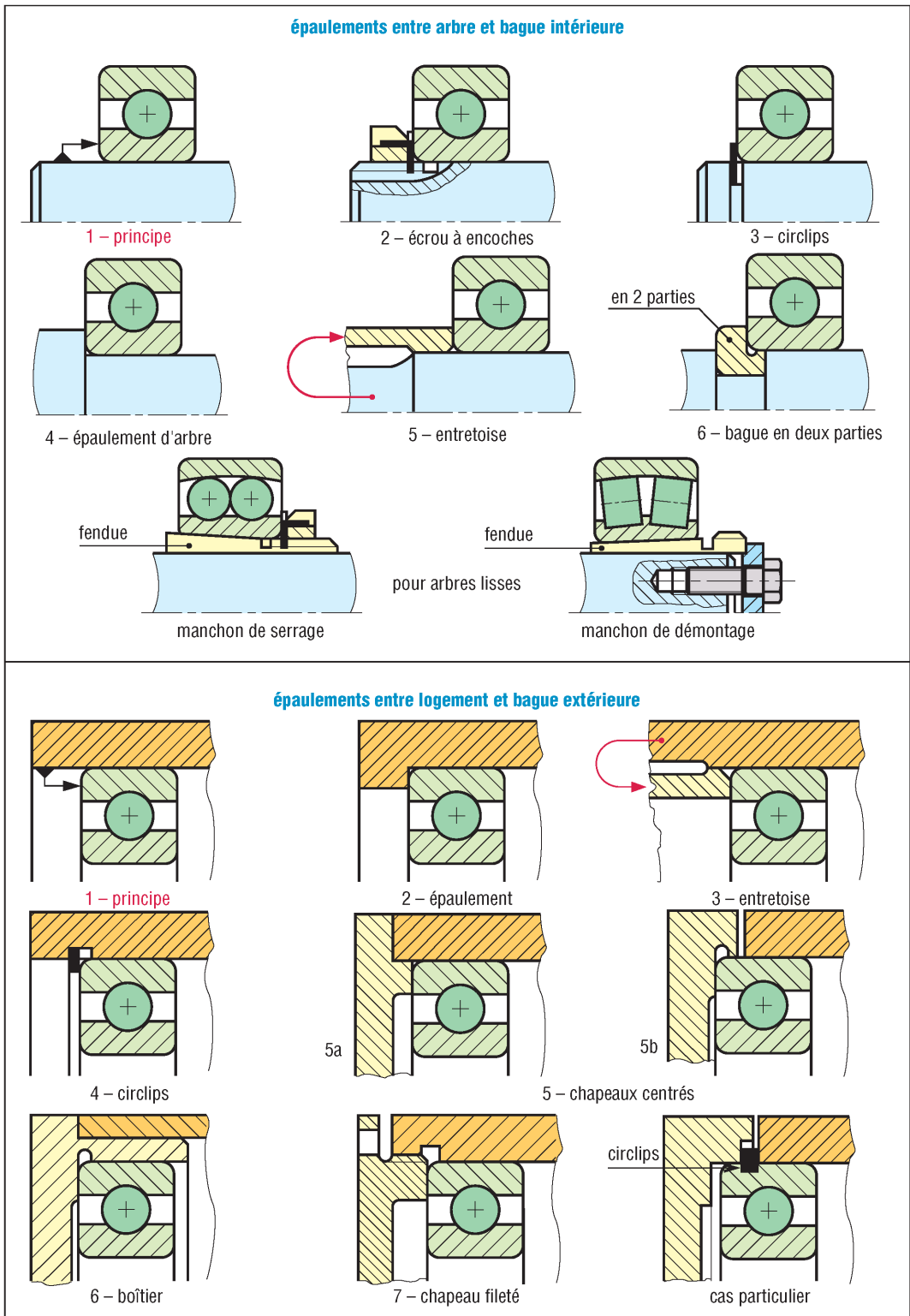
- Éliminer toutes les translations possibles de l'arbre par rapport au logement.
- Éviter les oppositions mutuelles entre roulements (voir remarque).
- Éliminer les mouvements internes parasites : translation d'un roulement ou d'une bague séparable sous l'action des charges...
- Supporter au mieux les charges axiales : à partir du plus gros roulement, etc.

Remarque : il faut éviter une fixation latérale surabondante. La conjugaison d'un trop grand nombre d'épaulements ou d'épaulements mal choisis avec les ajustements serrés peut entraîner une opposition mutuelle entre roulements.

Amplifiée par les dilatations et les tolérances de fabrication, cette opposition crée des tensions internes, diminue la durée de vie de la liaison et peut provoquer sa destruction rapide.

| solutions N° | Combinaisons usuelles des épaulements (cas général) | bague intérieure tournante/charge | | | bague extérieure tournante/charge | | | exemples : BGP + BGP BGP + DCO RB + RB , COO + COO |
|--------------|--|--|---|---|--|---|---|---|
| | | cas de 2 roulements à bagues non séparables | | | cas où l'un des 2 roulements est à bagues séparables | | | exemples : BGP + CY DCO + CY COO + CY |
| | | | | | | | | remarques |
| ① | | ● | | | ● | | | souvent utilisé, n'exige pas un jeu axial de fonctionnement, montage facile avec des roulements différents |
| ② | | | | ● | | ● | | idem ci-dessus mais moins utilisé |
| ③ | | ● | | | ● | | | solution 3 : les épaulements 1 et 6 peuvent être remplacés par des épaulements sur 2 et 5 avec la charge axiale dans un seul sens, les résultats sont meilleurs |
| ④ | | | | ● | | ● | | assez utilisés, exigent un léger jeu J pour éviter les oppositions mutuelles et compenser les dilatations ou une rondelle élastique à utiliser avec des liaisons courtes |
| ⑤ | | ● | ● | | | | ● | liaisons rigides pouvant supporter charges élevées, chocs et vibrations |
| ⑥ | | | | ● | | ● | | variante économique des cas 3 et 4 pour liaisons peu chargées (généralement sans charge axiale ou sous charge axiale faible selon type de roulements) |
| ⑦ | | ● | | | ● | | | |

3. Combinaisons usuelles des épaulements (cas général). Voir solutions technologiques usuelles page 276.

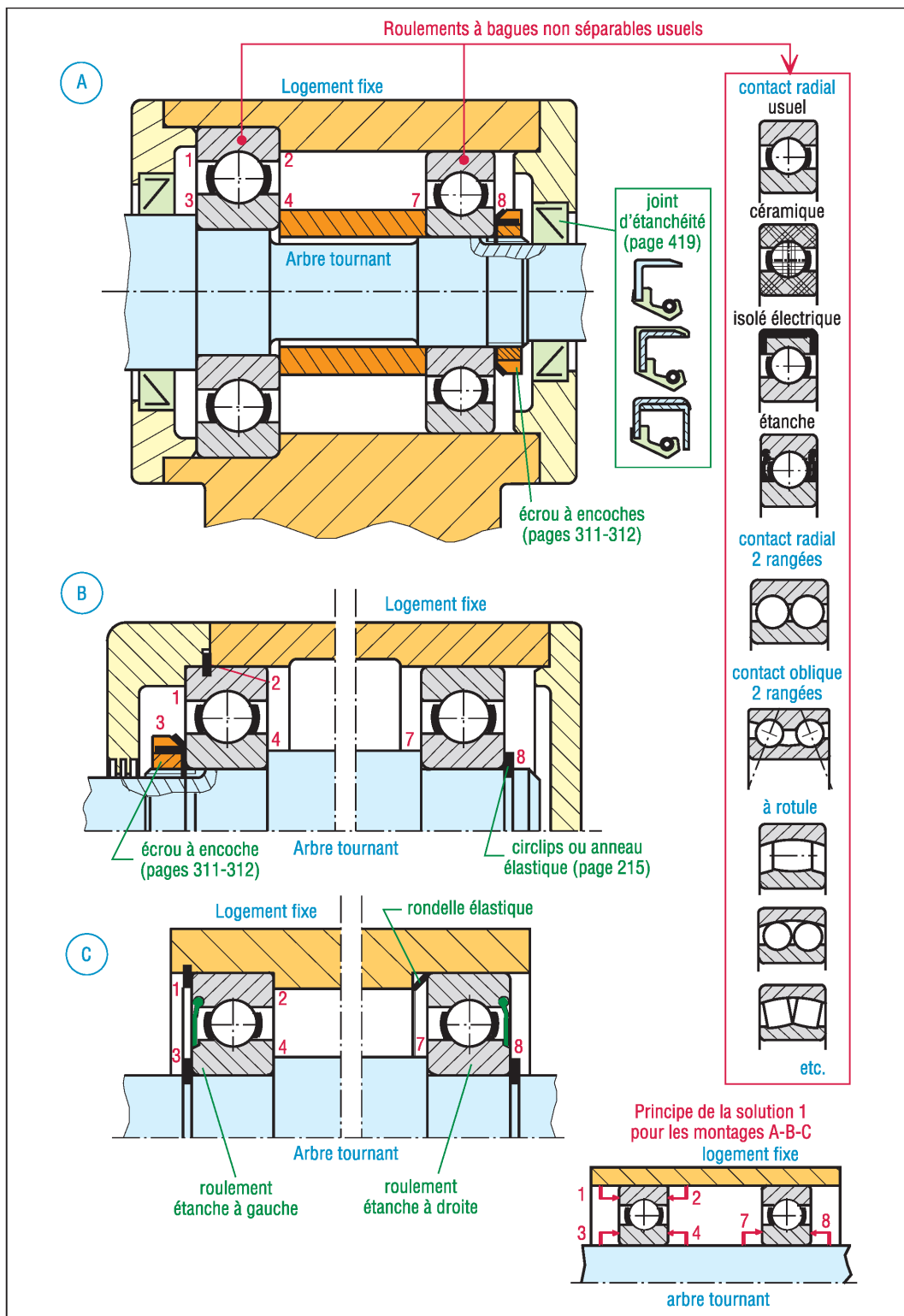


4. Solutions usuelles pour réaliser les épaulements du tableau page 275.

2. Exemples

a) Exemples utilisant le principe des solutions 1 et 2 page 275

Pour ces solutions, les efforts axiaux sont supportés par un seul roulement. Il faut épauler en priorité le roulement le plus proche du point d'application de la charge axiale exercée sur l'arbre. Cela amène une dilatation plus libre de l'arbre, moins de flambage et une cotation fonctionnelle plus large.

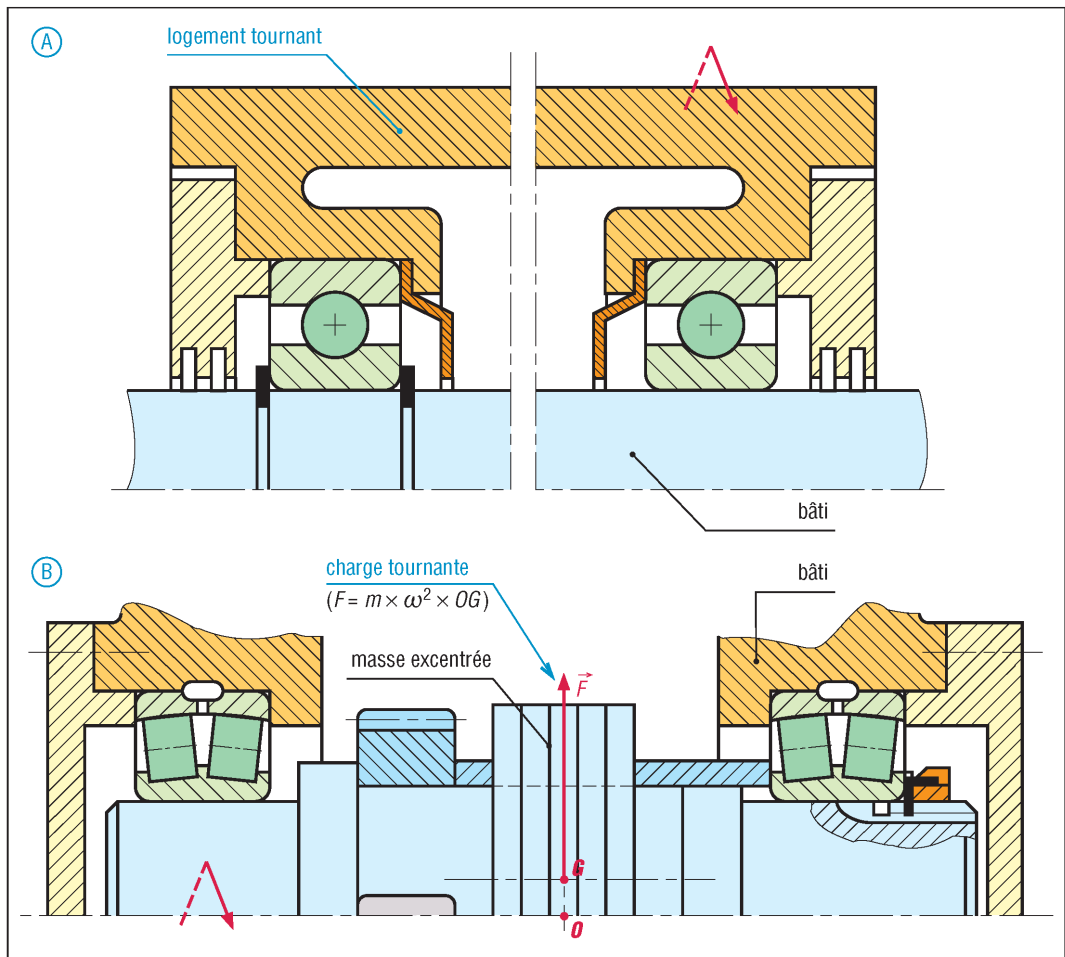


5. Exemples de montage obéissant aux principes de la solution 1.

Solution 1 : dans les trois exemples, l'arbre est tournant et les charges sur les roulements ont une direction fixe par rapport au bâti. Les bagues intérieures, tournantes par rapport aux charges, sont montées serrées et les bagues extérieures montées glissantes.

L'ensemble arbre plus roulements des figures 5A et 5B peut être assemblé indépendamment du logement, ce qui simplifie les montages.

La rondelle élastique de la figure 5C ne réalise pas un épaulement ; elle maintient une légère pression afin d'assurer une meilleure durabilité à cause des vitesses élevées, tout en limitant les bruits de la liaison.



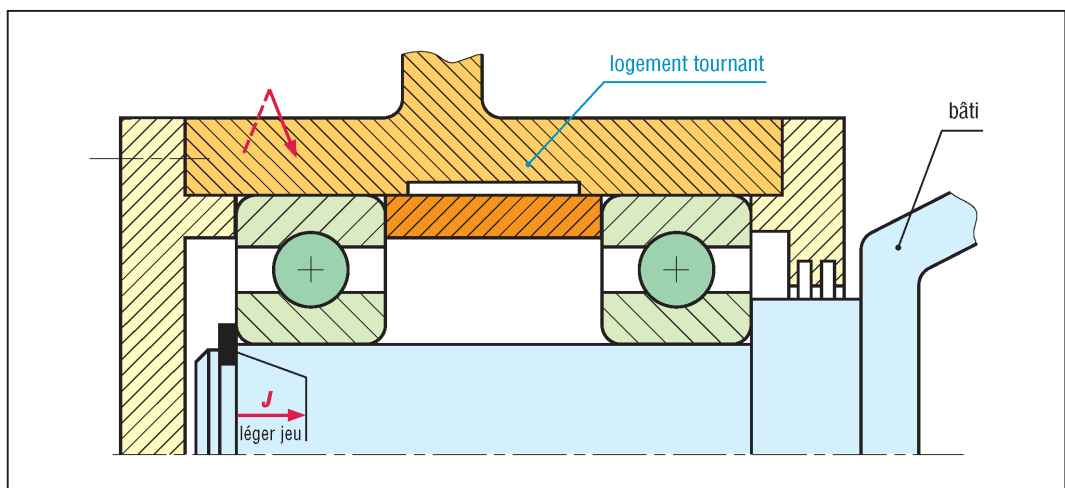
6. Exemples de montage obéissant aux principes de la solution 2.

Solution 2 : les bagues extérieures des deux exemples, tournantes par rapport aux charges, sont montées serrées et les bagues intérieures montées glissantes.

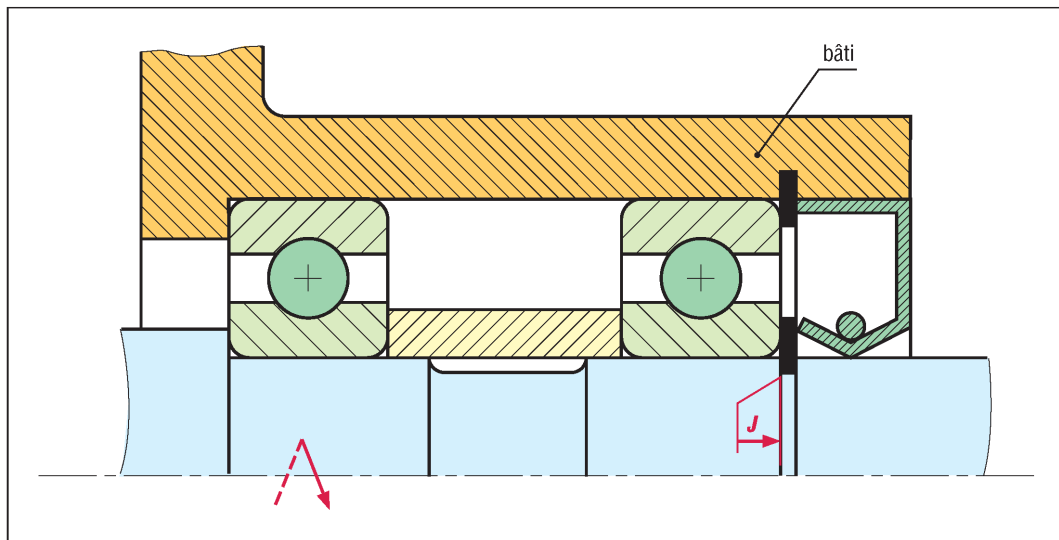
La figure 6A est un cas de logement tournant avec charges de direction fixe par rapport à l'arbre pour une distance entre roulements assez grande.

La figure 6B, arbre de vibreur, est un cas classique de charge tournante par rapport au bâti. La charge tournante résulte de la force centrifuge engendrée par la masse excentrée solidaire de l'arbre.

b) Principe des solutions 3 et 4 page 275



7. Exemple obéissant aux principes de la solution 4.



8. Exemple obéissant aux principes de la solution 3.

L'ensemble arbre plus roulements, ou logement plus roulements, peut en général être assemblé indépendamment.

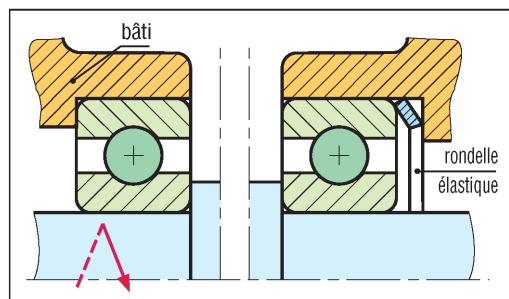
Un jeu axial de fonctionnement (J) est nécessaire pour compenser les dilatations de l'arbre. Des roulements proches l'un de l'autre, ou une liaison courte, limitent les effets de ces dilatations.

Les solutions sont mieux adaptées lorsque les efforts axiaux sont toujours dans le même sens.

c) Principe des solutions 6 et 7

Ce sont des variantes économiques des solutions 3 et 4 avec moins de pièces adjacentes et moins d'usinages, utilisées lorsque les charges axiales sont faibles ou nulles. Exemples : petits moteurs électriques.

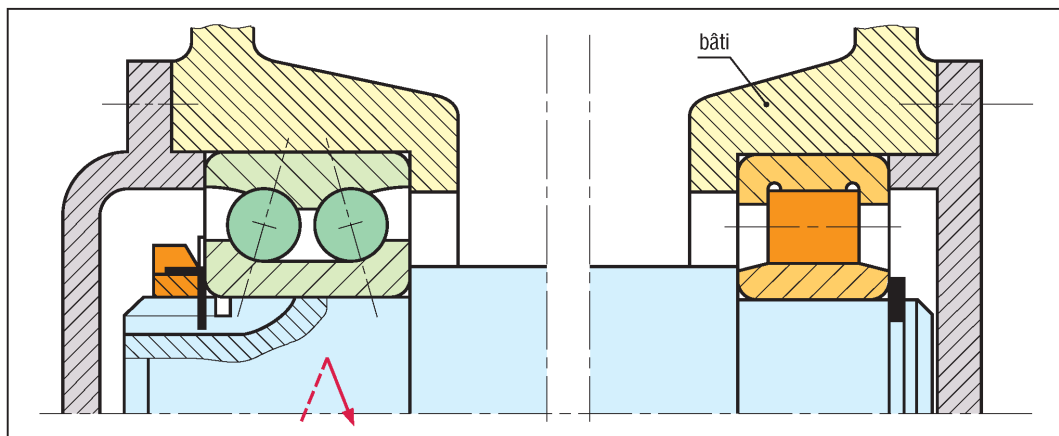
Ne pas les confondre avec les montages en X et en O du paragraphe suivant. Il n'y a pas ici d'opposition mutuelle entre les roulements et le fonctionnement exige un léger jeu axial J ou une rondelle élastique.



9. Exemple de montage obéissant aux principes de la solution 7.

d) Principe de la solution 5

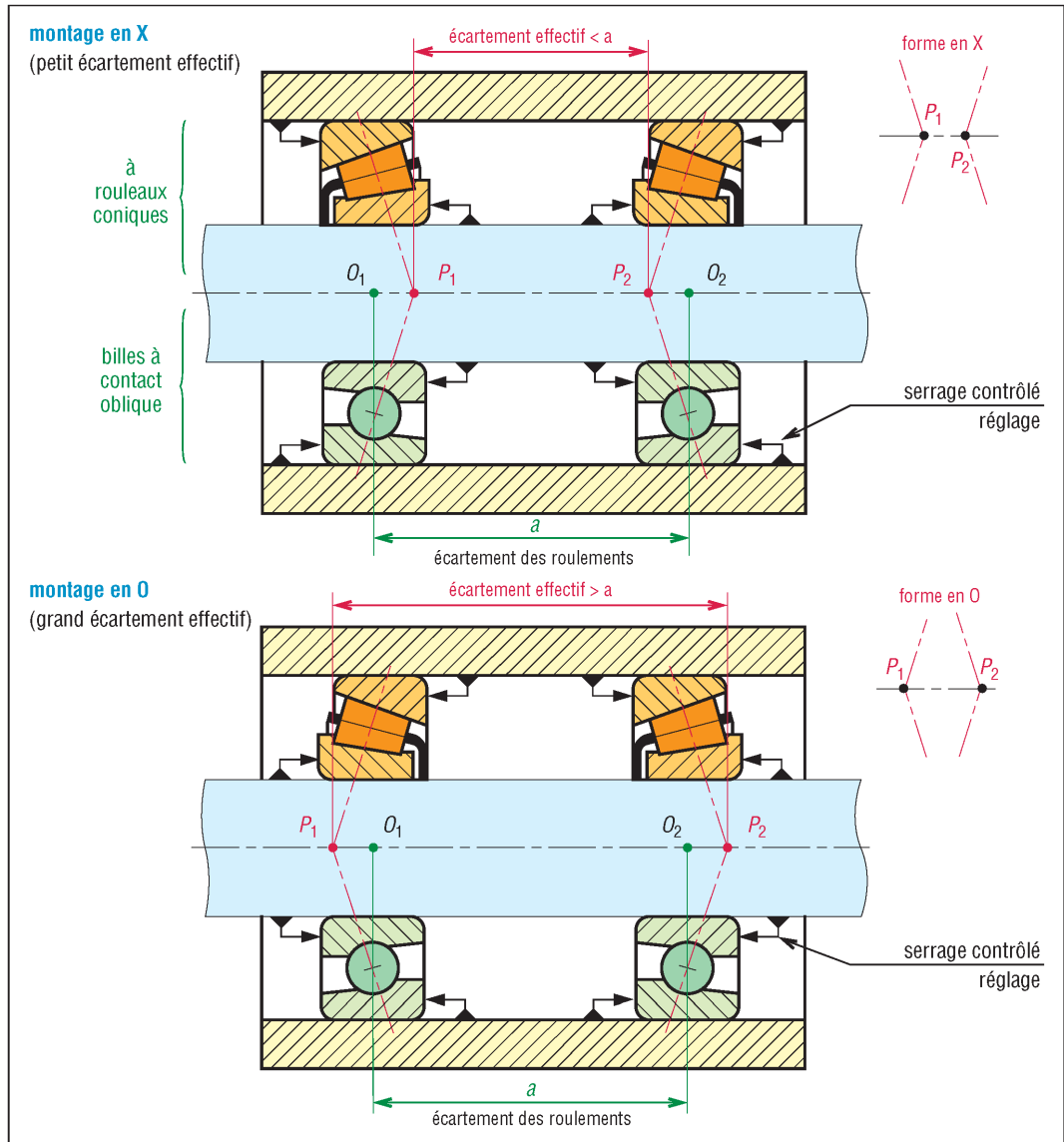
Toutes les bagues sont épaulées de chaque côté ; l'un des roulements est à bagues séparables pour compenser les dilatations et éviter les oppositions mutuelles. Les efforts axiaux sont supportés par le roulement à bagues non séparables.



10. Exemple obéissant aux principes de la solution 5 avec un roulement à bagues séparables (orange).

3. Montages des roulements à contacts obliques et à rouleaux coniques

Du fait de leur structure particulière, ces roulements doivent être montés par paire et en opposition ; ils travaillent en opposition mutuelle. Les groupements, ou les associations possibles sont indiquées ci-dessous. Particularité : ils exigent des usinages et des réglages précis.



11. Principes et caractéristiques des montages en X et en O.

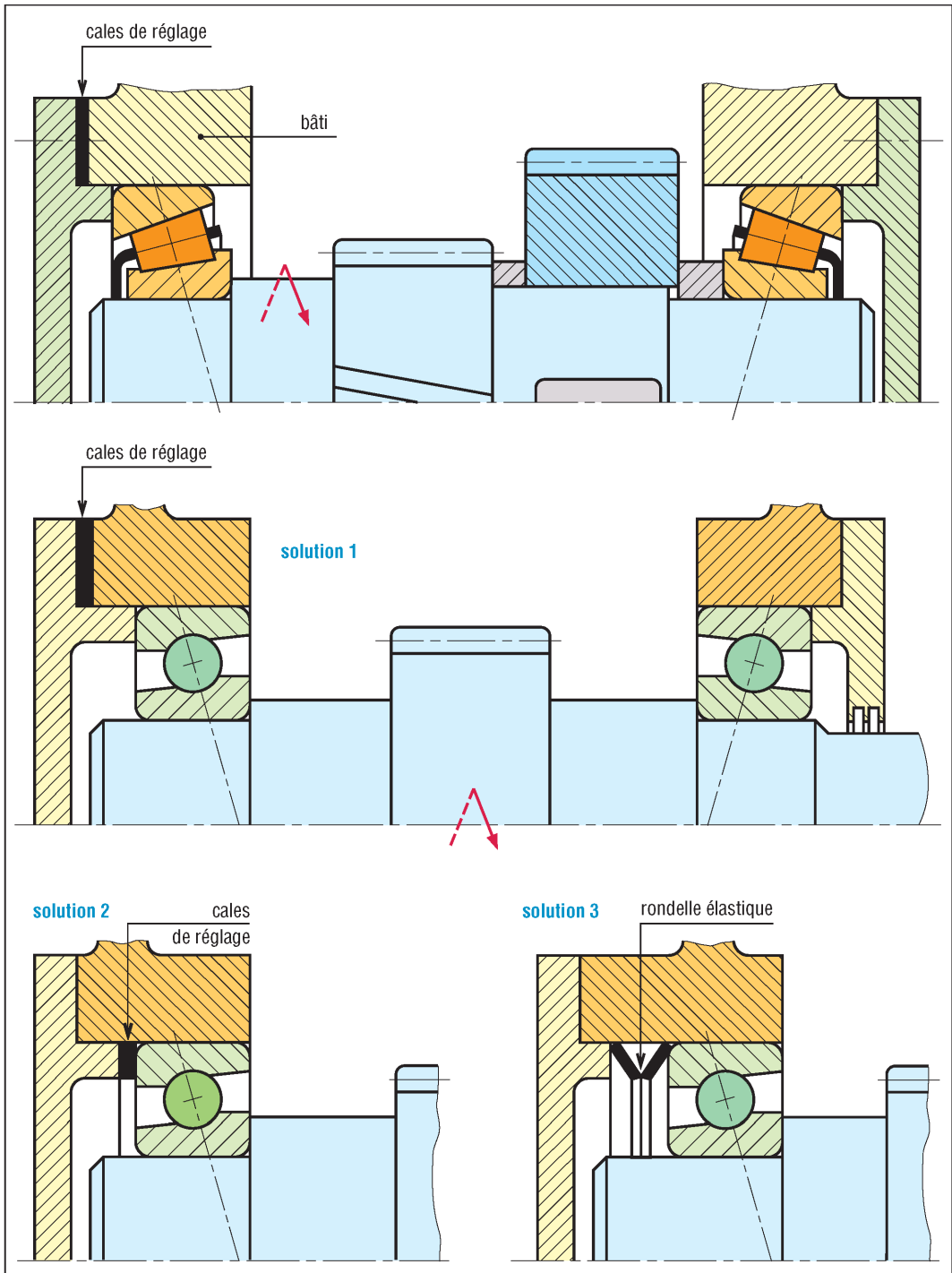
a) Montage en X ou montage direct

Ce montage amène les solutions les plus simples et les plus économiques : moins de pièces adjacentes et moins d'usinages.

Le montage en X est à préférer dans le cas des arbres tournants avec organes de transmission (engrenages, etc.) situés entre les roulements. Les bagues intérieures, tournantes par rapport aux charges, sont montées serrées et les bagues extérieures montées glissantes.

Le réglage du jeu interne de la liaison est effectué sur les bagues extérieures. Les dilatations de l'arbre ont tendance à charger un peu plus les roulements et à diminuer le jeu interne.

Exemples (fig. 12 avec variantes) : plusieurs possibilités de réglage sont indiquées. Les rondelles élastiques s'utilisent généralement pour des arbres longs avec risques de dilatation ou dans le cas de roulements surdimensionnés insuffisamment chargés.



12. Exemples de montages en X.

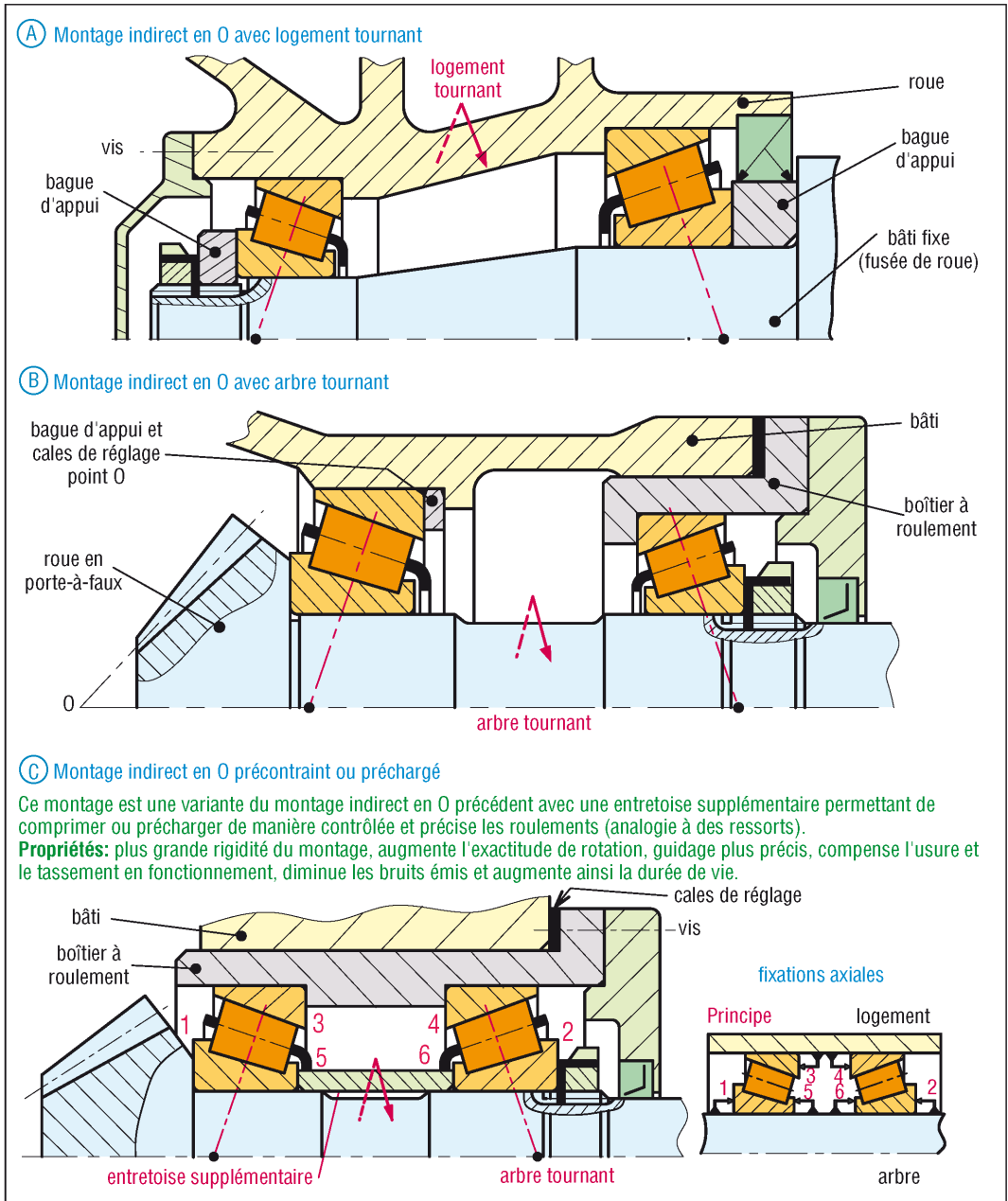
b) Montage indirect ou montage en O

C'est la solution à adopter lorsque la rigidité de l'ensemble de la liaison est recherchée ; on est dans le cas du plus grand écart effectif entre roulements. Le réglage est réalisé sur les bagues intérieures.

Avec les logements tournants c'est généralement la solution à préférer. Les bagues extérieures, tournantes par rapport aux charges, sont montées serrées (exemple **fig. 13A**).

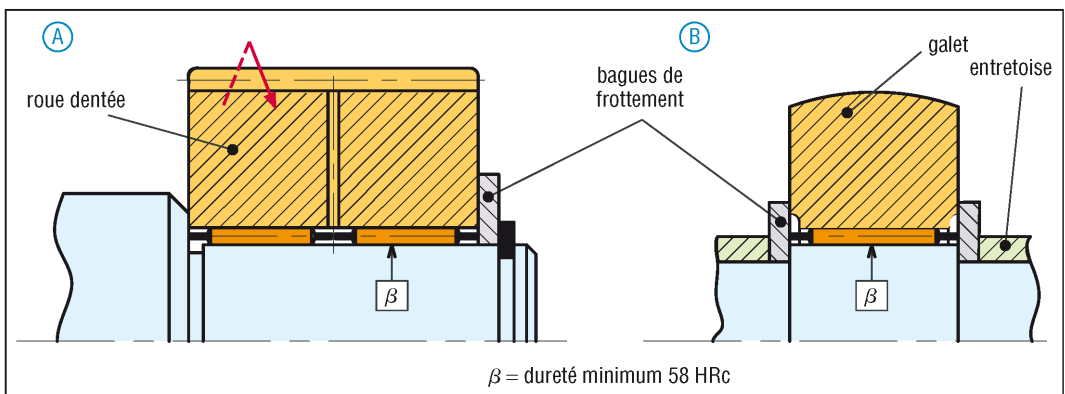
Le montage en O s'utilise aussi avec les arbres tournants lorsque les organes de transmission sont situés en dehors de la liaison (engrenage en porte à faux, **fig. 13B**). Les bagues intérieures, tournantes par rapport aux charges, sont montées serrées.

La dilatation de l'arbre a tendance à diminuer les charges sur les roulements et à augmenter le jeu interne de la liaison, et inversement s'il y a dilatation du logement.

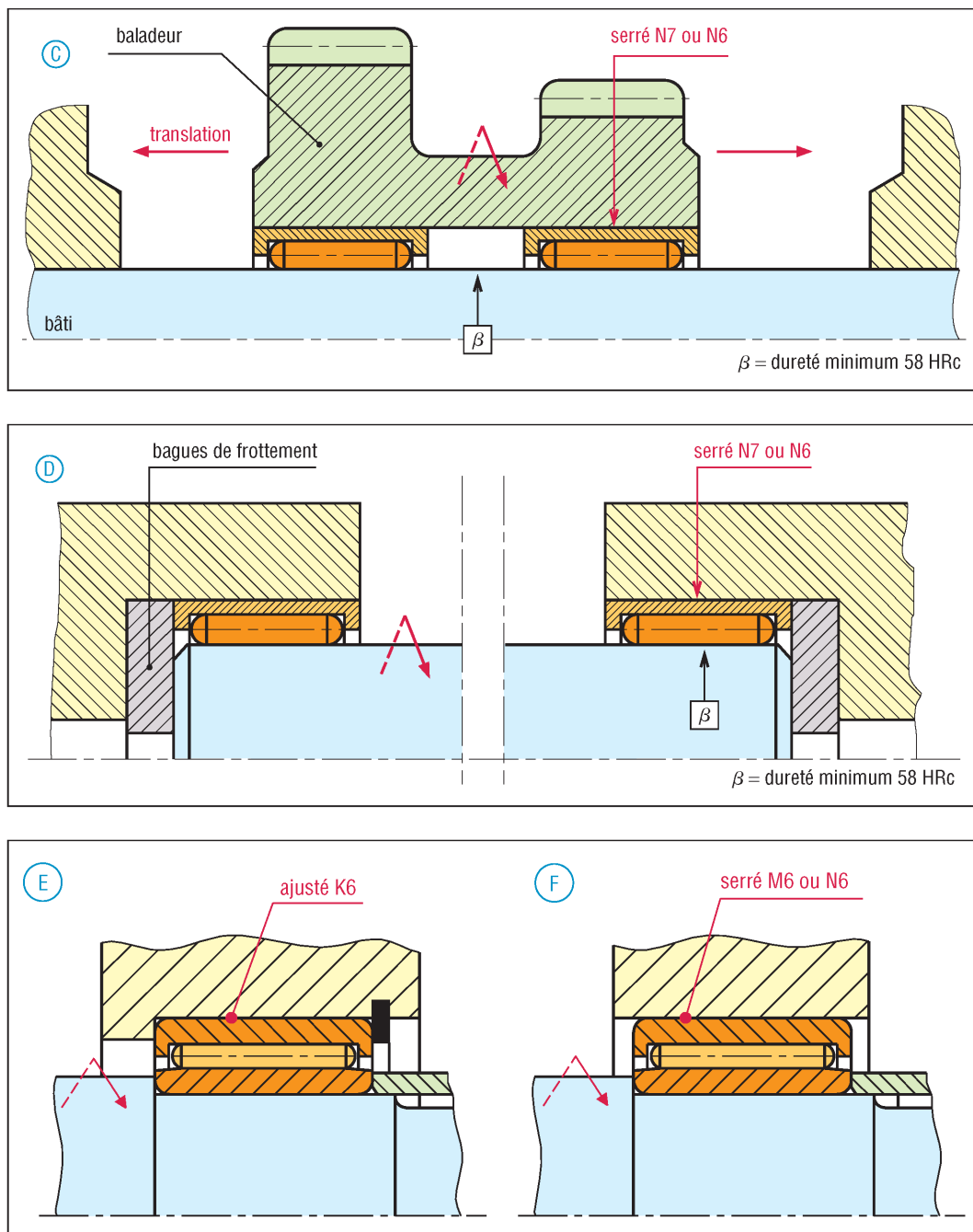


13. Exemples de montages en O.

4. Montage des roulements à aiguilles



14. Exemple de montage avec cages à aiguilles.



14. Exemples de montages avec douilles à aiguilles (C et D) et roulements à aiguilles (E et F).

Les liaisons réalisées à partir de ces seuls roulements ne supportent pas les charges axiales. Celles-ci doivent donc être supportées par un autre dispositif.

Si ces charges sont faibles ou nulles, des rondelles de frottement trempées et rectifiées (exemples A, B et D) sont souvent suffisantes pour assurer le maintien latéral. Si elles sont plus élevées, l'utilisation d'un roulement complémentaire d'un autre type est nécessaire.

a) Douilles à aiguilles (exemples C et D) : dans la plupart des applications, les douilles sont montées serrées (ajustements N7 ou N6) dans leur logement, sans épaulement pour assurer la fixation latérale. Elles peuvent supporter une translation occasionnelle : cas du baladeur de l'exemple C.

b) Roulements à aiguilles : ils sont soumis aux mêmes règles d'épaulements que les roulements à rouleaux cylindriques. Destinés à supporter des charges radiales élevées, ils sont souvent épaulés latéralement (exemple E). Cependant il est fréquent, environ un cas sur trois, avec des charges modérées, que ces roulements soient non épaulés et ajustés avec serrage (M6 ou N6) dans leur logement (exemple F).

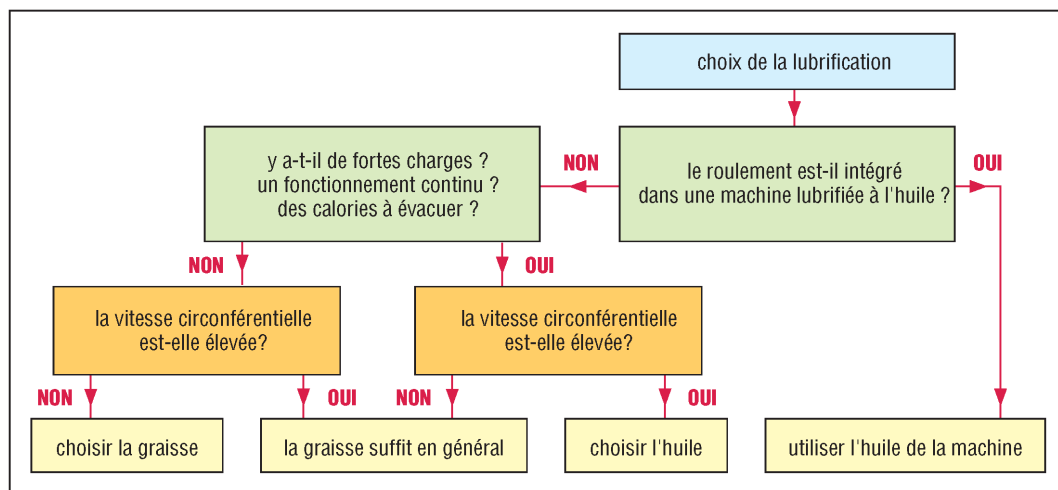
IV – Lubrification des roulements

La lubrification facilite les mouvements, diminue les frottements internes et protège contre la corrosion.

La plupart des montages de roulements, environ 90 %, sont lubrifiés à la graisse. C'est la solution à envisager en premier, du fait de la simplicité de conception et de la facilité de mise en œuvre. De plus elle permet le graissage à vie.

L'organigramme proposé (fig. 15) permet une première approche dans le choix d'un mode de lubrification.

Les propriétés des graisses, des huiles et les dispositifs usuels sont étudiés dans le chapitre lubrification.



15. Organigramme pour le choix du mode de lubrification.

1. Lubrification à la graisse

Elle protège le roulement contre la corrosion, y compris à l'arrêt ; assure une certaine étanchéité en s'opposant à l'entrée des impuretés ; convient à une large gamme de vitesses ; permet un démarrage doux ; s'utilise en faible quantité et offre un fonctionnement sans entretien pendant de longues périodes.

a) Roulement graissé à vie (fig. 16A) : très pratique, il convient si la durée de vie exigée est limitée, le regraisage est impossible.

b) Graissage par garnissage au montage (fig. 16B) : solution simple et usuelle, le graissage peut être à vie ou périodique par démontage et regarnissage lors des interventions de maintenance. La durée de vie du roulement dépend du volume de graisse présent près des éléments roulants.

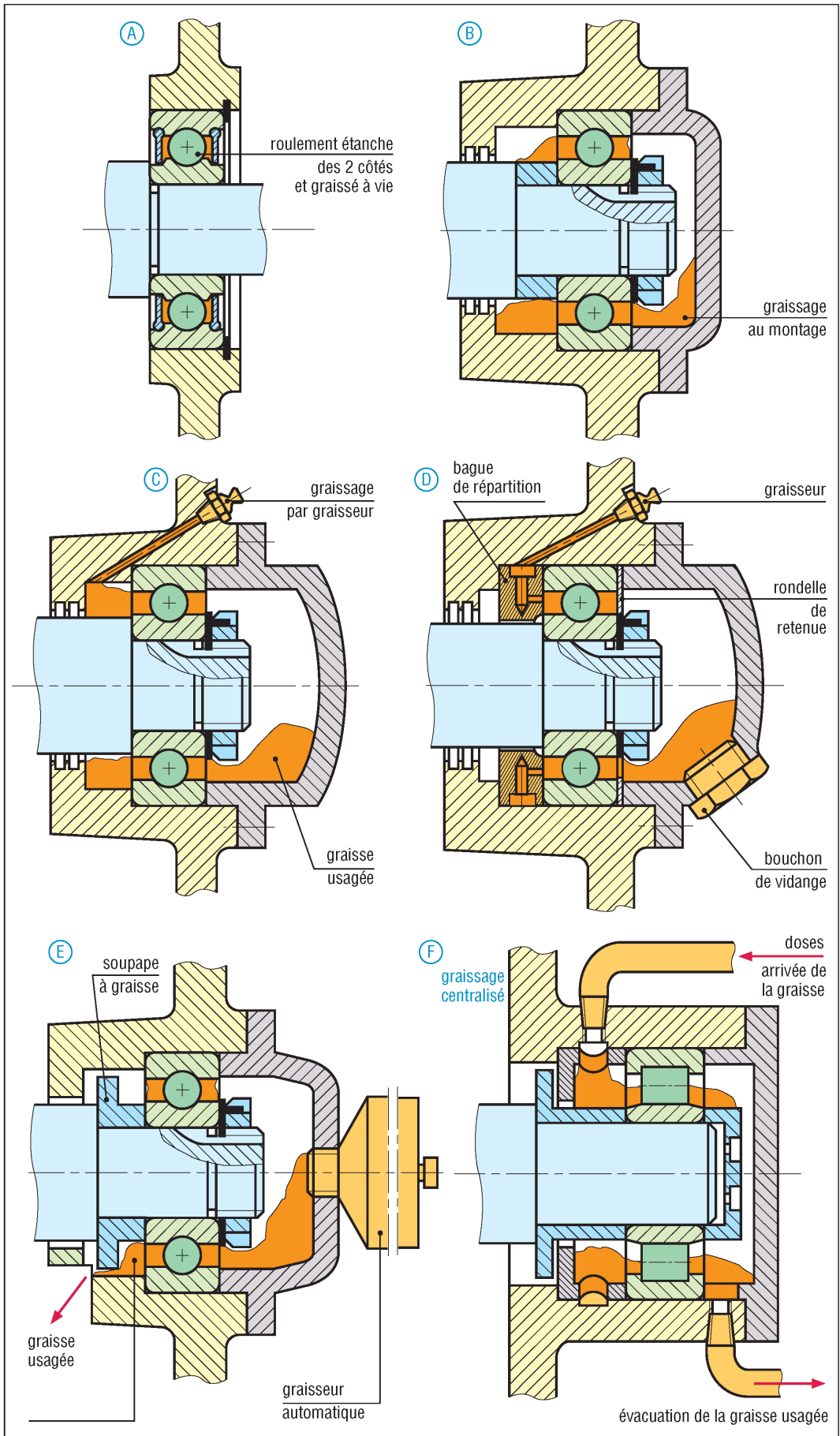
c) Graisseurs (fig. 16C, D et E) : ils sont utilisés lorsque des graissages périodiques sont nécessaires. C'est le deuxième degré en matière de graissage.

Il faut éviter les excès et renouveler complètement la graisse lors des révisions de machines. Si le regraisage est fréquent, la graisse usagée doit être impérativement éliminée : bouchon de vidange, soupape à graisse...

La conduite de la graisse par bague de répartition exige des dépenses qui ne se justifient que pour des machines coûteuses.

d) Graissage centralisé (fig. 16F) : c'est le dernier degré en matière de graissage, il évite l'arrêt des machines et élimine les interventions humaines.

Une même pompe, à partir d'un réseau de canalisations, lubrifie en même temps et périodiquement tous les points à graisser (voir chapitre 34 : lubrification).



16. Principaux dispositifs de graissage. Voir aussi page 414.

2. Lubrification à l'huile

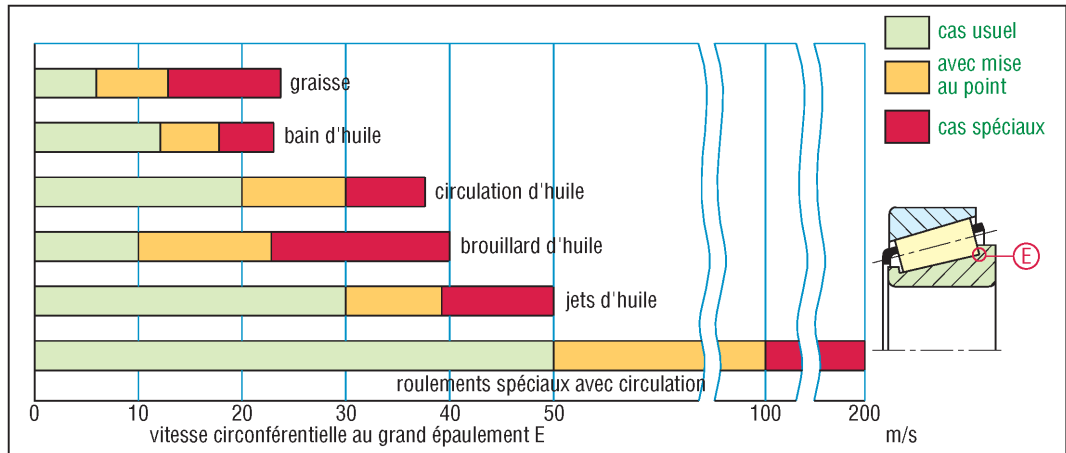
Elle est utilisée dans les cas suivants : vitesses très élevées, paliers très chargés, températures élevées nécessitant une évacuation des calories, machine déjà lubrifiée à l'huile.

Remarques : plus les vitesses sont élevées, plus la viscosité doit être faible. Une viscosité trop faible peut entraîner la rupture du film d'huile suivi d'un grippage. Une viscosité trop élevée amène une élévation de la température de fonctionnement des paliers.

Un excès d'huile peut être plus néfaste qu'une insuffisance car il crée un brassage provoquant un échauffement anormal des paliers.

| Viscosités indicatives des huiles en fonction de la température | | | | |
|---|---------------------------|--|---------------|----------------------|
| température de fonctionnement | produit d(mm) × N(tr/min) | viscosité cinématique ISO mm ² /s | | types de roulements |
| | | charge normale | charge élevée | |
| - 30 à 0 °C | jusqu'à V limite | 22 - 32 | 46 | tous types |
| 0° à 60 °C | < 15 000 | 46 - 68 | 100 | tous types |
| | 15 000 à 80 000 | 32 - 46 | 68 | tous types |
| | 80 000 à 150 000 | 22 - 32 | 32 | sauf butées à billes |
| | > 150 000 | 10 | 22 - 32 | RRGB + RRC* |
| 60° à 100 °C | < 15 000 | 150 | 220 | tous types |
| | 15 000 à 80 000 | 100 | 150 | tous types |
| | 80 000 à 150 000 | 68 | 100 - 150 | sauf butées à billes |
| | > 150 000 | 32 | 68 | RRGB + RRC* |
| 100° à 150 °C | jusqu'à V limite | 320 | | tous types |

* RRGB : roulements rigides à billes ; RRC : roulements à rouleaux cylindriques



17. Roulements à rouleaux coniques : vitesses possibles selon le mode de lubrification.

a) Lubrification par bain d'huile (fig. 18A) : ce dispositif est le plus simple ; l'huile doit atteindre l'élément roulant le plus bas et ne pas le dépasser pour éviter le brassage.

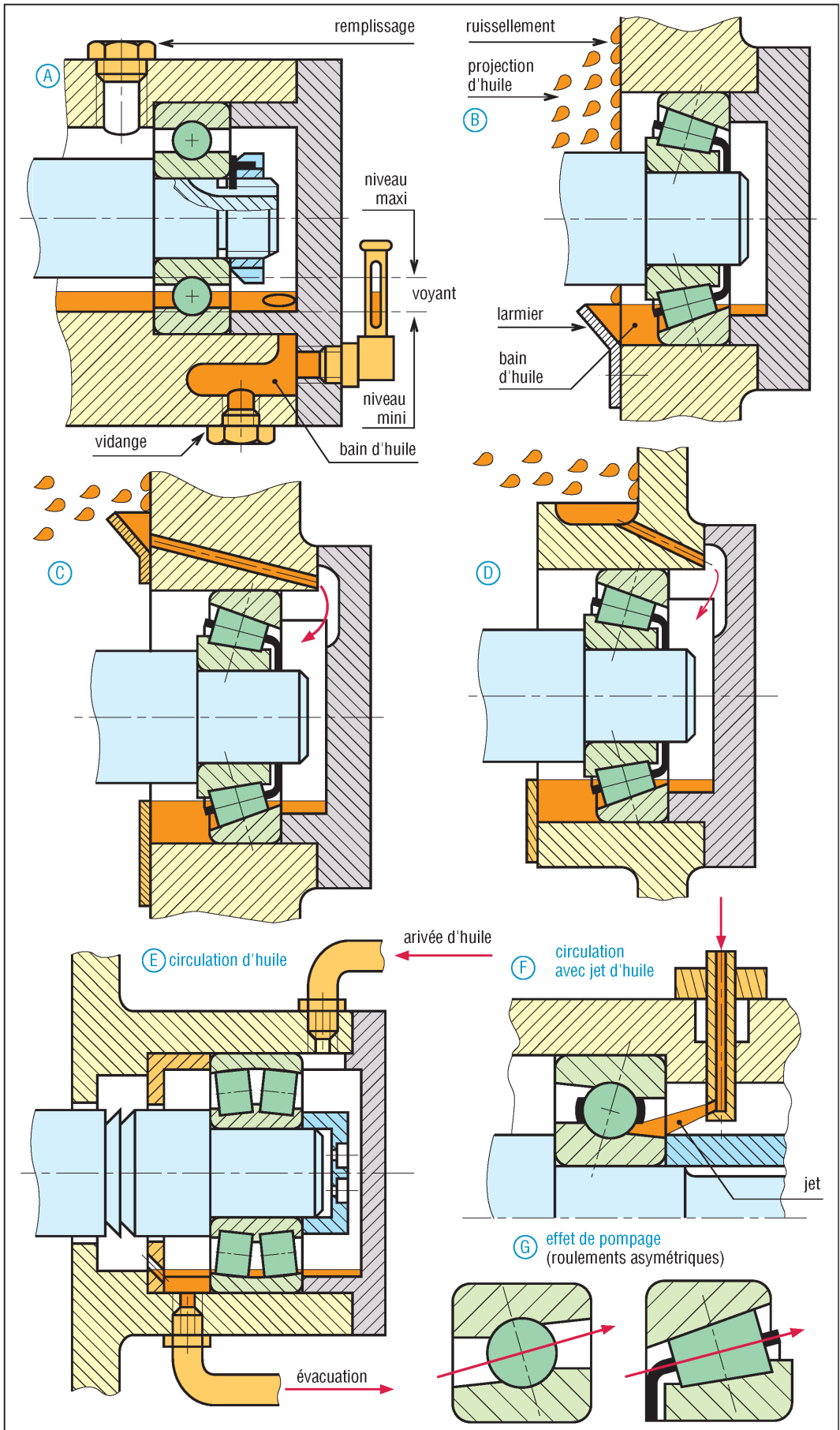
b) Lubrification par bain et ruissellement (fig. 18B, C et D) : si les projections et le ruissellement sont suffisants, l'huile projetée sur les parois par effet centrifuge peut être recueillie (goulottes, larriers, etc.) puis canalisée vers les roulements à lubrifier.

c) Lubrification par brouillard d'huile : elle est surtout utilisée aux hautes vitesses (voir chapitre lubrification).

d) Lubrification par circulation d'huile (fig. 18E, F et G) : l'huile circule en permanence et arrive près des roulements grâce à une pompe et des canalisations.

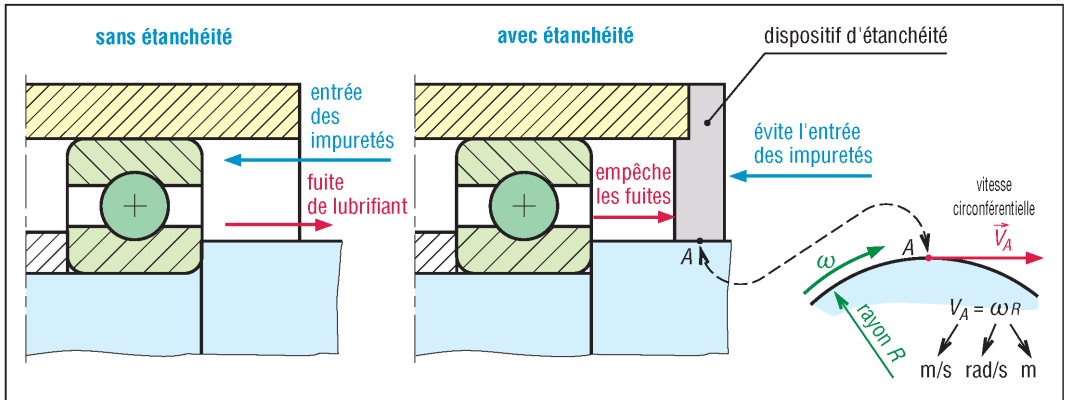
Lorsque les roulements sont très chargés, les vitesses très élevées, l'huile peut être injectée sous pression par un ou deux becs. Le jet est dirigé vers les éléments roulants juste entre la bague intérieure et la cage.

Certains roulements non symétriques, rouleaux coniques et contacts obliques, créent un phénomène de pompage centrifuge entraînant une circulation de l'huile.



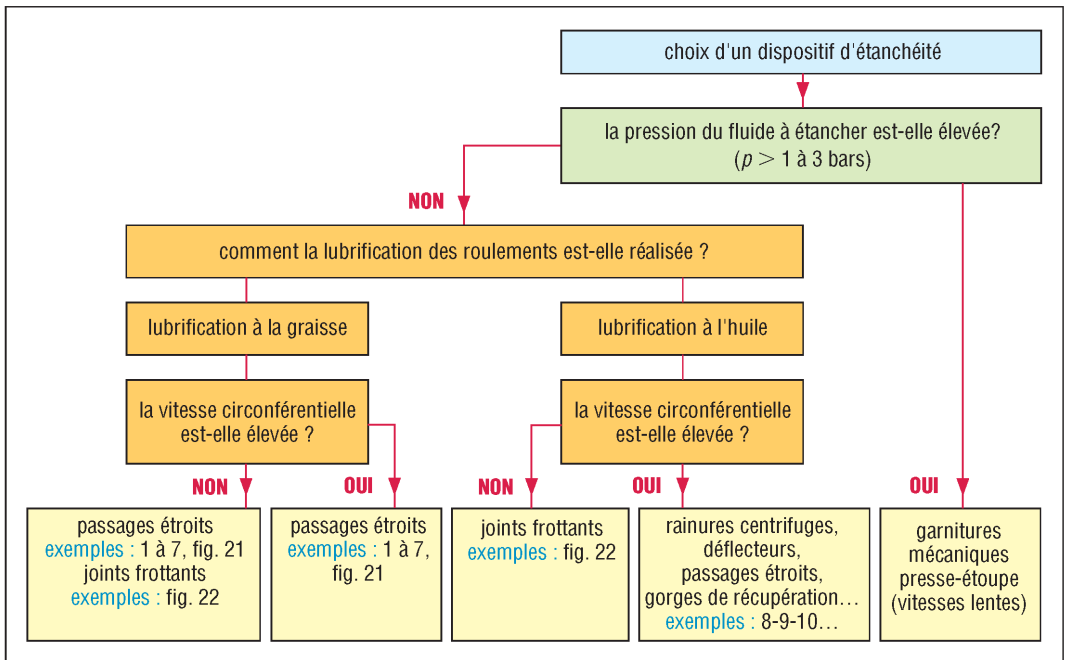
18. Principaux dispositifs de lubrification à l'huile. Voir aussi page 412.

V - Étanchéité des roulements



19. Caractéristiques des étanchéités pour roulements.

Les roulements exigent une atmosphère saine pour fonctionner correctement et durablement. Ils doivent être protégés des substances granuleuses dures (poussières abrasives, sable, terres), de l'eau (liquide, vapeur, condensation), des fluides corrosifs, d'un lubrifiant usagé... Le choix d'un dispositif d'étanchéité dépend de la nature du lubrifiant (qui ne doit pas sortir), du milieu ambiant (qui ne doit pas entrer) et de la vitesse de rotation. L'organigramme proposé (fig. 20) permet une première approche.



20. Organigramme pour le choix d'un dispositif d'étanchéité.

1. Cas usuels

Les joints à lèvres à contact radial sont les plus utilisés. Ils ne supportent ni les poussières abrasives ni les vitesses circonférentielles élevées (fig. 22 repères 4a, 4b et 4c).

Avec la graisse et à toutes vitesses, les passages étroits simples suffisent pour des milieux ambiants propres (fig. 21-1 à 4). Les éléments usinés permettent des tolérances plus serrées (21-4). Si le milieu devient plus sale, les rainures annulaires et les labyrinthes sont utilisés (21-5a, 5b, 7a, 7b). Pour ces cas, les interstices se remplissent d'un mélange graisse plus poussières formant un barrage aux impuretés. Les déflecteurs (6a, 6b) agissent en repoussoir.

dispositifs sans frottement pour lubrification à la graisse

1 roulements étanches

avec flasque (métal)

2 déflecteurs simples emboutis (pour « milieux propres »)

0,5 à 0,6

disque de retenue de la graisse

3 déflecteurs ou rondelles z (dimensions p. 421)

2 jeux de rondelles floquées contre polluants secs (sable...)

4 passages étroits simples usinés

0,5 à 0,6

tolérances plus serrées, plus efficaces que les emboutis

5a passage étroit avec rainures

avec graisse

3 rainures

5b rainures : recommandations

| d (mm) | J (mm) | a (mm) | b (mm) | h (mm) |
|--------|-----------|-------------|-------------|--------|
| ≤ 50 | 0,20-0,40 | 3,20 à 4,80 | 4,00 à 4,80 | 0,5a |
| > 50 | 1,3 max | | | |

6a rainures + déflecteur extérieur

déflecteur extérieur (repousse les impuretés)

6b rainures + déflecteur intérieur

déflecteur intérieur (repousse le lubrifiant)

7a chicanes axiales – palier en 1 partie

graisse

palier en 1 pièce

chicanes ou labyrinthes recommandations :

| d (mm) | J ₁ (mm) | J ₂ (mm) |
|--------|---------------------|---------------------|
| ≤ 50 | 0,20-0,40 | 1 à 2 |
| > 50 | 0,50-1,00 | 3 à 5 |

7b chicanes radiales – palier en 2 parties

palier en 2 pièces

dispositifs sans frottement – vitesse élevée avec lubrification à l'huile

8 rainures centrifuges + gorge de récupération

rainures centrifuges

récupération de l'huile

9 rainures + déflecteur + gorge de récupération

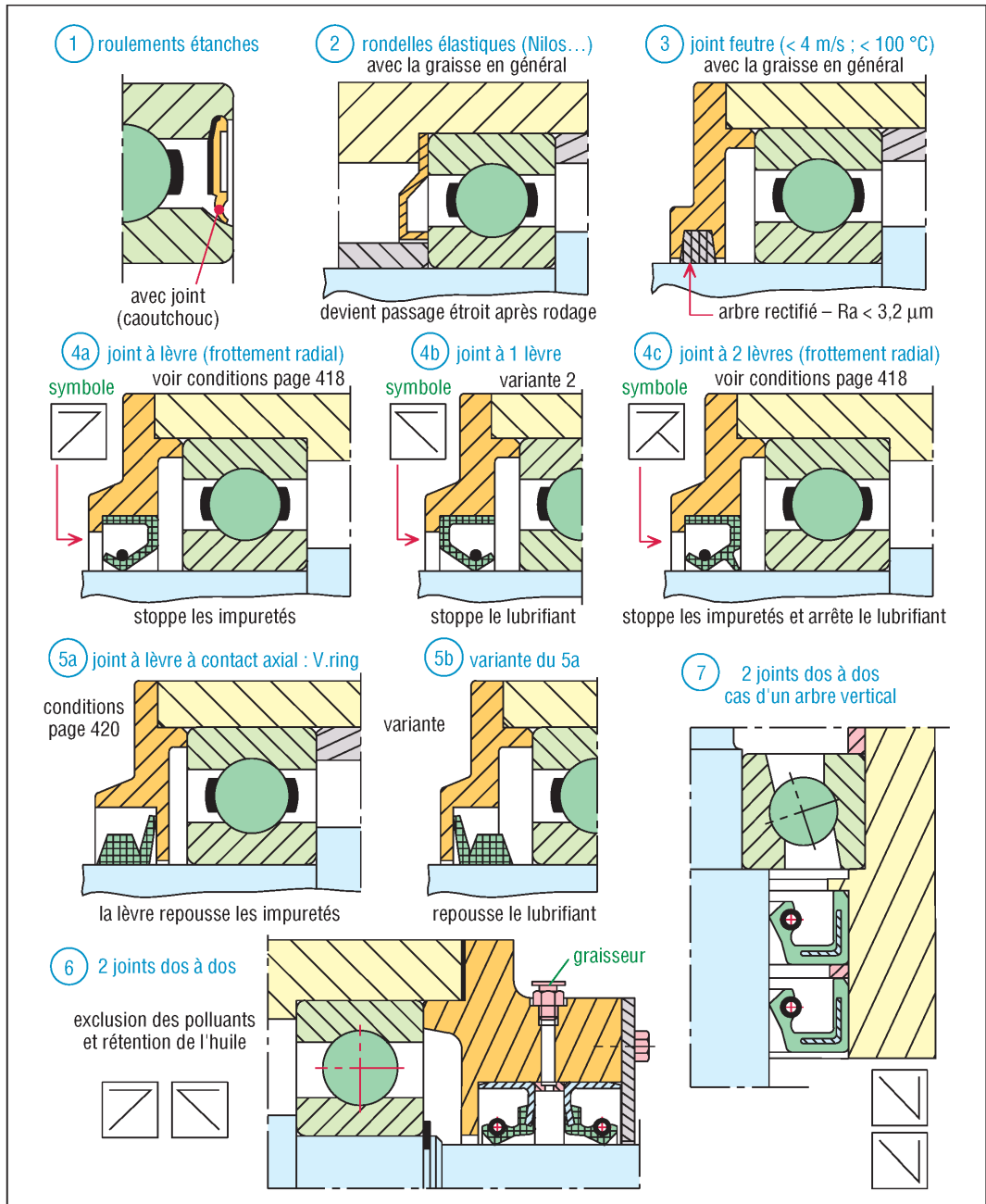
récupération de l'huile

10 rainures hélicoïdales-turbine à vis

pas à gauche ou à droite suivant rotation arbre

rainures repoussant l'huile

21. Principaux dispositifs d'étanchéité sans frottement.



22. Principaux dispositifs d'étanchéité avec frottement pour lubrification à la graisse ou à l'huile.

2. Cas des vitesses élevées avec lubrification à l'huile

Aux hautes vitesses, les joints frottants ne sont plus utilisables ; seuls les passages étroits sont possibles.

Les rainures centrifuges avec gorge de récupération (repère 21-8) et les déflecteurs avec dispositif annexe (rainures annulaires, labyrinthe, etc.) sont les plus utilisés (repère 21-9).

3. Cas difficiles

Lorsque les milieux ambiants sont très agressifs ou très pollués, il est nécessaire de mettre côte à côte, ou en série, plusieurs dispositifs d'étanchéité pour faire barrage aux impuretés (exemples : fig. 21 repères 6a-6b et 9, fig. 22-6 et 7).

L'étanchéité des arbres verticaux avec lubrification à l'huile est probablement le cas le plus difficile à résoudre (22-7). À éviter en conception.

26

NOTIONS SUR LE CALCUL DES ROULEMENTS

OBJECTIFS

- Décrire et définir les notions de durée de vie, de défaillance, de capacité de charge et de charge équivalente.
- Indiquer la normalisation et proposer des exemples.

I - Fiabilité et durée de vie L_{10}

Sous charge et au cours du mouvement de rotation les chemins des bagues de roulements reçoivent de la part des éléments roulants, billes ou rouleaux, des millions de compressions élastiques intermittentes. Il en résulte, avec le temps, des fissurations amenant progressivement un écaillage des surfaces. C'est le phénomène de fatigue. (Détérioration et défaillance des roulements : NF ISO 15243).

1. Durée de vie normalisée L_{10}

La durée de vie L_{10} d'une série de roulements identiques, soumis à la même charge, est égale au nombre de tours, ou de révolutions, réalisés par 90 % des roulements de la série avant qu'apparaissent les premiers signes de fatigue.

Unités : la durée de vie normalisée se calcule en millions de tours, parfois par commodité en heures de fonctionnement.

Remarques :

- La fatigue est un phénomène aléatoire ou statistique. Autrement dit, des roulements identiques, de mêmes dimensions, de mêmes matériaux, appartenant à un même lot, tous chargés de la même façon, auront, après le même essai, des durées de vie différentes (voir chapitre 14 : essais).
- L_{10} est la durée de vie (moyenne statistique) basée sur une fiabilité de 90 %, c'est-à-dire 90 % de survie après essai sur un même lot. L_{10} sert de référence à tous les roulements de la série.

2. Durée de vie corrigée L_n : fiabilité différente de 90 %

Si l'on désire obtenir une durée de vie L_n supérieure à L_{10} , ou à une fiabilité supérieure, celle-ci peut être obtenue par $L_n = a_1 \cdot L_{10}$ avec $a_1 = 4,48 [\ln(100/F)]^{2/3}$; avec F = fiabilité en %.

| Fiabilités différentes de 90 % (NF ISO 281) : $L_n = a_1 \cdot L_{10}$ | | | | | | | | | |
|--|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|------------|
| fiabilité F en % | 90 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 99,5 | 99,90 | 99,95 |
| L_n | L_{10} | L_5 | L_4 | L_3 | L_2 | L_1 | $L_{0,5}$ | $L_{0,1}$ | $L_{0,05}$ |
| a_1 | 1 | 0,64 | 0,55 | 0,47 | 0,37 | 0,25 | 0,17 | 0,093 | 0,077 |

Remarque : $L_{50} = 5L_{10}$.

Remarques : $L_{50} \approx 5L_{10}$ (fiabilité de 50 %) ; $L_{90} \approx 15L_{10}$ (fiabilité de 10 %).

En pratique : $L_n = a_1 \cdot a_{ISO} \cdot L_{10}$

a_{ISO} est déterminé à partir de la contrainte réelle maxi de fatigue (σ) exercée entre chemins et éléments roulants. Si en fonctionnement, sous conditions de lubrification et contamination connues et maîtrisées, ($\sigma = \sigma_{Hertz}$) reste inférieure à la limite admissible en fatigue (σ_u) du matériau (chemin $\approx 1\,500$ MPa), on peut obtenir des durées de vie L_n très supérieures à L_{10} .

| | | |
|--|-------------------------|---|
| Principe de calcul : $\frac{\sigma_u}{\sigma} \overset{\text{méthode ISO}}{\longleftrightarrow} \frac{C_u}{P}$ $a_{ISO} = f(C_u \cdot e_c \cdot k/P)$ (détails NF ISO 281) | C_u | Charge limite de fatigue : dépend du roulement (type, taille, forme interne), profil chemin, qualité, limite fatigue matériau chemin... |
| | e_c | Dépend de la lubrification (type, viscosité, vitesse...) et des particules contaminantes (dureté, taille, filtration, propreté...). |
| | $k = \frac{\nu}{\nu_1}$ | Rapport viscosité cinématique du lubrifiant (ν) sur viscosité cinématique de référence (ν_1) ; ν_1 dépend vitesse et $\varnothing_{\text{primitif rlt.}}$ |
| | P | Charge équivalente du paragraphe IV. |

3. Fiabilité F et probabilité de défaillance D ($L < L_{10}$)

$$D = 1 - F \quad \text{avec} \quad F = \exp \left[- \left[\frac{(L/L_{10}) - 0,02}{4,439} \right]^{1,483} \right]$$

Exemple : la durée de vie prévue d'un roulement est $L_{10} = 10\,000$ heures. On souhaite connaître la fiabilité après 5 000 heures de fonctionnement juste avant extinction de la garantie commerciale.

$L = 5\,000$ et $L/L_{10} = 5\,000/10\,000 = 0,5$

L'équation précédente donne $F = 0,963\,7$ (fiabilité de 96,37 %)

Pourcentage de défaillance : $D = 1 - F = 0,036\,3$ (3,63 %).

4. Durée de vie d'un ensemble ou d'une association de roulements

Lorsqu'un ensemble de roulements (E) comprend plusieurs roulements fonctionnant en même temps (exemple : arbre avec plusieurs roulements), la durée de vie L_{E10} de l'ensemble est fonction de la durée de vie $L_{i,10}$ de chacun des n roulements. Elle est définie par la relation suivante :

$$L_{E10} = \left[\left[\frac{1}{(L_{1,10})} \right]^e + \left[\frac{1}{(L_{2,10})} \right]^e + \dots + \left[\frac{1}{(L_{n,10})} \right]^e \right]^{-\frac{1}{e}}$$

$e = 1,5$ tous cas.
 On peut utiliser :
 $e = 9/8$ si rouleaux ;
 $e = 10/9$ si billes.

Exemple : deux roulements à rouleaux coniques d'un même arbre ont des durées respectives de 15 000 et 25 000 heures. Calculons la durée de vie probable du montage.

$$L_{E10} = \left[\left[\frac{1}{15\,000} \right]^{1,5} + \left[\frac{1}{25\,000} \right]^{1,5} \right]^{-\frac{1}{1,5}} = 11\,630 \text{ heures}$$

Cette durée est toujours inférieure à la plus petite des valeurs $L_{i,10}$, ici 15 000 heures.

Remarques : $L_{E10} = 10\,085,8$ avec $e = 9/8$ et $10\,012,8$ avec $e = 10/9$.

II - Capacité de charge dynamique C

En dépit de l'utilisation d'aciers spéciaux très résistants, les roulements ont une durée de vie limitée. Cette durée dépend principalement de la charge supportée. Plus la charge est faible, plus la durée de vie est longue, et inversement.

Définition : la charge dynamique de base C , d'une série de roulements identiques, est la charge radiale (axiale pour une butée), constante en intensité et en direction, que peut endurer 90 % des roulements du groupe, pendant 1 million de tours, avant qu'apparaissent les premiers signes de fatigue.

Autrement dit, si un lot de 100 roulements identiques est soumis au cours d'un essai à sa charge de base C ($Fr = C$), 90 roulements du lot (90 %) auront une durée de vie qui atteindra ou dépassera 1 million de tours ($L_{10} = 1$).

Remarques :

– La capacité C est une des caractéristiques de base des roulements ; elle est indiquée dans les catalogues des fabricants en même temps que d , D , B et r .

– Pour une même référence normalisée de roulement, la valeur de C peut varier sensiblement d'un fabricant à l'autre.

III - Relation entre durée de vie L_{10} et charge dynamique C

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^n$$

L_{10} : durée de vie du roulement en millions de tours

C : charge dynamique de base

P : charge équivalente exercée sur le roulement (voir paragraphe IV)

$n = 3$ pour les roulements à billes

$n = 10/3$ pour les roulements à rouleaux

$$L_{10H} = \frac{L_{10} \cdot 10^6}{60 \cdot N}$$

Durée de vie L_{10H} en heures de fonctionnement

L_{10} : millions de tours

N : vitesse de rotation en tr/min.

| Durées de vie indicatives de quelques paliers à roulements | | |
|--|--|------------------------|
| mode d'emploi | exemples d'emploi | durée de vie L_{10H} |
| usages intermittents | électroménager, outillages électroportatifs, automobiles, appareils de manutention et de levage, moteurs d'avions... | 1 000 à 15 000 |
| fonctionnant 8 heures par jour | véhicules industriels, machines-outils, machines agricoles, machines de production, réducteurs... | 15 000 à 35 000 |
| service en continu 24 heures 24 | convoyeurs, compresseurs, laminoirs, certaines machines de production, ventilateurs, moteurs stationnaires | 35 000 à 60 000 |
| machines dont la fiabilité est très importante | machines à papier, machines textiles, navires, services des eaux, barrages, fours rotatifs, propulseurs... | 60 000 à 100 000 |

Exemple : un catalogue de roulements donne, pour un roulement à billes à contact radial, une capacité de charge dynamique C égale à 6 300 daN. Le roulement supporte une charge P de 2 100 daN.

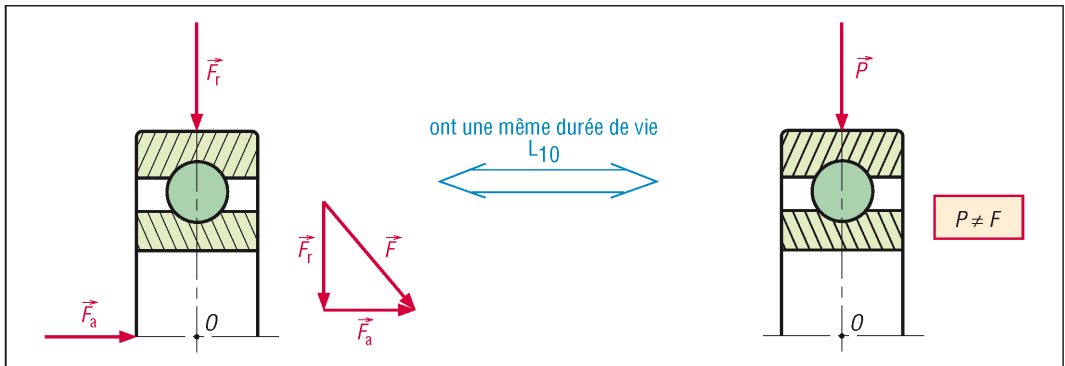
Déterminons les durées L_{10} et L_{10H} si la vitesse de rotation de l'arbre est de 150 tr/min.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^n = \left(\frac{6\,300}{2\,100} \right)^3 = 3^3 = 27 \quad (27 \text{ millions de tours})$$

$$L_{10H} = \frac{27 \cdot 10^6}{60 \times 150} = 3\,000 \text{ heures}$$

IV - Calcul de la charge dynamique équivalente P

La charge équivalente P est une charge radiale pure, donnant exactement la même durée de vie que la combinaison charge axiale F_a plus charge radiale F_r réellement exercée sur le roulement. P est différent de la charge combinée F .

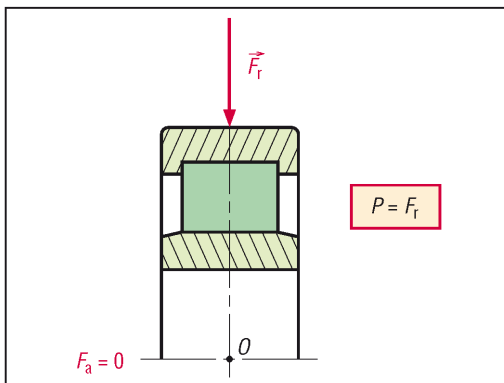


1. Charge équivalente P et charges exercées F_a et F_r .

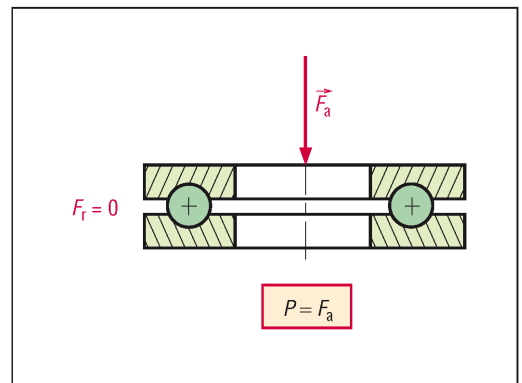
1. Cas particuliers

Dans le cas des roulements à aiguilles et des roulements à rouleaux cylindriques avec bagues séparables : $F_a = 0$ et $P = F_r$.

Avec des butées ne supportant que des charges axiales : $F_r = 0$ et $P = F_a$.



2. Valeur de P dans le cas des roulements à rouleaux cylindriques.



3. Valeur de P dans le cas des butées.

2. Cas général d'une charge combinée

F_a et F_r étant connues, la charge P est calculée à l'aide de la relation :

$$P = X.F_r + Y.F_a$$

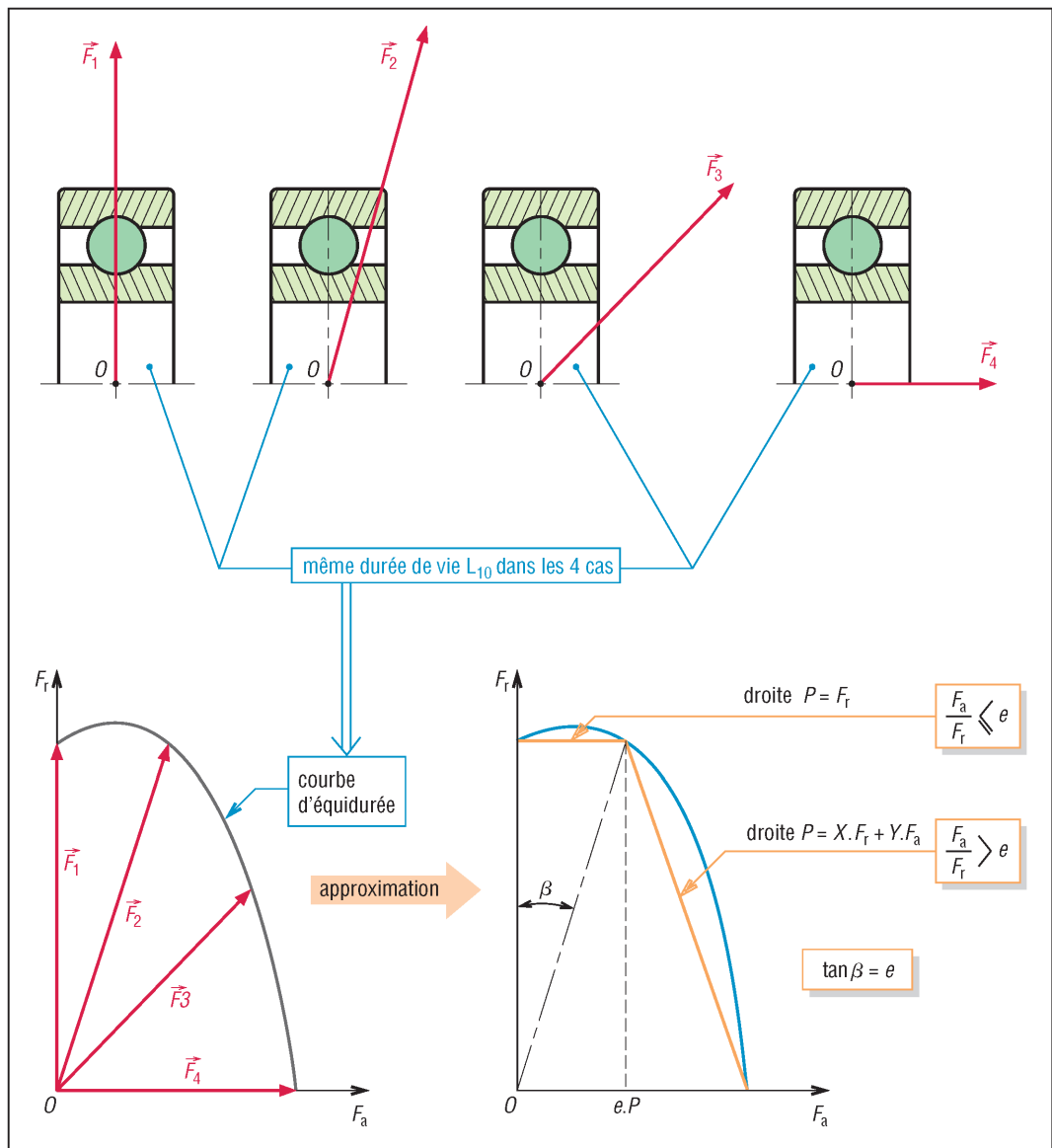
X et Y sont des coefficients normalisés liés à la nature du roulement et à ses dimensions (tableau page 296).

Remarques :

– Si la bague extérieure tourne par rapport à la direction de la charge la valeur de P est calculée par :

$$P = 1,2.X.F_r + Y.F_a$$

– Les relations précédentes sont obtenues à partir des courbes expérimentales d'équidurée.



4. Principe des courbes d'équidurée.

Sous l'action des charges F_1, F_2, F_3 ou F_4 le roulement a la même durée de vie.

La courbe d'équidurée est obtenue en traçant la courbe passant par les extrémités des charges précédentes, toutes tracées à partir du même point d'application O .

Cette courbe est ensuite approximée par des droites pour en simplifier l'exploitation (permet de définir les coefficients $X, Y, e = \tan \beta \dots$).

| Valeurs des coefficients X et Y suivant types de roulement | | | | | | | | | |
|---|-------|--|-------|--------------------------|---|--|---|--------------------------|------|
| roulements rigides à billes (à contact radial) | | | | | | | | | |
| si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors $P = F_r$ ($X = 1$ et $Y = 0$) si $\frac{F_a}{F_r} > e$ alors $P = 0,56.F_r + Y.F_a$ les valeurs de e et Y dépendent du rapport $\frac{f_0.F_a}{C_0}$ ou $\frac{F_a}{C_0}$ (voir ci-dessous) | | | | | | | | | |
| $\frac{f_0.F_a^*}{C_0}$ | 0,172 | 0,345 | 0,689 | 1,03 | 1,38 | 2,07 | 3,45 | 5,17 | 6,89 |
| $\frac{F_a^{**}}{C_0}$ | 0,014 | 0,028 | 0,056 | 0,084 | 0,110 | 0,170 | 0,283 | 0,42 | 0,5 |
| X^* | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 |
| Y^* | 2,30 | 1,98 | 1,70 | 1,55 | 1,44 | 1,31 | 1,15 | 1,04 | 1,00 |
| e^* | 0,19 | 0,22 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,33 | 0,38 | 0,42 | 0,44 |
| * : valeurs NF ISO 281 ; ** : valeurs usuelles | | | | | | | | | |
| roulements à rotules sur billes | | | | | roulements à rotules sur rouleaux | | | | |
| si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors $P = F_r + Y_1.F_a$ si $\frac{F_a}{F_r} > e$ alors $P = 0,65.F_r + Y_2.F_a$ avec $\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y_1 = 0,42.\cotan(\alpha) \\ Y_2 = 0,65.\cotan(\alpha) \end{cases}$ les valeurs de e , Y_1 et Y_2 sont indiquées dans les tableaux de dimensions avec d , D , b et r . | | | | | si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors $P = F_r + Y_1.F_a$ si $\frac{F_a}{F_r} > e$ alors $P = 0,67.F_r + Y_2.F_a$ avec $\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y_1 = 0,45.\cotan(\alpha) \\ Y_2 = 0,67.\cotan(\alpha) \end{cases}$ les valeurs de e , Y_1 et Y_2 sont indiquées dans les tableaux de dimensions avec d , D , b et r . | | | | |
| roulements à rouleaux coniques | | | | | | | | | |
| si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors $P = F_r$ si $\frac{F_a}{F_r} > e$ alors $P = 0,4.F_r + Y.F_a$ avec $\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y = 0,4.\cotan(\alpha) \end{cases}$ les valeurs de e , Y sont indiquées dans les tableaux de dimensions avec d , D , b et r . | | | | | | | roulements à deux rangées si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$: $P = F_r + Y_1.F_a$ si $\frac{F_a}{F_r} > e$: $P = 0,67.F_r + Y_2.F_a$ avec $\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y_1 = 0,45.\cotan(\alpha) \\ Y_2 = 0,67.\cotan(\alpha) \end{cases}$ mêmes valeurs que rotules sur rix | | |
| roulements à billes à contact oblique | | | | | | | | | |
| | | roulements à une rangée et roulements en tandem (duplex T) | | | | roulements à deux rangées et duplex en X et en O | | | |
| | | si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ | | si $\frac{F_a}{F_r} > e$ | | si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ | | si $\frac{F_a}{F_r} > e$ | |
| α degrés | e | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y |
| 20 | 0,57 | 1 | 0 | 0,43 | 1,00 | 1,0 | 1,09 | 0,70 | 1,63 |
| 25 | 0,68 | 1 | 0 | 0,41 | 0,87 | 1,0 | 0,92 | 0,67 | 1,41 |
| 30 | 0,80 | 1 | 0 | 0,39 | 0,76 | 1,0 | 0,78 | 0,63 | 1,24 |
| 35 | 0,95 | 1 | 0 | 0,37 | 0,66 | 1,0 | 0,66 | 0,60 | 1,07 |
| 40 * | 1,14 | 1 | 0 | 0,35 | 0,57 | 1,0 | 0,55 | 0,57 | 0,93 |
| 45 | 1,34 | 1 | 0 | 0,33 | 0,50 | 1,0 | 0,47 | 0,54 | 0,81 |
| * la valeur $\alpha = 40$ est la plus courante ; pour les angles $\alpha < 20$ les valeurs de e et y dépendent de $\frac{F_a}{C_0}$ | | | | | | | | | |

V - Capacité de charge statique C_0 et charge statique équivalente P_0

Pour un roulement chargé à l'arrêt, ou dans le cas de mouvements de faible amplitude et de petites oscillations, C_0 représente la charge statique limite à ne pas dépasser. Au-delà de cette charge, les déformations des éléments roulants deviennent inadmissibles.

La plupart des fabricants admettent une déformation maximale admissible égale à 0,0001 du diamètre moyen de l'élément roulant (conformément à l'ISO 76).

C_0 est une grandeur caractéristique du roulement indiquée dans les catalogues de fabricants en même temps que d, D, B, C...

Comme C, C_0 est une charge radiale pure. Si le roulement est soumis à une charge combinée F_a plus F_r , il est nécessaire de calculer au préalable la charge statique équivalente P_0 (analogie avec P).

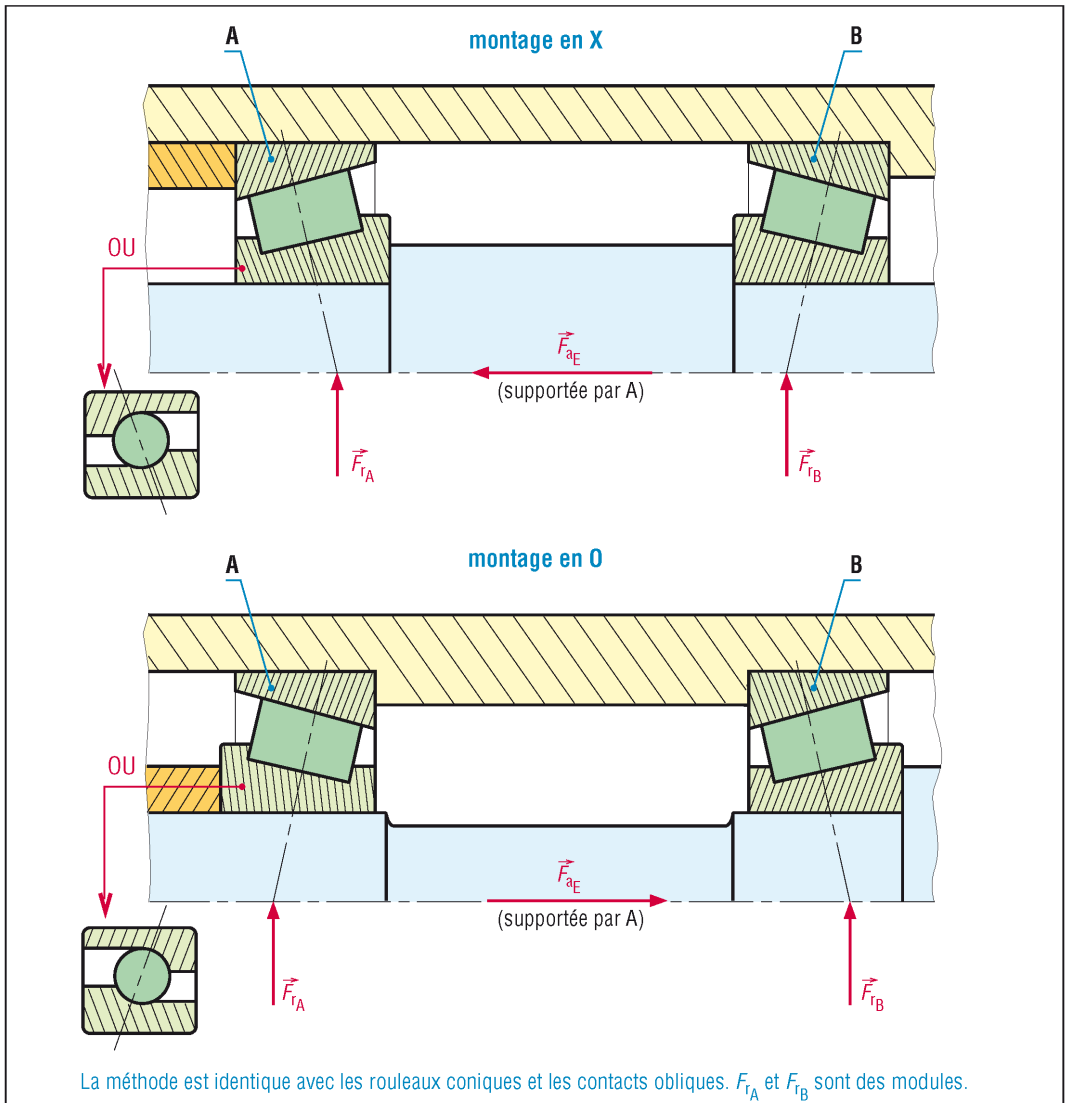
$$P_0 = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a$$

ou $P_0 = F_r$
(la plus grande des 2)
avec $P_0 \cdot s_0 \leq C_0$

| s_0 | r/lts à faibles vitesses | | r/lts à l'arrêt | |
|--|--------------------------|-----------------------|-----------------|------------------|
| | r/lts à billes | r/lts à rouleaux | r/lts à billes | r/lts à rouleaux |
| régulier sans vibrations (si silencieux) | 0,5 à 1 (2) | 1 à 1,5 (3) | 0,4 | 0,8 |
| normal (si silencieux) | 0,5 à 1 (2) | 1 à 1,5 (3,5) | 0,5 | 1 |
| chocs prononcés (si silencieux) | $\geq 1,5$ (≥ 2) | ≥ 3 (≥ 4) | ≥ 1 | ≥ 2 |

Remarque : si le roulement est soumis à une charge radiale pure F_r alors $P_0 = F_r$ avec $P_0 \cdot s_0 \leq C_0$.

| Valeurs normalisées des coefficients X_0 et Y_0 (NF ISO 76) | | | | | | |
|---|---------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|------|
| type de roulements | | roulement à 1 rangée | | roulement à 2 rangées | | |
| | | X_0 | Y_0 | X_0 | Y_0 | |
| roulements à billes | à contact radial | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | |
| | à rotules | 0,5 | $0,22 \cdot \cotan \alpha$ | 1 | $0,44 \cdot \cotan \alpha$ | |
| | à contact oblique | $\alpha = 15^\circ$ | 0,5 | 0,46 | 1 | 0,92 |
| | | $\alpha = 20^\circ$ | 0,5 | 0,42 | 1 | 0,84 |
| | | $\alpha = 25^\circ$ | 0,5 | 0,38 | 1 | 0,76 |
| | | $\alpha = 30^\circ$ | 0,5 | 0,33 | 1 | 0,66 |
| | | $\alpha = 35^\circ$ | 0,5 | 0,29 | 1 | 0,58 |
| | | $\alpha = 40^\circ$ | 0,5 | 0,26 | 1 | 0,52 |
| roulements à rouleaux | à rouleaux coniques | 0,5 | $0,22 \cdot \cotan \alpha$ | 1 | $0,44 \cdot \cotan \alpha$ | |
| | à rotules | 0,5 | $0,22 \cdot \cotan \alpha$ | 1 | $0,44 \cdot \cotan \alpha$ | |



La méthode est identique avec les rouleaux coniques et les contacts obliques. F_{rA} et F_{rB} sont des modules.

| Méthode de calcul ISO | | |
|-------------------------------------|--|--|
| | cas 1 | cas 2 |
| condition à vérifier | $\frac{0,5 F_{rA}}{Y_A} \leq F_{aE} + \left[\frac{0,5 F_{rB}}{Y_B} \right]$ | $\frac{0,5 F_{rA}}{Y_A} > F_{aE} + \left[\frac{0,5 F_{rB}}{Y_B} \right]$ |
| charges axiales totales | $F_{aA} = F_{aE} + \frac{0,5 F_{rB}}{Y_B}$ $F_{aB} = \frac{0,5 F_{rB}}{Y_B}$ | $F_{aA} = \frac{0,5 F_{rA}}{Y_A}$ $F_{aB} = \frac{0,5 F_{rA}}{Y_A} - F_{aE}$ |
| charges équivalentes P_A et P_B | $P_B = F_{rB}$ si $\frac{F_{aA}}{F_{rA}} > e_A$ alors $P_A = 0,4 F_{rA} + Y_A \cdot F_{aA}$ si $\frac{F_{aA}}{F_{rA}} \leq e_A$ alors $P_A = F_{rA}$ | $P_A = F_{rA}$ si $\frac{F_{aB}}{F_{rB}} > e_B$ alors $P_B = 0,4 F_{rB} + Y_B \cdot F_{aB}$ si $\frac{F_{aB}}{F_{rB}} \leq e_B$ alors $P_B = F_{rB}$ |

5. Méthode de calcul ISO. Pour appliquer la méthode, appeler A le roulement supportant F_{aE} .

VI - Calcul des roulements

Données nécessaires : F_a , F_r et N , la vitesse de rotation. La durée de vie L_{10} dépend de ces paramètres.

Autres paramètres usuels : diamètre minimal d_{mini} de l'arbre, fourni par la résistance des matériaux, et D_{maxi} , qui résulte de l'encombrement général et de la place disponible. Faire le choix d'un type de roulement ou du moins en limiter le nombre.

1. Calculs de vérification

Ils sont destinés à vérifier la durée de vie d'un roulement dont les dimensions (d , D , B , C , C_0 , e , Y ...) sont connues.

2. Calculs de détermination

L'objectif est de choisir un roulement et ses dimensions connaissant une durée de vie souhaitée. Il est nécessaire de procéder par itération (calculs de vérification successifs à partir de roulements judicieusement choisis) avant d'envisager un choix définitif.

Il existe de nombreux logiciels d'assistance permettant d'effectuer rapidement ce type de calcul.

3. Cas des roulements à contact oblique et à rouleaux coniques

Pour ces roulements, le calcul de la charge axiale F_a présente une différence du fait de la géométrie particulière des bagues. Pour chaque roulement, l'action de la charge radiale F_r entraîne par « effet de cône », la création d'une charge axiale induite (F_{ai}) s'ajoutant ou se retranchant à celle déjà exercée par l'arbre (F_{aE}).

Dans la méthode de calcul normalisé ISO, $F_{ai} = 0,5 \cdot F_r / Y$. Cette méthode permet de calculer les charges axiales totales F_{aA} et F_{aB} résultant de F_{aE} et des charges axiales induites F_{ai} , puis de déduire les charges équivalentes P_A et P_B .

Les autres calculs (L_{10} ...) ne sont pas différents de ceux des autres roulements.

4. Exemples

Exemple 1

Un roulement à billes à contact radial de dimensions $d = 50$, $D = 110$, $B = 27$, $C = 6\,200$ daN, $C_0 = 3\,800$ daN, supporte la charge combinée $F_a = 400$ daN et $F_r = 1\,000$ daN. Quelle durée de vie peut-on attendre si la vitesse de rotation de l'arbre est de 150 tr/min ?

Solution

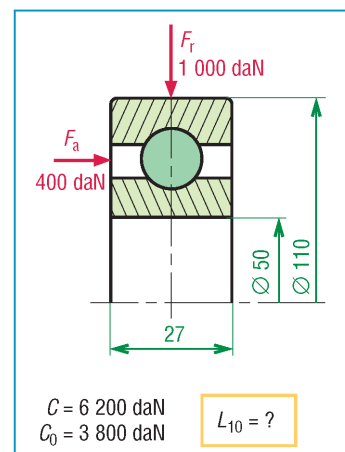
$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{400}{1\,000} = 0,4 \quad \text{et} \quad \frac{F_a}{C_0} = \frac{400}{3\,800} = 0,105$$

Pour ces roulements les valeurs de e et Y dépendent de la valeur de F_a/C_0 .

D'après le tableau page 296 : $F_a/C_0 = 0,105$ est située entre 0,084 et 0,110.

Par correspondance la valeur de e sera située entre 0,28 et 0,30 et celle de Y entre 1,45 et 1,55.

Les valeurs précises sont obtenues par proportionnalité ou interpolation.



$$\frac{e - 0,28}{0,30 - 0,28} = \frac{0,105 - 0,084}{0,110 - 0,084} = \frac{0,021}{0,026} = 0,808 \quad \text{d'où } e = 0,296$$

$$\frac{1,55 - Y}{1,55 - 1,45} = \frac{0,105 - 0,084}{0,110 - 0,084} = 0,808 \quad \text{d'où } Y = 1,47$$

$$\frac{F_a}{F_r} = 0,4 > e \quad \text{d'où :}$$

$$P = X.F_r + Y.F_a = 0,56.1000 + 1,47.400 = 1\,148 \text{ daN}$$

$$L_{10} = (C/P)^n = (6\,200/1148)^3 = 157,5 \text{ (millions de tours)}$$

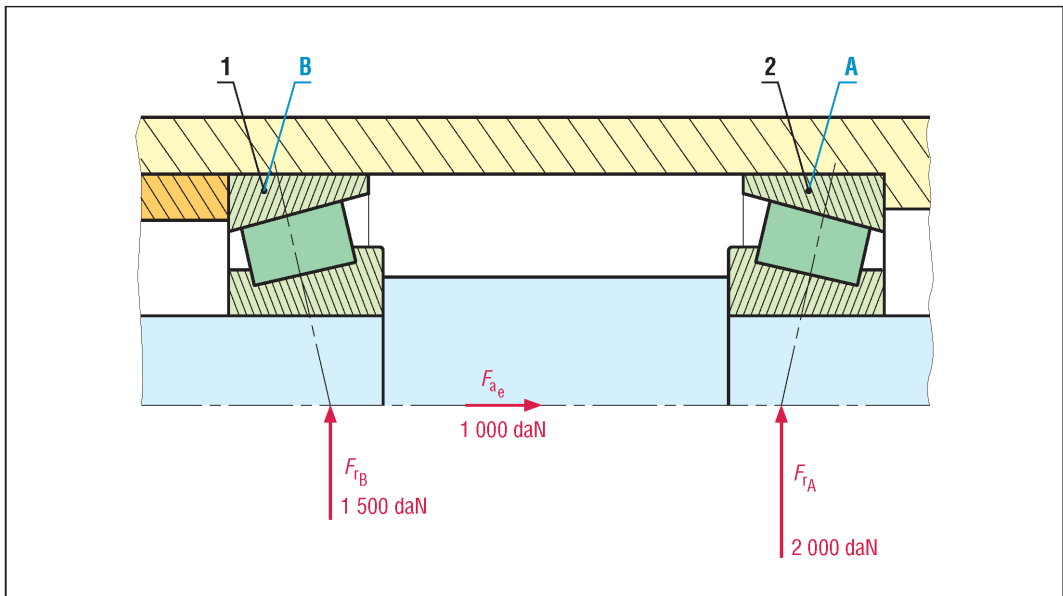
$$L_{10H} = 157,5.10^6/60.150 = 17\,500 \text{ heures}$$

Exemple 2

Déterminer la durée de vie L_{10E} d'un montage de deux roulements à rouleaux coniques 1 et 2, montés en X, tel que $F_{r1} = 1\,500$ daN, $F_{r2} = 2\,000$ daN et $F_{ae} = 1\,000$ daN. L'effort axial F_{ae} est supporté par le roulement 2.

Dimensions : $d = 60$, $D = 95$, $B = 27$, $C = 7\,850$ daN, $C_0 = 7\,650$ daN, $e = 0,33$, $Y = 1,83$ pour le roulement 1

$d = 90$, $D = 140$, $B = 39$, $C = 18\,600$ daN, $C_0 = 19\,600$ daN, $e = 0,27$, $Y = 2,2$ pour le roulement 2.



Solution

Afin de pouvoir appliquer la méthode ISO, le roulement 2 est baptisé A et le roulement 1 devient B. Les données deviennent alors :

$$F_{rA} = F_{r2} = 2\,000 \text{ daN} ; e_A = 0,27 ; Y_A = 2,2 ; C_A = 18\,600 \text{ daN}$$

$$F_{rB} = F_{r1} = 1\,500 \text{ daN} ; e_B = 0,33 ; Y_B = 1,83 ; C_B = 7\,850 \text{ daN}$$

Par la méthode ISO les charges axiales induites sont :

$$\frac{0,5.F_{rA}}{Y_A} = \frac{0,5 \times 2\,000}{2,2} = 454,5 \quad \text{et} \quad \frac{0,5.F_{rB}}{Y_B} = \frac{0,5 \times 1\,500}{1,83} = 409,8$$

$$F_{ae} + \frac{0,5.F_{rB}}{Y_B} = 1\,000 + 409,8 \quad \text{est supérieur à} \quad \frac{0,5.F_{rA}}{Y_A} = 454,5$$

C'est le cas d'application n° 1 de la méthode. Les charges axiales F_a et les charges équivalentes P sur les roulements sont :

$$F_{aA} = F_{ae} + \frac{0,5.F_{rB}}{Y_B} = 1\,409,8 \text{ daN} \quad \text{et} \quad F_{aB} = \frac{0,5.F_{rB}}{Y_B} = 409,8 \text{ daN}$$

$$\frac{F_{aB}}{F_{rB}} = \frac{409,8}{1\,500} = 0,273 < e_B (= 0,33) \quad \text{d'où} \quad P_B = F_{rB} = 1\,500 \text{ daN}$$

$$\frac{F_{aA}}{F_{rA}} = \frac{1\,409,8}{2\,000} = 0,705 > e_A (= 0,27)$$

$$P_A = 0,4.F_{rA} + Y_A.F_{aA} = 800 + 3\,101,5 = 3\,901,5 \text{ daN}$$

Durées de vie correspondantes :

$$L_{10A} = \left(\frac{C_A}{P_A} \right)^{\frac{10}{3}} = \left(\frac{18\,600}{3\,901,5} \right)^{\frac{10}{3}} = 182,4$$

$$L_{10B} = \left(\frac{C_B}{P_B} \right)^{\frac{10}{3}} = \left(\frac{7\,850}{1\,500} \right)^{\frac{10}{3}} = 248,8$$

$$L_{10E} = \left[\left(\frac{1}{182,4} \right)^{1,5} + \left(\frac{1}{248,8} \right)^{1,5} \right]^{-\frac{1}{1,5}} = 131,7$$

$$L_{10EH} = 21\,950 \text{ heures (pour } 100 \text{ tr/min)}$$

VII - Exercices

Exercice 1

Reprendre les données de l'exemple 1 page 299 avec un roulement à contact oblique à deux rangées de billes, $d = 50$, $D = 110$ (voir autres caractéristiques page 304).

Déterminer la durée de vie du roulement.

Réponse : $L_{10} = 235,3$; $L_{10H} = 26\,146$ heures.

Exercice 2

Reprendre les données de l'exemple 1 page 299 avec un roulement à rotule sur rouleaux, $d = 50$, $D = 110$ (voir autres caractéristiques page 308).

Déterminer la durée de vie du roulement.

Réponse : $L_{10} = 3\,197$; $L_{10H} = 355\,240$ heures.

Exercice 3

Reprendre les données de l'exemple 2 page 300 avec $F_{rA} = 1\,000$ daN ; $F_{rB} = 900$ daN ; $F_{aE} = 400$ daN ; $N = 500$ tr/min ; $C_A = 9\,500$ daN ; $e_A = 0,43$; $Y_A = 1,38$; $C_B = 8\,190$ daN ; $e_B = 0,46$; $Y_B = 1,31$.

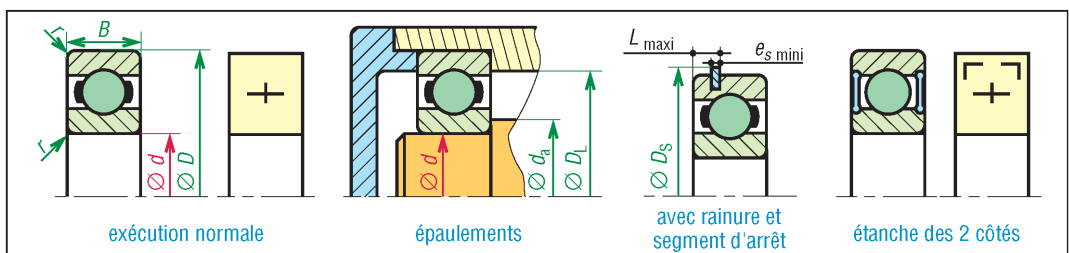
Déterminer les durées de vie des roulements et celle de l'ensemble.

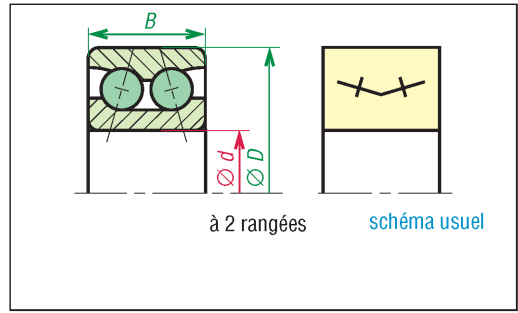
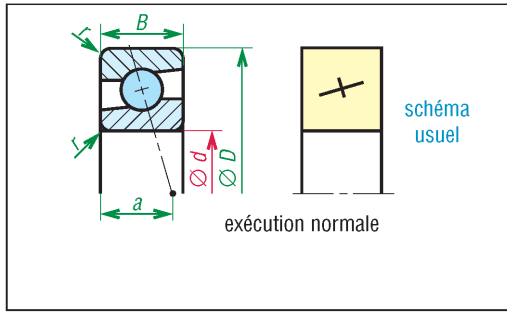
Réponse : $L_{10A} = 18\,545$ heures ; $L_{10B} = 65\,550$ heures ; $L_{10E} = 16\,890$ heures.

| Roulements à une rangée de billes et à contact radial | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------|--------------|----------------|-------------------------------|----------------------|----------|
| exécution normale | | | | | | | | | | exécution particulières usuelles | | | | | | |
| dimensions principales | | | | vitesse limite tr/min graisse | série de base | épaulements en mm | | charges de base | | flasques | | joints | | rainure et segment d'arrêt | | |
| <i>d</i> mm | <i>D</i> mm | <i>B</i> mm | <i>r</i> mm | | | <i>d_a</i> maxi | <i>D_L</i> mini | <i>C</i> daN | <i>C₀</i> daN | d'un côté | des 2 côtés | d'un côté | des 2 côtés | <i>D_s</i> | <i>e_s</i> | <i>L</i> |
| 3 | 9 | 3 | 0,3 | 40 000 | 10 | | | 50 | 20 | * | * | * | * | | | |
| | 10 | 4 | 0,3 | 40 000 | 02 | 5,1 | 7,9 | 70 | 25 | * | * | * | * | | | |
| 4 | 13 | 5 | 0,4 | 38 000 | 02 | 5,7 | 11,4 | 130 | 50 | * | * | * | * | | | |
| | 16 | 5 | 0,5 | 36 000 | 03 | 6,5 | 12,5 | 190 | 70 | * | * | * | * | | | |
| 5 | 16 | 5 | 0,5 | 36 000 | 02 | 7,1 | 13,9 | 190 | 75 | * | * | * | * | | | |
| | 19 | 6 | 0,5 | 32 000 | 03 | 8,0 | 15,5 | 245 | 105 | * | * | * | * | | | |
| 6 | 19 | 6 | 0,5 | 32 000 | 02 | 8,1 | 16,9 | 245 | 105 | * | * | * | * | | | |
| 7 | 19 | 6 | 0,5 | 30 000 | 10 | 9,2 | 16,9 | 245 | 105 | * | * | * | * | | | |
| | 22 | 7 | 0,5 | 30 000 | 02 | 10,5 | 19,8 | 330 | 135 | * | * | * | * | | | |
| 8 | 22 | 7 | 0,5 | 30 000 | 10 | 10,5 | 19,3 | 330 | 135 | * | * | * | * | | | |
| 9 | 24 | 7 | 0,5 | 30 000 | 10 | 11,5 | 21,9 | 365 | 165 | * | * | * | * | | | |
| | 26 | 8 | 1 | 28 000 | 02 | 13,1 | 21,9 | 460 | 196 | * | * | * | * | | | |
| 10 | 26 | 8 | 0,5 | 28 000 | 10 | 12,8 | 23,6 | 460 | 196 | * | * | * | * | | | |
| | 30 | 9 | 1 | 26 000 | 02 | 14,6 | 25,8 | 600 | 265 | * | * | * | * | 34,7 | 1,02 | 3,18 |
| | 35 | 11 | 1 | 26 000 | 03 | 16,6 | 29,2 | 810 | 345 | * | * | * | * | 39,7 | 1,02 | 3,18 |
| 12 | 28 | 8 | 0,5 | 26 000 | 10 | 14,8 | 25,6 | 510 | 240 | * | * | * | * | | | |
| | 32 | 10 | 1 | 24 000 | 02 | 16,5 | 27,9 | 690 | 310 | * | * | * | * | 36,7 | 1,02 | 3,18 |
| | 37 | 12 | 1,5 | 20 000 | 03 | 18,1 | 31,3 | 970 | 420 | * | * | * | * | 41,3 | 1,02 | 3,18 |
| 15 | 32 | 9 | 0,5 | 23 000 | 10 | 18,3 | 29,1 | 560 | 285 | * | * | * | * | 36,7 | 1,02 | 3,18 |
| | 35 | 11 | 1 | 20 000 | 02 | 19,6 | 31,0 | 770 | 375 | * | * | * | * | 39,7 | 1,02 | 3,18 |
| | 42 | 13 | 1,5 | 18 000 | 03 | 21,2 | 36,1 | 1 130 | 540 | * | * | * | * | 46,3 | 1,02 | 3,18 |
| 17 | 35 | 10 | 0,5 | 22 000 | 10 | 20,7 | 31,7 | 600 | 325 | * | * | * | * | 39,7 | 1,02 | 3,18 |
| | 40 | 12 | 1 | 18 000 | 02 | 22,4 | 35,0 | 960 | 475 | * | * | * | * | 44,6 | 1,02 | 3,18 |
| | 47 | 14 | 1,5 | 16 000 | 03 | 24,5 | 40,3 | 1 350 | 660 | * | * | * | * | 52,7 | 1,02 | 3,58 |
| | 62 | 17 | 2 | 12 000 | 04 | 30,3 | 48,7 | 2 270 | 1 080 | * | * | * | * | 67,7 | 1,60 | 4,98 |
| 20 | 42 | 12 | 0,5 | 18 000 | 10 | 25,1 | 37,1 | 940 | 500 | * | * | * | * | 46,3 | 1,02 | 3,18 |
| | 47 | 14 | 1,5 | 15 000 | 02 | 26,2 | 41,1 | 1 280 | 660 | * | * | * | * | 52,7 | 1,02 | 3,58 |
| | 52 | 15 | 2 | 14 000 | 03 | 27,9 | 44,5 | 1 590 | 790 | * | * | * | * | 57,9 | 1,02 | 3,58 |
| | 72 | 19 | 2 | 10 000 | 04 | 37,4 | 69,6 | 2 950 | 1 550 | * | * | * | * | 78,6 | 1,60 | 4,98 |
| 25 | 47 | 12 | 0,5 | 16 000 | 10 | 30,1 | 42,1 | 1 010 | 590 | * | * | * | * | 52,7 | 1,02 | 3,18 |
| | 52 | 15 | 1,5 | 14 000 | 02 | 31,4 | 46,3 | 1 400 | 790 | * | * | * | * | 57,9 | 1,02 | 3,58 |
| | 62 | 17 | 2 | 12 000 | 03 | 34,9 | 53,1 | 2 370 | 1 220 | * | * | * | * | 67,7 | 1,60 | 4,98 |
| | 80 | 21 | 2,5 | 9 000 | 04 | 42,1 | 66,3 | 3 600 | 1 930 | * | * | * | * | 86,6 | 1,60 | 4,98 |
| 30 | 55 | 13 | 0,5 | 13 000 | 10 | 36,2 | 48,8 | 1 260 | 820 | * | * | * | * | 60,7 | 1,02 | 3,18 |
| | 62 | 16 | 1,5 | 10 000 | 02 | 38,0 | 54,6 | 1 950 | 1 130 | * | * | * | * | 67,7 | 1,60 | 4,98 |
| | 72 | 19 | 2 | 9 500 | 03 | 41,7 | 62,3 | 2 800 | 1 580 | * | * | * | * | 78,6 | 1,60 | 4,98 |
| | 90 | 23 | 2,5 | 8 000 | 04 | 47,0 | 73,0 | 4 350 | 2 380 | * | * | * | * | 96,5 | 2,36 | 5,74 |
| 35 | 62 | 14 | 0,5 | 11 000 | 10 | 41,2 | 56,2 | 1 600 | 1 030 | * | * | * | * | 67,7 | 1,60 | 3,78 |
| | 72 | 17 | 2 | 9 100 | 02 | 43,8 | 63,7 | 2 550 | 1 530 | * | * | * | * | 78,6 | 1,60 | 4,98 |
| | 80 | 21 | 2,5 | 8 500 | 03 | 46,4 | 68,4 | 3 350 | 1 910 | * | * | * | * | 86,6 | 1,60 | 4,98 |
| | 100 | 25 | 2,5 | 6 700 | 04 | 53,1 | 81,9 | 5 500 | 3 100 | * | * | * | * | 106,5 | 2,36 | 5,74 |
| 40 | 68 | 15 | 0,5 | 10 000 | 10 | 46,5 | 61,9 | 1 740 | 1 150 | * | * | * | * | 74,6 | 1,60 | 4,19 |
| | 80 | 18 | 2 | 8 500 | 02 | 49,8 | 70,7 | 2 900 | 1 790 | * | * | * | * | 86,6 | 1,60 | 4,98 |
| | 90 | 23 | 2,5 | 7 500 | 03 | 52,9 | 77,6 | 4 050 | 2 390 | * | * | * | * | 96,5 | 2,36 | 5,74 |
| | 110 | 27 | 3 | 6 300 | 04 | 59,6 | 90,4 | 6 400 | 3 650 | * | * | * | * | 116,6 | 2,36 | 5,74 |

| exécution normale | | | | | | | | | | exécution particulière usuelles | | | | | | |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|---------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------|-----------|-------------|----------------------------|----------------------|----------|
| dimensions principales | | | | vitesse limite tr/min graisse | série de base | épaulements en mm | | charges de base | | flasques | | joints | | rainure et segment d'arrêt | | |
| <i>d</i> mm | <i>D</i> mm | <i>B</i> mm | <i>r</i> mm | | | <i>d_a</i> maxi | <i>D_L</i> mini | <i>C</i> daN | <i>C₀</i> daN | d'un coté | des 2 cotés | d'un coté | des 2 cotés | <i>D_s</i> | <i>e_s</i> | <i>L</i> |
| 45 | 75 | 16 | 1 | 9 000 | 10 | 52,3 | 68,1 | 2 100 | 1 520 | * | * | * | * | 81,6 | 1,60 | 4,19 |
| | 85 | 19 | 2 | 8 000 | 02 | 54,4 | 76,6 | 3 250 | 2 050 | * | * | * | * | 91,6 | 1,60 | 4,98 |
| | 100 | 25 | 2,5 | 6 700 | 03 | 59,2 | 86,7 | 5 300 | 3 150 | * | * | * | * | 106,5 | 2,36 | 5,74 |
| | 120 | 29 | 3 | 5 600 | 04 | 66,2 | 99,8 | 7 700 | 4 500 | * | * | * | * | 129,7 | 2,72 | 6,88 |
| 50 | 80 | 16 | 1 | 8 500 | 10 | 57,3 | 73,1 | 2 180 | 1 660 | * | * | * | * | 86,6 | 1,60 | 4,19 |
| | 90 | 20 | 2 | 7 500 | 02 | 59,4 | 81,1 | 3 500 | 2 320 | * | * | * | * | 96,5 | 2,36 | 5,74 |
| | 110 | 27 | 3 | 6 000 | 03 | 65,8 | 95,1 | 6 200 | 3 800 | * | * | * | * | 116,6 | 2,36 | 5,74 |
| | 130 | 31 | 3,5 | 5 000 | 04 | 72,2 | 107,8 | 9 200 | 5 400 | * | * | * | * | 139,7 | 2,72 | 6,88 |
| 55 | 90 | 18 | 1 | 7 500 | 10 | 63,3 | 82,5 | 2 850 | 2 130 | * | * | * | * | 96,5 | 2,36 | 5,33 |
| | 100 | 21 | 2,5 | 6 700 | 02 | 65,9 | 89,6 | 4 350 | 2 900 | * | * | * | * | 106,5 | 2,36 | 5,74 |
| | 120 | 29 | 3 | 5 300 | 03 | 72,1 | 103,4 | 7 200 | 4 500 | * | * | * | * | 129,7 | 2,72 | 6,88 |
| | 140 | 33 | 3,5 | 4 800 | 04 | 76,9 | 118,1 | 10 000 | 6 200 | * | * | * | * | 149,7 | 2,72 | 7,72 |
| 60 | 95 | 18 | 1 | 7 000 | 10 | 68,3 | 87,5 | 2 950 | 2 320 | * | * | * | * | 101,6 | 2,36 | 5,33 |
| | 110 | 22 | 2,5 | 6 000 | 02 | 70,9 | 98,7 | 5 200 | 3 600 | * | * | * | * | 116,6 | 2,36 | 5,74 |
| | 130 | 31 | 3 | 5 000 | 03 | 78,7 | 111,8 | 8 200 | 5 200 | * | * | * | * | 139,7 | 2,72 | 6,88 |
| | 150 | 35 | 3,5 | 4 300 | 04 | 84,0 | 125,5 | 10 900 | 7 000 | * | * | * | * | 159,7 | 2,72 | 7,72 |
| 65 | 100 | 18 | 1 | 6 700 | 10 | 73,3 | 92,5 | 3 050 | 2 500 | * | * | * | * | 106,5 | 2,36 | 5,33 |
| | 120 | 23 | 2,5 | 5 300 | 02 | 78,1 | 106,7 | 5 700 | 4 000 | * | * | * | * | 129,7 | 2,72 | 6,88 |
| | 140 | 33 | 3,5 | 4 600 | 03 | 85,2 | 120,3 | 9 300 | 6 000 | * | * | * | * | 149,7 | 2,72 | 7,72 |
| | 160 | 37 | 3,5 | 4 000 | 04 | 90,0 | 134,0 | 11 800 | 7 900 | * | * | * | * | 169,7 | 2,72 | 7,72 |
| 70 | 110 | 20 | 1 | 6 000 | 10 | 79,8 | 101,0 | 3 600 | 2 850 | * | * | * | * | 116,6 | 2,36 | 5,33 |
| | 125 | 24 | 2,5 | 5 000 | 02 | 84,0 | 111,8 | 6 200 | 4 400 | * | * | * | * | 134,7 | 2,72 | 6,88 |
| | 150 | 35 | 3,5 | 4 500 | 03 | 91,8 | 128,7 | 10 400 | 6 800 | * | * | * | * | 159,7 | 2,72 | 7,72 |
| | 180 | 42 | 4 | 3 600 | 04 | 99,7 | 150,3 | 14 400 | 10 300 | * | * | * | * | 192,9 | 3,00 | 8,79 |
| 75 | 115 | 20 | 1 | 5 600 | 10 | 84,8 | 106,0 | 3 950 | 3 350 | * | * | * | * | 121,6 | 2,36 | 5,33 |
| | 130 | 25 | 2,5 | 4 800 | 02 | 87,4 | 117,2 | 6 600 | 4 950 | * | * | * | * | 139,7 | 2,72 | 6,88 |
| | 160 | 37 | 3,5 | 4 000 | 03 | 98,3 | 137,2 | 11 300 | 7 700 | * | * | * | * | 169,7 | 2,72 | 7,72 |
| | 190 | 45 | 4 | 3 400 | 04 | 107,2 | 157,7 | 15 300 | 11 400 | * | * | * | * | 202,9 | 3,00 | 8,79 |
| 80 | 125 | 22 | 1 | 5 300 | 10 | 91,4 | 114,4 | 4 750 | 3 950 | * | * | * | * | 134,7 | 2,72 | 5,69 |
| | 140 | 26 | 3 | 4 500 | 02 | 95,6 | 126,2 | 7 300 | 5 300 | * | * | * | * | 149,7 | 2,72 | 7,72 |
| | 170 | 39 | 3,5 | 3 800 | 03 | 104,9 | 145,6 | 12 300 | 8 600 | * | * | * | * | 182,8 | 3,00 | 8,79 |
| | 200 | 48 | 4 | 3 200 | 04 | 117,0 | 167,0 | 16 300 | 12 500 | * | * | * | * | 212,9 | 3,00 | 8,79 |
| 85 | 130 | 22 | 1 | 5 000 | 10 | 96,4 | 119,4 | 4 950 | 4 300 | * | * | * | * | 139,7 | 2,72 | 5,69 |
| | 150 | 28 | 3 | 4 300 | 02 | 102,6 | 137,9 | 8 300 | 6 400 | * | * | * | * | 159,7 | 2,72 | 7,72 |
| | 180 | 41 | 4 | 3 400 | 03 | 111,4 | 154,1 | 13 300 | 9 700 | * | * | * | * | 192,9 | 3,00 | 8,79 |
| | 210 | 52 | 4 | 3 000 | 04 | | | 16 400 | 13 400 | * | * | * | * | | | |
| 90 | 140 | 24 | 1,5 | 4 500 | 10 | 102,9 | 127,9 | 5 800 | 4 950 | * | * | * | * | 149,7 | 2,72 | 6,53 |
| | 160 | 30 | 3 | 4 000 | 02 | 107,1 | 142,5 | 9 600 | 7 100 | * | * | * | * | 169,7 | 2,72 | 7,72 |
| | 190 | 43 | 4 | 3 400 | 03 | 117,8 | 163,0 | 14 300 | 10 700 | * | * | * | * | 202,9 | 3,00 | 8,79 |
| | 225 | 54 | 5 | 2 800 | 04 | | | 19 300 | 16 300 | * | * | * | * | | | |

e_s est une cote mini ($e_s \text{ maxi} = e_s + 0,1 \text{ mm}$), D_s et L sont des cotes maxi



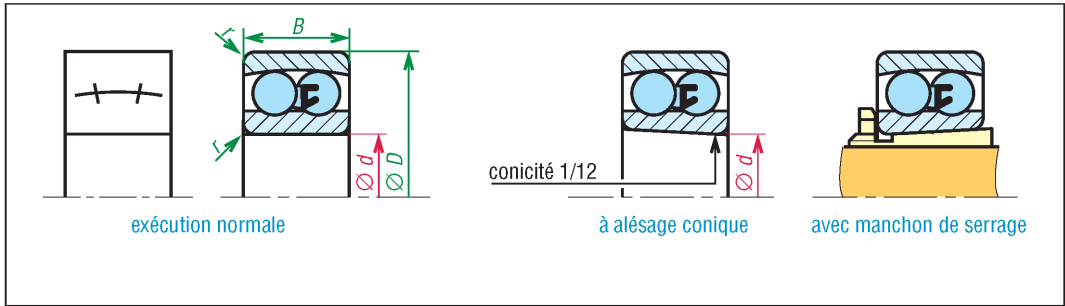


| Charge dynamique équivalente | |
|--|---------------------------|
| angle de contact $\alpha = 40^\circ$ roulement à une rangée | |
| pour $(F_a / F_r) \leq 1,14$ | $P = F_r$ |
| pour $(F_a / F_r) > 1,14$ | $P = 0,35.F_r + 0,57.F_a$ |

| Charge dynamique équivalente | |
|--|---------------------------|
| angle de contact $\alpha = 30^\circ$ roulement à deux rangées | |
| pour $(F_a / F_r) \leq 0,80$ | $P = F_r + 0,78.F_a$ |
| pour $(F_a / F_r) > 0,80$ | $P = 0,63.F_r + 1,24.F_a$ |

| Roulements à contact oblique à une rangée $\alpha = 40^\circ$ | | | | | | | | | | Roulements à contact oblique à 2 rangées $\alpha = 30^\circ$ | | | | | | | | | |
|---|------------|----------|------------|----------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|--|------------|--------------|------------|------------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------|--|--|
| dimensions principales | | | | | vitesse limite tr/min graisse | série de base N° | charges de base | | | dimensions principales | | | | | vitesse limite tr/min graisse | série de base N° | charges de base | | |
| d mm | D mm | B mm | r mm | a mm | | | C daN | C ₀ daN | C _e daN duplex | d mm | D mm | B mm | r mm | C daN | | | C ₀ daN | | |
| 10 | 30 | 9 | 1 | 13 | 20 000 | 02 | 500 | 240 | 810 | 10 | 30 | 14 | 1 | 16 000 | 02 | 780 | 520 | | |
| 12 | 32 | 10 | 1 | 14 | 19 000 | 02 | 700 | 350 | 1 140 | 12 | 32 | 15,9 | 1 | 15 000 | 02 | 1 070 | 640 | | |
| 15 | 35 42 | 11 13 | 1 | 16 19 | 18 000 14 000 | 02 03 | 810 1 000 | 430 500 | 1 310 1 625 | 15 | 35 42 | 15,9 19 | 1 | 13 000 11 000 | 02 03 | 1 180 1 620 | 710 1 050 | | |
| 17 | 40 47 | 12 14 | 0,6 1,5 | 18 21 | 15 000 12 000 | 02 03 | 990 1 480 | 550 800 | 1 610 2 405 | 17 | 40 47 | 17,5 22,2 | 0,6 1,5 | 11 000 10 000 | 02 03 | 1 460 2 090 | 900 1 500 | | |
| 20 | 47 52 | 14 15 | 1,5 2 | 21 23 | 13 000 11 000 | 02 03 | 1 330 1 730 | 760 970 | 2 160 2 810 | 20 | 47 52 | 20,6 22,2 | 1,5 2 | 9 700 9 000 | 02 03 | 1 960 2 460 | 1 250 1 830 | | |
| 25 | 52 62 | 15 17 | 1,5 2 | 24 27 | 14 000 7 500 | 02 03 | 1 480 2 440 | 940 1 470 | 2 400 3 970 | 25 | 52 62 | 20,6 25,4 | 1,5 2 | 8 400 7 500 | 02 03 | 2 240 3 400 | 1 820 2 650 | | |
| 30 | 62 72 | 16 19 | 1,5 2 | 27 31 | 10 000 7 500 | 02 03 | 2 050 3 100 | 1 350 1 990 | 3 350 5 050 | 30 | 62 72 | 23,8 30,2 | 1,5 2 | 7 100 6 400 | 02 03 | 3 200 4 800 | 2 700 3 800 | | |
| 35 | 72 80 | 17 21 | 2 2,5 | 31 35 | 8 000 7 000 | 02 03 | 2 700 3 650 | 1 840 2 410 | 4 400 6 000 | 35 | 72 80 | 27 34,9 | 2 2,5 | 6 100 5 700 | 02 03 | 4 350 6 100 | 3 750 4 950 | | |
| 40 | 80 90 | 18 23 | 2 2,5 | 34 39 | 7 000 6 500 | 02 03 | 3 200 4 500 | 2 300 3 000 | 5 200 7 300 | 40 | 80 90 | 30,2 36,5 | 2 2,5 | 5 400 5 000 | 02 03 | 5 300 7 100 | 4 650 6 300 | | |
| 45 | 85 100 | 19 25 | 2 2,5 | 37 43 | 6 500 5 500 | 02 03 | 3 600 5 800 | 2 650 4 000 | 5 900 9 500 | 45 | 85 100 | 30,2 39,7 | 2 2,5 | 5 000 4 500 | 02 03 | 4 800 6 900 | 3 700 5 100 | | |
| 50 | 90 110 | 20 27 | 2 3 | 39 47 | 6 000 5 000 | 02 03 | 3 750 6 800 | 2 850 4 800 | 6 100 11 100 | 50 | 90 110 | 30,2 44,4 | 2 3 | 4 600 4 100 | 02 03 | 5 100 8 100 | 4 200 6 200 | | |
| 55 | 100 120 | 21 29 | 2,5 3 | 43 51 | 5 500 4 500 | 02 03 | 4 650 7 900 | 3 600 5 600 | 7 500 12 800 | 55 | 100 120 | 33,3 49,2 | 2,5 3 | 4 200 3 700 | 02 03 | 6 600 11 900 | 6 900 11 300 | | |
| 60 | 110 130 | 22 31 | 2,5 2,5 | 47 56 | 5 000 4 300 | 02 03 | 5 600 9 000 | 4 450 6 500 | 9 100 14 600 | 60 | 110 130 | 36,5 54 | 2,5 2,5 | 3 800 3 400 | 02 03 | 8 400 13 700 | 8 500 13 300 | | |
| 65 | 120 140 | 23 33 | 2,5 3,5 | 50 60 | 4 500 4 000 | 02 03 | 6 400 10 250 | 5 300 7 550 | 10 400 16 600 | 65 | 120 140 | 38,1 58,7 | 2,5 3,5 | 3 500 3 200 | 02 03 | 9 000 15 700 | 9 700 15 300 | | |
| 70 | 125 150 | 24 35 | 2,5 3,5 | 53 64 | 4 300 3 600 | 02 03 | 6 900 11 450 | 5 800 8 600 | 11 200 18 600 | 70 | 125 150 | 39,7 63,5 | 2,5 3,5 | 3 300 3 000 | 02 03 | 10 000 17 400 | 10 800 17 200 | | |
| 75 | 130 160 | 25 37 | 2,5 3,5 | 56 68 | 4 000 3 400 | 02 03 | 7 200 12 400 | 6 200 9 750 | 11 700 20 200 | 75 | 130 160 | 41,3 68,3 | 2,5 3,5 | 3 200 2 800 | 02 03 | 9 900 18 400 | 10 900 18 200 | | |
| 80 | 140 170 | 26 39 | 3 3,5 | 59 72 | 3 700 3 200 | 02 03 | 8 050 13 500 | 6 900 10 900 | 13 100 21 900 | 80 | 140 170 | 44,4 68,3 | 3 3,5 | 3 000 2 600 | 02 03 | 11 900 20 300 | 13 300 20 500 | | |
| 85 | 150 180 | 28 41 | 3 4 | 64 76 | 3 500 3 000 | 02 03 | 8 600 14 500 | 7 550 12 200 | 14 000 23 600 | 85 | 150 180 | 49,2 73 | 3 4 | 2 800 2 400 | 02 03 | 12 900 22 000 | 14 600 23 000 | | |
| 90 | 160 190 | 30 43 | 3 4 | 68 80 | 3 200 2 800 | 02 03 | 10 200 15 700 | 8 800 13 500 | 16 600 25 500 | 90 | 160 190 | 52,4 73 | 3 4 | 2 600 2 200 | 02 03 | 13 700 24 000 | 16 500 24 000 | | |
| 95 | 170 200 | 32 45 | 3,5 4 | 72 85 | 3 000 2 600 | 02 03 | 11 600 16 600 | 10 000 15 000 | 18 800 27 000 | 95 | 170 200 | 55,6 77,8 | 3,5 4 | 2 400 2 000 | 02 03 | 14 600 26 000 | 18 500 29 000 | | |
| 100 | 180 215 | 34 47 | 3,5 4 | 76 90 | 2 800 2 400 | 02 03 | 13 000 19 100 | 11 500 17 700 | 31 000 31 000 | 100 | 180 215 | 60,3 82,6 | 3,5 4 | 2 200 1 800 | 02 03 | 16 000 28 000 | 20 000 31 500 | | |

Remarques : $C_e = 1,625.C$ et $C_{0e} = 2C_0$ pour montages duplex X, O, T

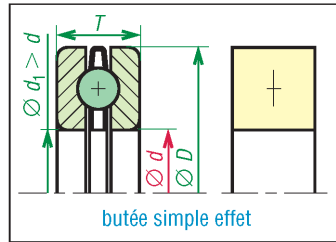


Charge dynamique équivalente

pour $(F_a / F_r) \leq e$
 $P = F_r + Y_1 \cdot F_a$

pour $(F_a / F_r) > e$
 $P = 0,65 \cdot F_r + Y_2 \cdot F_a$

(rotule)



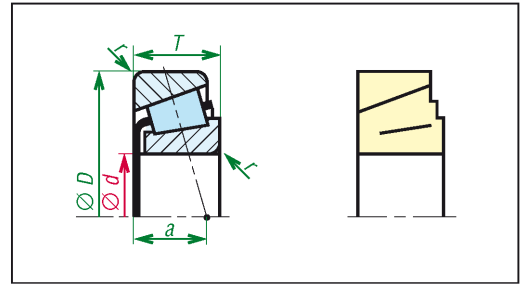
Charge dynamique équivalente

$P = F_a$
 (dans tous les cas)

(butée)

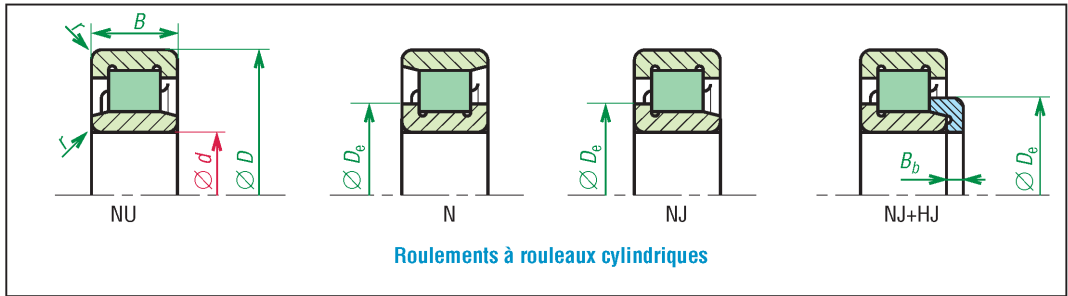
| Roulements à rotule sur bille | | | | | | | | | | | Butées à billes | | | | | | | |
|-------------------------------|------------|----------|------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------|--------------------|--------------|----------------|----------------|------------------------|------------|----------|------------|-------------------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| dimensions principales | | | | vitesse limite tr/min graisse | série de base N° | charges et coefficients de base | | | | | dimensions principales | | | | vitesse limite tr/min graisse | série de base N° | charges de base | |
| d mm | D mm | B mm | r mm | | | C daN | C ₀ daN | e | Y ₁ | Y ₂ | d mm | D mm | T mm | r mm | | | C daN | C ₀ daN |
| 10 | 30 30 | 9 14 | 0,6 1 | 23 000 22 000 | 02 22 | 570 760 | 120 170 | 0,33 0,31 | 1,9 2,0 | 3 3,1 | 10 | 24 26 | 9 11 | 0,5 1 | 7 200 6 000 | 11 12 | 870 1 080 | 880 1 060 |
| 12 | 32 37 | 10 12 | 0,6 1 | 22 000 18 000 | 02 03 | 570 980 | 140 230 | 0,31 0,33 | 2,0 1,8 | 3,1 2,9 | 12 | 26 28 | 9 11 | 0,5 1 | 7 100 6 000 | 11 12 | 905 1 120 | 1 000 1 220 |
| 15 | 35 42 | 11 13 | 0,6 1 | 19 000 17 000 | 02 03 | 770 980 | 200 265 | 0,33 0,33 | 1,9 1,9 | 3 3 | 15 | 28 32 | 9 12 | 0,5 1 | 7 000 5 600 | 11 12 | 1 020 1 520 | 1 200 1 640 |
| 17 | 40 47 | 12 14 | 0,6 1 | 17 000 14 000 | 02 03 | 810 1250 | 250 350 | 0,31 0,33 | 2,0 1,9 | 3,1 3 | 17 | 30 35 | 9 12 | 0,5 1 | 7 000 5 600 | 11 12 | 1 100 1 560 | 1 440 1 880 |
| 20 | 47 52 | 14 15 | 1 2 | 15 500 12 000 | 02 03 | 1 010 1 270 | 320 400 | 0,28 0,3 | 2,2 2,1 | 3,5 3,3 | 20 | 35 40 | 10 14 | 0,5 1 | 6 300 5 000 | 11 12 | 1 450 2 160 | 1 970 2 600 |
| 25 | 52 62 | 15 17 | 1 2 | 13 000 10 000 | 02 03 | 1 230 1 840 | 400 600 | 0,27 0,28 | 2,3 2,2 | 3,6 3,5 | 25 | 42 47 | 11 15 | 1 1 | 5 300 4 500 | 11 12 | 1 760 2 700 | 2 750 3 600 |
| 30 | 62 72 | 16 19 | 1 2 | 10 000 9 000 | 02 03 | 1 590 2 170 | 570 780 | 0,24 0,25 | 2,6 2,5 | 4,1 3,9 | 30 | 47 52 | 11 16 | 1 1,5 | 5 000 4 000 | 11 12 | 1 820 2 850 | 3 150 4 350 |
| 35 | 72 80 | 17 21 | 2 2,5 | 9 000 7 500 | 02 03 | 1 600 2 550 | 670 980 | 0,23 0,25 | 2,7 2,5 | 4,2 3,9 | 35 | 52 62 | 12 18 | 1 1,5 | 4 700 3 500 | 11 12 | 1 950 3 850 | 3 800 5 800 |
| 40 | 80 90 | 18 23 | 2 2,5 | 8 500 6 500 | 02 03 | 1 950 3 000 | 870 1 220 | 0,22 0,24 | 2,9 2,6 | 4,5 4,1 | 40 | 60 68 | 13 19 | 1 1,5 | 4 200 3 200 | 11 12 | 2 600 4 200 | 5 100 7 000 |
| 45 | 85 100 | 19 25 | 2 2,5 | 7 500 6 200 | 02 03 | 2 200 3 850 | 9 600 1 600 | 0,21 0,25 | 3 2,5 | 4,6 3,9 | 45 | 65 73 | 14 20 | 1 1,5 | 4 000 3 000 | 11 12 | 2 700 4 500 | 5 700 8 200 |
| 50 | 90 110 | 20 27 | 2 3 | 7 000 5 500 | 02 03 | 2 300 4 400 | 1 080 1 750 | 0,20 0,24 | 3,2 2,6 | 4,9 4,1 | 50 | 70 78 | 14 22 | 1 1,5 | 3 800 2 800 | 11 12 | 2 800 4 600 | 6 400 8 800 |
| 55 | 100 120 | 21 29 | 2,5 3 | 6 200 5 000 | 02 03 | 2 700 5 050 | 1 350 2 250 | 0,20 0,23 | 3,2 2,7 | 4,9 4,2 | 55 | 78 90 | 16 25 | 1 1,5 | 3 300 2 500 | 11 12 | 3 350 6 700 | 7 900 12 300 |
| 60 | 110 130 | 22 31 | 2,5 2,5 | 5 500 4 500 | 02 03 | 3 000 5 700 | 1 550 2 650 | 0,18 0,23 | 3,5 2,7 | 5,3 4,2 | 60 | 85 95 | 17 26 | 1,5 1,5 | 3 200 2 400 | 11 12 | 4 000 7 100 | 9 500 14 100 |
| 65 | 120 140 | 23 33 | 2,5 3,5 | 5 200 4 200 | 02 03 | 3 150 6 200 | 1 730 2 900 | 0,18 0,23 | 3,6 2,7 | 5,5 4,2 | 65 | 90 100 | 18 27 | 1,5 1,5 | 3 000 2 400 | 11 12 | 4 050 7 300 | 10 000 15 000 |
| 70 | 125 150 | 24 35 | 2,5 3,5 | 5 000 4 100 | 02 03 | 3 450 7 400 | 1 900 3 600 | 0,18 0,22 | 3,6 2,9 | 5,5 4,4 | 70 | 95 105 | 18 27 | 1,5 1,5 | 2 800 2 200 | 11 12 | 4 200 7 400 | 10 900 16 000 |
| 75 | 130 160 | 25 37 | 2,5 3,5 | 4 600 3 800 | 02 03 | 3 800 7 900 | 2 150 3 800 | 0,18 0,22 | 3,6 2,8 | 5,5 4,4 | 75 | 100 110 | 19 27 | 1,5 1,5 | 2 700 2 200 | 11 12 | 4 300 7 500 | 11 800 17 100 |
| 80 | 140 170 | 26 39 | 3 3,5 | 4 400 3 600 | 02 03 | 4 000 8 500 | 2 400 4 200 | 0,17 0,22 | 3,8 2,8 | 5,5 4,4 | 80 | 105 115 | 19 28 | 1,5 1,5 | 2 700 2 100 | 11 12 | 4 350 7 600 | 12 300 18 200 |
| 85 | 150 180 | 28 41 | 3 4 | 4 000 3 500 | 02 03 | 4 900 9 500 | 2 900 4 500 | 0,17 0,22 | 3,8 2,8 | 5,5 4,3 | 85 | 110 125 | 19 31 | 1,5 1,5 | 2 700 1 900 | 11 12 | 4 450 9 200 | 13 300 21 700 |
| 90 | 160 190 | 30 43 | 3 4 | 3 800 3 200 | 02 03 | 5 800 9 700 | 3 100 4 700 | 0,17 0,22 | 3,8 2,8 | 5,5 4,3 | 90 | 120 135 | 22 35 | 1,5 2 | 2 400 1 700 | 11 12 | 5 800 12 900 | 16 600 28 500 |
| 95 | 170 200 | 32 45 | 3,5 4 | 3 600 3 100 | 02 03 | 6 400 11 100 | 3 600 5 200 | 0,17 0,22 | 3,8 2,8 | 5,5 4,3 | 100 | 135 150 | 25 38 | 1,5 2 | 2 100 1 600 | 11 12 | 8 300 15 800 | 23 000 34 500 |
| 100 | 180 215 | 34 47 | 3,5 4 | 3 400 3 100 | 02 03 | 6 900 12 500 | 4 000 5 800 | 0,17 0,22 | 3,8 2,8 | 5,5 4,3 | 110 | 145 160 | 25 38 | 1,5 2 | 2 000 1 500 | 11 12 | 8 400 16 500 | 25 000 39 000 |

| Charge dynamique équivalente | |
|------------------------------|-----------------------|
| pour $(F_a / F_r) \leq e$ | $P = F_r$ |
| pour $(F_a / F_r) > e$ | $P = 0,4.F_r + Y.F_a$ |



| Roulements à rouleaux coniques | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----|----------------|-----------------|-----------------------|
| dimensions principales | | | | | vitesse limite tr/min graisse | série de base N° | coefficients pour les calculs | | | charges de base | |
| d mm | D mm | T mm | a mm | r mm | | | e | Y | Y ₀ | C daN | C ₀ daN |
| 15 | 42 | 14,25 | 9 | 1 | 10 000 | 03 | 0,28 | 2,1 | 1,1 | 2 200 | 1 450 |
| 17 | 40 | 13,25 | 17 | 1 | 10 000 | 02 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 1 800 | 2 000 |
| | 47 | 15,25 | 10,5 | 1 | 9 000 | 03 | 0,28 | 2,1 | 1,1 | 2 950 | 2 650 |
| 20 | 47 | 15,25 | 11 | 1 | 8 500 | 02 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 3 100 | 3 200 |
| | 52 | 16,25 | 11 | 1,5 | 8 000 | 03 | 0,30 | 2,0 | 1,1 | 2 550 | 3 300 |
| | 52 | 22,25 | 14 | 1,5 | 8 000 | 23 | 0,30 | 2,0 | 1,1 | 4 180 | 4 830 |
| 25 | 47 | 15,0 | 12 | 1 | 8 000 | 20 | 0,43 | 1,4 | 0,8 | 2 850 | 3 500 |
| | 52 | 16,25 | 12,5 | 1,5 | 7 500 | 02 | 0,37 | 1,6 | 0,9 | 3 600 | 3 950 |
| | 62 | 18,25 | 12,5 | 1,5 | 6 700 | 03 | 0,31 | 2,0 | 1,0 | 4 600 | 4 300 |
| | 62 | 25,25 | 16 | 1,5 | 6 000 | 23 | 0,30 | 2,0 | 1,1 | 6 030 | 7 230 |
| 30 | 62 | 17,25 | 14 | 1,5 | 6 300 | 02 | 0,37 | 1,6 | 0,9 | 4 600 | 4 900 |
| | 62 | 21,25 | 15 | 1,5 | 6 300 | 22 | 0,37 | 1,6 | 0,9 | 5 000 | 6 200 |
| | 72 | 20,75 | 16 | 1,5 | 5 600 | 03 | 0,31 | 1,9 | 1,1 | 5 500 | 6 100 |
| | 72 | 28,75 | 18 | 1,5 | 5 000 | 23 | 0,31 | 1,9 | 1,1 | 7 300 | 9 000 |
| 35 | 72 | 18,25 | 15 | 1,5 | 5 300 | 02 | 0,37 | 1,6 | 0,9 | 5 800 | 6 200 |
| | 72 | 24,25 | 18,5 | 1,5 | 5 300 | 22 | 0,37 | 1,6 | 0,9 | 7 000 | 8 200 |
| | 80 | 22,75 | 16,5 | 2,0 | 5 000 | 03 | 0,31 | 1,9 | 1,1 | 7 300 | 8 500 |
| | 80 | 32,75 | 20,5 | 2,0 | 4 500 | 23 | 0,31 | 1,9 | 1,1 | 10 000 | 12 300 |
| 40 | 80 | 19,75 | 16,5 | 2,0 | 4 800 | 02 | 0,37 | 1,6 | 0,9 | 7 800 | 8 800 |
| | 80 | 24,75 | 20 | 2,0 | 4 800 | 22 | 0,37 | 1,6 | 0,9 | 7 800 | 8 800 |
| | 90 | 25,25 | 19 | 2,0 | 4 500 | 03 | 0,35 | 1,7 | 1,0 | 8 900 | 9 600 |
| | 90 | 35,25 | 23 | 2,0 | 4 300 | 23 | 0,35 | 1,7 | 1,0 | 11 500 | 15 000 |
| 45 | 85 | 20,75 | 18 | 2,0 | 4 400 | 02 | 0,40 | 1,5 | 0,8 | 6 700 | 7 400 |
| | 85 | 24,75 | 21 | 2,0 | 4 300 | 22 | 0,40 | 1,5 | 0,8 | 8 100 | 9 800 |
| | 100 | 27,25 | 21 | 2,0 | 4 000 | 03 | 0,35 | 1,7 | 1,0 | 11 200 | 12 200 |
| | 100 | 38,25 | 25 | 2,0 | 3 800 | 23 | 0,35 | 1,7 | 1,0 | 13 200 | 17 200 |
| 50 | 90 | 21,75 | 19 | 2,0 | 4 000 | 02 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 7 600 | 8 900 |
| | 90 | 24,75 | 21 | 2,0 | 4 000 | 22 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 9 300 | 10 000 |
| | 110 | 29,25 | 23 | 2,5 | 3 500 | 03 | 0,35 | 1,7 | 1,0 | 12 400 | 13 400 |
| | 110 | 42,25 | 27,5 | 2,5 | 3 400 | 23 | 0,35 | 1,7 | 1,0 | 16 900 | 21 000 |
| 55 | 100 | 22,75 | 20 | 2,0 | 3 700 | 02 | 0,40 | 1,5 | 0,8 | 9 800 | 11 400 |
| | 100 | 26,75 | 24 | 2,0 | 3 600 | 22 | 0,40 | 1,5 | 0,8 | 10 500 | 14 100 |
| | 120 | 31,5 | 24,5 | 2,5 | 3 200 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 14 800 | 16 300 |
| | 120 | 45,5 | 30,0 | 2,5 | 3 200 | 23 | 0,35 | 1,7 | 1,0 | 20 600 | 27 500 |

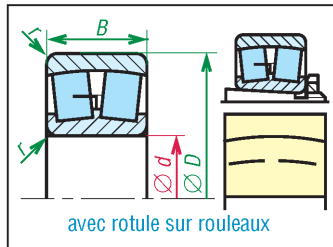
| dimensions principales | | | | | vitesse limite tr/min graisse | série de base N° | coefficients pour les calculs | | | charges de base | |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----|----------------|-----------------|-----------------------|
| d mm | D mm | T mm | a mm | r mm | | | e | Y | Y ₀ | C daN | C ₀ daN |
| | | | | | | | | | | | |
| 60 | 110 | 23,75 | 22 | 2,0 | 3 400 | 02 | 0,40 | 1,5 | 0,8 | 9 900 | 11 700 |
| | 110 | 29,75 | 25 | 2,0 | 3 300 | 22 | 0,40 | 1,5 | 0,8 | 11 500 | 16 000 |
| | 130 | 33,5 | 26 | 2,5 | 3 000 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 15 000 | 16 000 |
| | 130 | 48,5 | 32,5 | 3,0 | 2 900 | 23 | 0,35 | 1,7 | 1,0 | 22 300 | 31 000 |
| 65 | 120 | 24,75 | 23 | 2,0 | 3 000 | 02 | 0,40 | 1,5 | 0,8 | 11 400 | 14 600 |
| | 120 | 32,75 | 26,5 | 2,0 | 3 000 | 22 | 0,40 | 1,5 | 0,8 | 15 100 | 20 900 |
| | 140 | 36,0 | 28 | 3,0 | 2 700 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 19 800 | 22 200 |
| | 140 | 51,0 | 34 | 3,0 | 2 700 | 23 | 0,35 | 1,7 | 1,0 | 25 100 | 36 000 |
| 70 | 125 | 26,25 | 25 | 2,0 | 2 900 | 02 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 12 000 | 15 700 |
| | 125 | 33,25 | 28,5 | 2,0 | 2 800 | 22 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 15 600 | 22 400 |
| | 150 | 38,0 | 30 | 3,0 | 2 400 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 22 300 | 25 000 |
| | 150 | 54,0 | 36,5 | 3,0 | 2 400 | 23 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 28 400 | 40 700 |
| 75 | 115 | 25,0 | 25 | 1,5 | 2 900 | 20 | 0,46 | 1,3 | 0,7 | 10 800 | 17 000 |
| | 130 | 27,25 | 27 | 2,0 | 2 800 | 02 | 0,43 | 1,4 | 0,8 | 13 600 | 17 900 |
| | 130 | 33,25 | 30 | 2,0 | 2 700 | 22 | 0,44 | 1,4 | 0,8 | 16 600 | 22 700 |
| | 160 | 40,0 | 31 | 3,0 | 2 300 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 23 000 | 22 200 |
| 80 | 125 | 29,0 | 27 | 1,5 | 2 700 | 20 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 14 900 | 23 900 |
| | 140 | 28,25 | 28 | 2,5 | 2 500 | 02 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 15 000 | 18 700 |
| | 140 | 35,25 | 31 | 2,5 | 2 500 | 22 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 17 700 | 24 900 |
| | 170 | 42,5 | 33 | 3,0 | 2 200 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 27 000 | 30 500 |
| 85 | 130 | 29,0 | 28 | 1,5 | 2 600 | 20 | 0,44 | 1,4 | 0,8 | 15 100 | 23 500 |
| | 150 | 30,5 | 30 | 2,5 | 2 300 | 02 | 0,43 | 1,4 | 0,8 | 16 700 | 23 500 |
| | 150 | 38,5 | 35 | 2,5 | 2 300 | 22 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 20 500 | 30 500 |
| | 180 | 44,5 | 35 | 2,5 | 2 000 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 30 000 | 33 100 |
| 90 | 140 | 32,0 | 30 | 2,0 | 2 400 | 20 | 0,41 | 1,4 | 0,8 | 18 300 | 27 500 |
| | 160 | 32,5 | 31 | 2,5 | 2 200 | 02 | 0,43 | 1,4 | 0,8 | 19 400 | 23 600 |
| | 160 | 42,5 | 36 | 2,5 | 2 200 | 22 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 25 000 | 34 800 |
| | 190 | 46,5 | 36 | 2,5 | 1 800 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 32 000 | 35 000 |
| 95 | 145 | 32,0 | 31,5 | 2,0 | 2 300 | 20 | 0,44 | 1,4 | 0,8 | 18 600 | 28 500 |
| | 170 | 34,5 | 33 | 2,5 | 2 100 | 02 | 0,43 | 1,4 | 0,8 | 21 000 | 25 500 |
| | 170 | 45,5 | 38,5 | 3,0 | 2 100 | 22 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 30 000 | 40 500 |
| | 200 | 49,5 | 39 | 3,0 | 1 700 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 34 500 | 37 500 |
| 100 | 150 | 32,0 | 32,5 | 2,0 | 2 200 | 20 | 0,46 | 1,3 | 0,7 | 18 700 | 30 000 |
| | 180 | 37,0 | 36 | 2,5 | 2 000 | 02 | 0,43 | 1,4 | 0,8 | 24 000 | 29 500 |
| | 180 | 49,0 | 41 | 3,0 | 2 000 | 22 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 32 000 | 47 800 |
| | 215 | 51,5 | 40 | 3,0 | 1 700 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 38 000 | 41 000 |
| 105 | 160 | 35,0 | 34 | 2,5 | 2 000 | 20 | 0,44 | 1,3 | 0,7 | 21 800 | 34 500 |
| | 190 | 39,0 | 37 | 2,5 | 1 900 | 02 | 0,43 | 1,4 | 0,8 | 26 500 | 32 000 |
| | 190 | 53,0 | 44 | 3,0 | 1 900 | 22 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 35 500 | 51 600 |
| | 225 | 53,5 | 41 | 3,0 | 1 600 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,9 | 40 200 | 43 000 |
| 110 | 170 | 38,0 | 36,5 | 2,5 | 2 000 | 20 | 0,43 | 1,4 | 0,8 | 25 500 | 43 300 |
| | 200 | 41,0 | 39 | 2,5 | 1 800 | 02 | 0,43 | 1,4 | 0,9 | 29 000 | 33 500 |
| | 200 | 56,0 | 46 | 3,0 | 1 800 | 22 | 0,42 | 1,4 | 0,8 | 39 500 | 61 200 |
| | 240 | 54,5 | 43 | 3,0 | 1 600 | 03 | 0,35 | 1,7 | 0,8 | 44 600 | 47 000 |



Charge dynamique équivalente

$P = F_r$

(dans tous les cas)



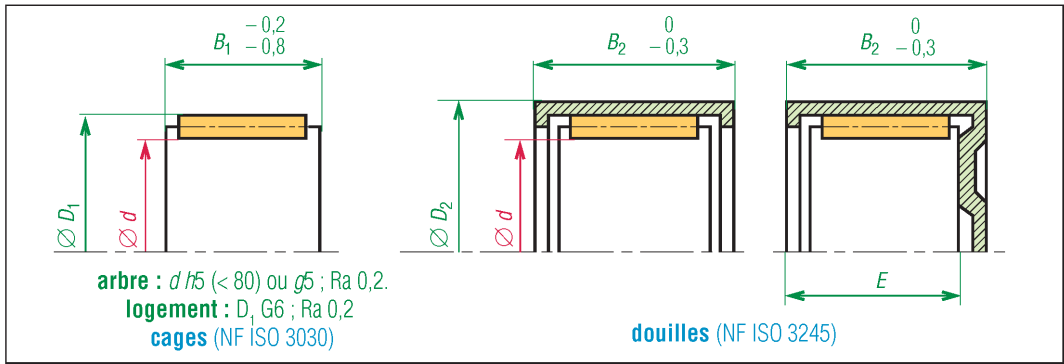
Charge dynamique équivalente

pour $(F_a / F_r) \leq e$
 $P = F_r + Y_1 \cdot F_a$

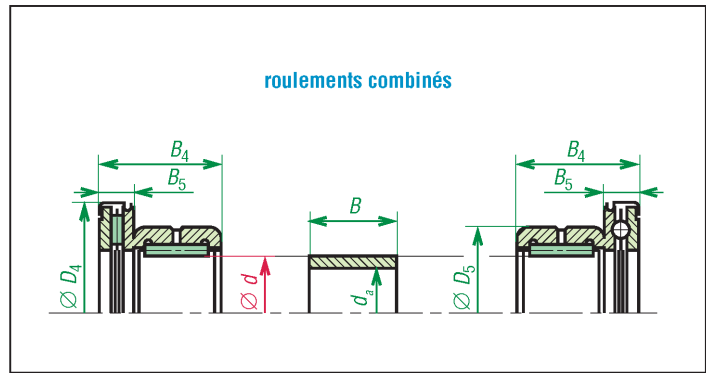
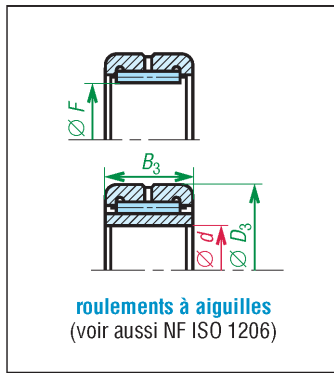
pour $(F_a / F_r) > e$
 $P = 0,67 \cdot F_r + Y_2 \cdot F_a$

(rotule)

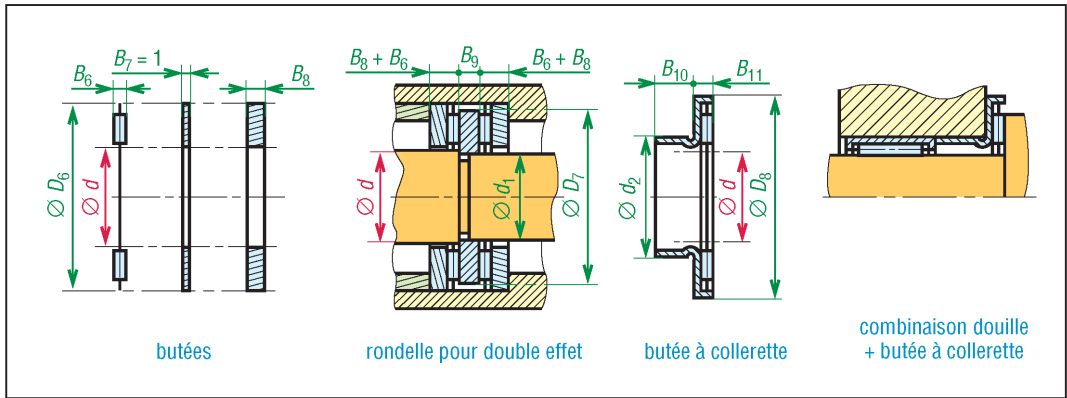
| Roulements à rouleaux cylindriques (NU, N, NJ+HJ,...) | | | | | | | | | | Roulements à rotule sur rouleaux | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|-------------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|--------------------|----------------------------------|------|------|------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|
| dimensions principales | | | | vitesse limite tr/min graisse | série de base N° | autres dim. (mm) | | charges de base | | dimensions principales | | | | vitesse limite tr/min graisse | série de base N° | coefficients pour les calculs | | | charges de base | |
| d mm | D mm | B mm | r mm | | | D _e | B _b | C daN | C ₀ daN | d mm | D mm | B mm | r mm | | | e | Y ₁ | Y ₂ | C daN | C ₀ daN |
| 15 | 35 | 11 | 1 | 18 000 | 02 | 22 | 2,5 | 900 | 430 | 20 | 52 | 15 | 2 | 9 000 | 03 | 0,31 | 2,2 | 3,3 | 3 500 | 2 950 |
| 17 | 40 | 12 | 1,5 | 16 000 | 02 | 25,5 | 3 | 1 100 | 520 | 25 | 52 | 18 | 1,5 | 8 800 | 22 | 0,34 | 2,0 | 3,0 | 4 400 | 4 300 |
| | | | | 14 000 | 03 | 32 | 4 | 3 500 | 2 950 | | 62 | 17 | 2 | 6 700 | 03 | 0,29 | 2,3 | 3,5 | 4 400 | 4 100 |
| 20 | 47 | 14 | 1,5 | 14 000 | 02 | 30,5 | 3 | 2 800 | 2 450 | 30 | 62 | 20 | 1,5 | 7 500 | 22 | 0,31 | 2,1 | 3,2 | 5 800 | 6 100 |
| | | | | 10 000 | 03 | 39 | 4 | 4 550 | 4 100 | | 72 | 19 | 2 | 6 000 | 03 | 0,28 | 2,4 | 3,6 | 5 600 | 5 400 |
| 25 | 52 | 15 | 1,5 | 12 000 | 02 | 35,5 | 3 | 3 200 | 3 000 | 35 | 72 | 23 | 2 | 6 300 | 22 | 0,30 | 2,2 | 3,3 | 7 800 | 8 800 |
| | | | | 10 000 | 03 | 45,5 | 4 | 4 550 | 4 100 | | 80 | 21 | 2,5 | 5 200 | 03 | 0,27 | 2,5 | 3,7 | 7 000 | 7 000 |
| 30 | 62 | 16 | 1,5 | 10 000 | 02 | 42 | 4 | 4 250 | 4 000 | 40 | 80 | 23 | 2 | 5 800 | 22 | 0,28 | 2,4 | 3,6 | 9 000 | 10 000 |
| | | | | 8 500 | 03 | 45,5 | 5 | 5 600 | 5 100 | | 90 | 33 | 2,5 | 4 500 | 23 | 0,37 | 1,8 | 2,7 | 13 300 | 14 700 |
| 35 | 72 | 17 | 2 | 9 000 | 02 | 48,5 | 4 | 5 400 | 5 400 | 45 | 85 | 23 | 2 | 5 300 | 22 | 0,26 | 2,6 | 3,9 | 9 400 | 10 800 |
| | | | | 7 500 | 03 | 51,5 | 6 | 7 000 | 6 800 | | 100 | 36 | 2,5 | 3 900 | 23 | 0,37 | 1,8 | 2,7 | 16 200 | 18 200 |
| 40 | 80 | 18 | 2 | 8 000 | 02 | 54,5 | 5 | 5 700 | 5 600 | 50 | 90 | 23 | 2 | 5 000 | 22 | 0,24 | 2,8 | 4,2 | 10 100 | 11 800 |
| | | | | 6 500 | 03 | 58 | 7 | 8 800 | 8 500 | | 110 | 40 | 3 | 3 500 | 23 | 0,37 | 1,8 | 2,7 | 19 700 | 22 600 |
| 45 | 85 | 19 | 2 | 7 500 | 02 | 59,5 | 5 | 6 500 | 6 700 | 55 | 100 | 25 | 2,5 | 4 500 | 22 | 0,24 | 2,8 | 4,2 | 12 000 | 14 200 |
| | | | | 6 000 | 03 | 65 | 7 | 10 000 | 9 800 | | 120 | 43 | 3 | 3 300 | 23 | 0,37 | 1,8 | 2,7 | 23 400 | 26 500 |
| 50 | 90 | 20 | 2 | 7 000 | 02 | 65 | 5 | 6 800 | 7 200 | 60 | 110 | 28 | 2,5 | 4 000 | 22 | 0,24 | 2,8 | 4,2 | 14 600 | 17 400 |
| | | | | 5 500 | 03 | 71,5 | 8 | 12 000 | 12 200 | | 130 | 46 | 2,5 | 3 000 | 23 | 0,36 | 1,9 | 2,8 | 27 000 | 31 000 |
| 55 | 100 | 21 | 2,5 | 6 600 | 02 | 71 | 6 | 8 500 | 9 400 | 65 | 120 | 31 | 2,5 | 3 800 | 22 | 0,24 | 2,8 | 4,2 | 17 700 | 21 600 |
| | | | | 5 000 | 03 | 78 | 9 | 14 600 | 15 000 | | 140 | 48 | 3,5 | 2 700 | 23 | 0,34 | 2,0 | 3,0 | 29 000 | 33 000 |
| 60 | 110 | 22 | 2,5 | 5 400 | 02 | 78 | 6 | 10 100 | 10 900 | 70 | 125 | 31 | 2,5 | 3 500 | 22 | 0,23 | 2,9 | 4,4 | 18 400 | 23 100 |
| | | | | 5 000 | 03 | 84,5 | 9 | 16 200 | 16 900 | | 150 | 51 | 3,5 | 2 500 | 23 | 0,34 | 2,0 | 3,0 | 33 000 | 38 500 |
| 65 | 120 | 23 | 2,5 | 4 800 | 02 | 85 | 6 | 11 600 | 12 600 | 75 | 130 | 31 | 2,5 | 4 300 | 22 | 0,22 | 3,0 | 4,6 | 19 100 | 24 000 |
| | | | | 4 300 | 03 | 91 | 10 | 19 600 | 20 600 | | 160 | 55 | 3,5 | 2 400 | 23 | 0,34 | 2,0 | 3,0 | 38 500 | 45 500 |
| 70 | 125 | 24 | 2,5 | 4 800 | 02 | 90 | 7 | 12 700 | 14 500 | 80 | 140 | 33 | 3 | 3 200 | 22 | 0,22 | 3,0 | 4,6 | 22 000 | 28 000 |
| | | | | 3 800 | 03 | 97,5 | 10 | 22 200 | 23 900 | | 170 | 58 | 3,5 | 2 200 | 23 | 0,34 | 2,0 | 3,0 | 42 500 | 51 000 |
| 75 | 130 | 25 | 2,5 | 4 500 | 02 | 94,5 | 7 | 13 900 | 16 500 | 85 | 150 | 36 | 3 | 3 000 | 22 | 0,22 | 3,0 | 4,6 | 25 500 | 32 000 |
| | | | | 3 600 | 03 | 105 | 11 | 26 000 | 28 500 | | 180 | 60 | 4 | 2 100 | 23 | 0,33 | 2,0 | 3,0 | 46 500 | 56 000 |
| 80 | 140 | 26 | 3 | 4 300 | 02 | 102 | 8 | 14 900 | 17 600 | 90 | 160 | 40 | 3 | 2 700 | 22 | 0,23 | 2,9 | 4,3 | 30 500 | 39 000 |
| | | | | 3 400 | 03 | 111 | 11 | 27 500 | 29 500 | | 190 | 64 | 4 | 2 000 | 23 | 0,33 | 2,0 | 3,0 | 53 000 | 64 000 |
| 85 | 150 | 28 | 3 | 4 000 | 02 | 108 | 8 | 17 600 | 20 600 | 95 | 170 | 43 | 3,5 | 2 500 | 22 | 0,24 | 2,8 | 4,2 | 34 500 | 44 500 |
| | | | | 3 200 | 03 | 119 | 12 | 29 500 | 32 500 | | 200 | 67 | 4 | 1 900 | 23 | 0,33 | 2,1 | 3,1 | 58 000 | 70 000 |
| 90 | 160 | 30 | 3 | 3 700 | 02 | 115 | 9 | 20 500 | 23 000 | 100 | 180 | 46 | 3,5 | 2 300 | 22 | 0,25 | 2,7 | 4,1 | 38 000 | 48 500 |
| | | | | 3 000 | 03 | 125 | 12 | 33 500 | 37 500 | | 215 | 73 | 4 | 1 800 | 23 | 0,34 | 2,0 | 3,0 | 68 000 | 84 000 |
| 95 | 170 | 32 | 3,5 | 3 500 | 02 | 122 | 9 | 23 600 | 28 000 | 110 | 200 | 53 | 3,5 | 2 100 | 22 | 0,25 | 2,7 | 4,1 | 48 000 | 64 000 |
| | | | | 2 800 | 03 | 133 | 13 | 35 500 | 40 500 | | 240 | 80 | 4 | 1 600 | 23 | 0,34 | 2,0 | 3,0 | 80 000 | 99 000 |
| 100 | 180 | 34 | 3,5 | 3 300 | 02 | 128 | 10 | 26 500 | 32 500 | 120 | 215 | 58 | 3,5 | 2 000 | 22 | 0,25 | 2,7 | 4,0 | 56 000 | 76 000 |
| | | | | 2 600 | 03 | 140 | 13 | 41 000 | 47 000 | | 260 | 86 | 4 | 1 300 | 23 | 0,35 | 1,9 | 2,9 | 80 000 | 102 000 |
| 105 | 190 | 36 | 3,5 | 3 100 | 02 | 135 | 10 | 28 500 | 34 500 | 130 | 230 | 64 | 3,5 | 1 800 | 22 | 0,26 | 2,6 | 3,9 | 66 000 | 93 000 |
| | | | | 2 400 | 03 | 147 | 13 | 46 500 | 54 000 | | 280 | 93 | 4 | 1 200 | 23 | 0,35 | 1,9 | 2,9 | 93 000 | 120 000 |
| 110 | 200 | 38 | 3,5 | 2 900 | 02 | 142 | 11 | 30 000 | 36 500 | 140 | 250 | 68 | 3,5 | 1 600 | 22 | 0,26 | 2,6 | 3,9 | 61 000 | 81 000 |
| | | | | 2 300 | 03 | 156 | 14 | 45 000 | 51 000 | | 300 | 102 | 4 | 1 100 | 23 | 0,35 | 1,9 | 2,9 | 109 000 | 144 000 |



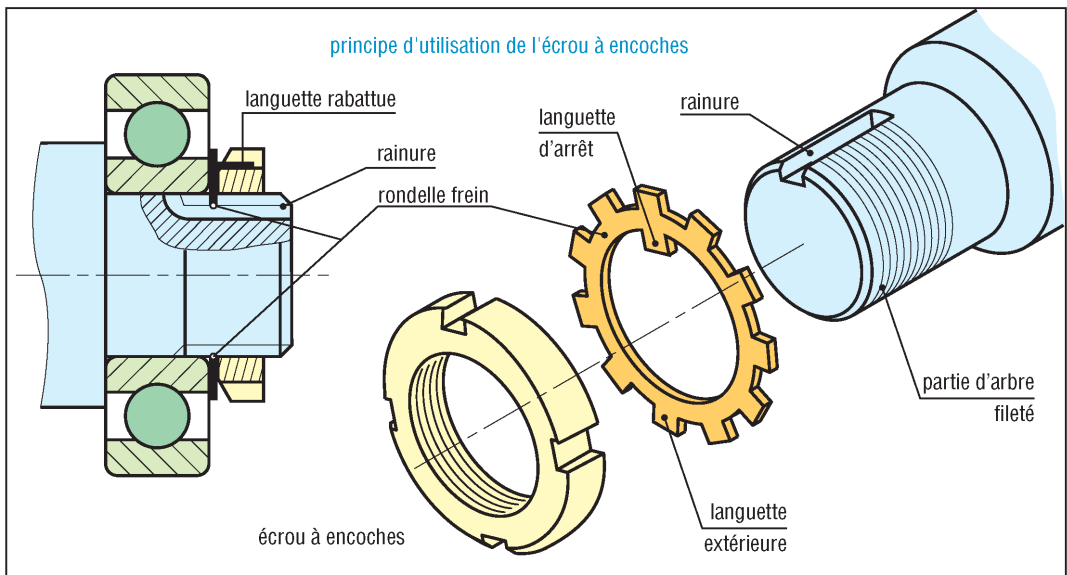
| Douilles à aiguilles ($P = F_r$) | | | | | | | Cages à aiguilles ($P = F_r$) | | | | | | |
|------------------------------------|----------|----------|-----------------------|-----------------|-----------|------|---------------------------------|----------|----------|-----------------------|-----------------|-----------|------------------------------------|
| dimensions principales | | | vitesse limite tr/min | charges de base | | E mm | dimensions principales | | | vitesse limite tr/min | charges de base | | autres largeurs série 1C (B_1) |
| d mm | D_2 mm | B_2 mm | | C daN | C_0 daN | | d mm | D_1 mm | B_1 mm | | C daN | C_0 daN | |
| 3 | 6,5 | 6 | 48 000 | 123 | 84 | 5,2 | 4 | 7 | 6 | 43 000 | 233 | 184 | 8 - 10 |
| 4 | 8 | 8 | 41 000 | 178 | 131 | 6,4 | 5 | 8 | 8 | 39 000 | 235 | 192 | 6-10-13 |
| 5 | 9 | 9 | 38 000 | 240 | 199 | 7,4 | 6 | 9 | 8 | 37 000 | 260 | 228 | 6-10-15 |
| 6 | 10 | 9 | 37 000 | 285 | 260 | 7,4 | 7 | 10 | 8 | 34 000 | 285 | 265 | 10-13-15 |
| 7 | 11 | 9 | 31 000 | 310 | 295 | 7,4 | 8 | 11 | 10 | 32 000 | 395 | 410 | 13-15-17 |
| 8 | 12 | 10 | 29 000 | 380 | 395 | 8,4 | 9 | 12 | 10 | 31 000 | 450 | 500 | 13-15-17 |
| 9 | 13 | 10 | 25 000 | 425 | 465 | 8,4 | 10 | 13 | 10 | 29 000 | 475 | 550 | 13-15-17 |
| 10 | 14 | 10 | 24 000 | 440 | 510 | 8,4 | 12 | 15 | 10 | 27 000 | 490 | 610 | 13-15-17 |
| 10 | 14 | 12 | 24 000 | 680 | 880 | 10,4 | 14 | 18 | 13 | 25 000 | 820 | 1 010 | 15-17-20 |
| 12 | 16 | 10 | 21 000 | 495 | 620 | 8,4 | 15 | 19 | 13 | 24 000 | 850 | 1 090 | 15-17-20 |
| 14 | 20 | 12 | 18 000 | 710 | 850 | 9,3 | 16 | 20 | 13 | 23 000 | 890 | 1 180 | 15-17-20 |
| 15 | 21 | 12 | 16 000 | 790 | 940 | 9,3 | 18 | 22 | 13 | 22 000 | 920 | 1 270 | 15-17-20 |
| 16 | 22 | 12 | 16 000 | 737 | 980 | 9,3 | 20 | 24 | 13 | 21 000 | 980 | 1 430 | 15-17-20 |
| 18 | 24 | 12 | 15 000 | 782 | 1 120 | 13,3 | 22 | 26 | 13 | 20 000 | 1 040 | 1 590 | 15-17-20 |
| 18 | 24 | 16 | 14 000 | 1 160 | 1 730 | 13,3 | 25 | 29 | 13 | 18 000 | 1 490 | 2 600 | 15-17-20 |
| 20 | 26 | 16 | 13 000 | 1 270 | 2 010 | 13,3 | 30 | 35 | 17 | 15 000 | 1 960 | 3 400 | 13-20-27 |
| 20 | 26 | 20 | 13 000 | 1 570 | 2 600 | 17,3 | 35 | 40 | 17 | 13 000 | 2 080 | 3 850 | 13-20-27 |
| 22 | 28 | 12 | 12 000 | 880 | 1 370 | 9,3 | 40 | 45 | 17 | 12 000 | 2 140 | 4 150 | 13-20-27 |
| 22 | 28 | 16 | 11 000 | 1 340 | 2 210 | 13,3 | 45 | 50 | 17 | 10 000 | 2 250 | 4 600 | 13-20-27 |
| 25 | 32 | 16 | 10 000 | 1 560 | 2 400 | 13,3 | 50 | 55 | 20 | 9 500 | 2 650 | 6 000 | 15-23-27 |
| 25 | 32 | 20 | 10 000 | 1 990 | 3 300 | 17,3 | 55 | 61 | 20 | 8 500 | 2 850 | 6 600 | 15-25-30 |
| 30 | 37 | 16 | 8 500 | 1 720 | 2 900 | 13,3 | 60 | 66 | 20 | 8 000 | 2 950 | 7 200 | 15-25-30 |
| 30 | 37 | 20 | 8 500 | 2 190 | 3 950 | 17,3 | 65 | 71 | 20 | 7 500 | 3 050 | 7 700 | 15-25-30 |
| 35 | 42 | 16 | 7 500 | 1 870 | 3 350 | 13,3 | 70 | 76 | 20 | 6 500 | 3 600 | 8 600 | 15-25-30 |
| 35 | 42 | 20 | 7 500 | 2 380 | 4 600 | 17,3 | 75 | 81 | 20 | 6 500 | 3 750 | 9 400 | 25-30-35 |
| 40 | 47 | 16 | 6 500 | 2 000 | 3 850 | 13,3 | 80 | 86 | 20 | 6 000 | 3 850 | 9 800 | 25-30-35 |
| 40 | 47 | 20 | 6 500 | 2 550 | 5 200 | 17,3 | 85 | 92 | 20 | 5 500 | 4 450 | 10 800 | 25-30-35 |
| 45 | 52 | 16 | 6 000 | 2 130 | 4 300 | 13,3 | 90 | 98 | 25 | 5 000 | 6 100 | 15 000 | 25-30-35 |
| 45 | 52 | 20 | 6 000 | 2 700 | 5 900 | 17,3 | 100 | 107 | 25 | 4 500 | 9 800 | 21 000 | 25-30-35 |
| 50 | 58 | 20 | 5 500 | 3 100 | 6 300 | 17,3 | | | | | | | |
| 50 | 58 | 24 | 5 500 | 3 850 | 8 400 | 22,3 | | | | | | | |
| 55 | 63 | 20 | 4 800 | 3 150 | 6 700 | 17,3 | | | | | | | |
| 55 | 63 | 28 | 4 800 | 4 400 | 10 300 | 25,3 | | | | | | | |
| 60 | 68 | 20 | 4 400 | 3 350 | 7 500 | 17,3 | | | | | | | |
| 60 | 68 | 32 | 4 400 | 5 300 | 13 500 | 29,3 | | | | | | | |

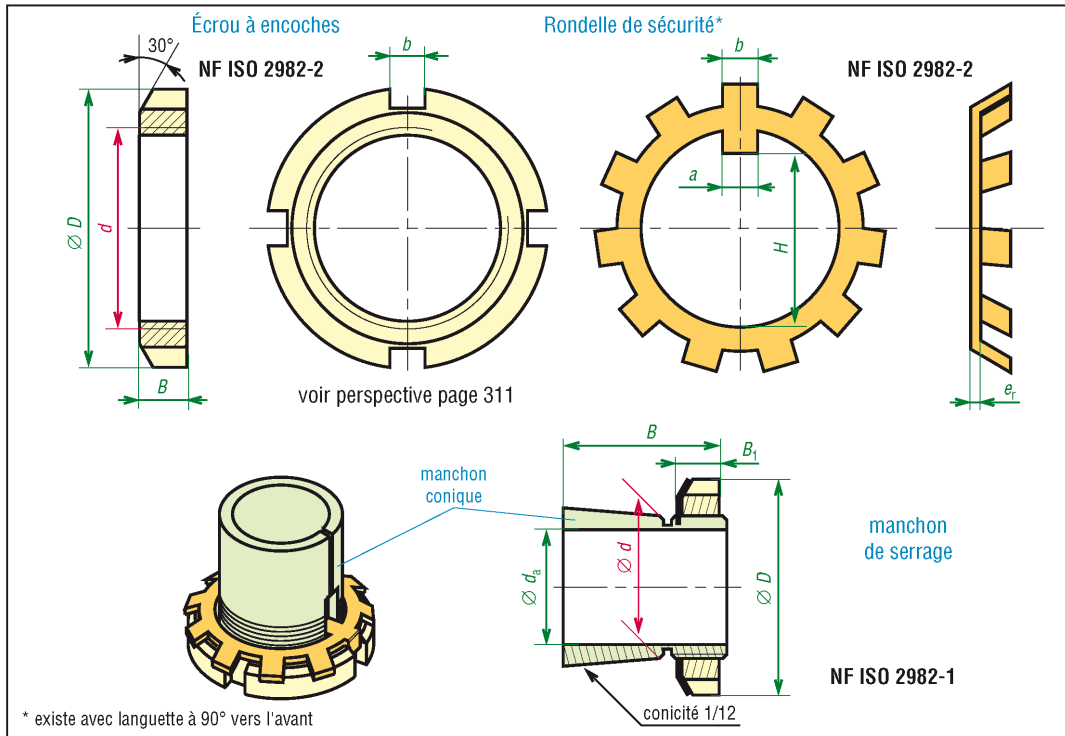


| Roulements à aiguilles ($P = F_r$) | | | | | | | | Roulements combinés | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------|---------------|-------------|--------------------------|-----------------|--------------|--|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|--------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| dimensions principales | | | | vitesse limite tr/min | charges de base | | autres largeurs possibles (B_3) | dimensions principales | | | | | vitesse limite tr/min | charges radiales de base | | charges axiales de base | |
| d mm | F mm | D_3 mm | B_3 mm | | C daN | C_0 daN | | d mm | D_5 mm | D_4 mm | B_4 mm | B_5 mm | | C_r kN | C_{0r} kN | C_a kN | C_{0a} kN |
| 5 | 8 | 15 | 12 | 34 000 | 395 | 410 | 16 | 10 | 19 | 25,2 | 23 | 9 | 12 000 | 7 | 7,8 | 10 | 14 |
| 6 | 9 | 16 | 12 | 32 000 | 450 | 500 | 16 | 12 | 21 | 27,2 | 23 | 9 | 11 000 | 10,1 | 11 | 10,3 | 15,4 |
| 7 | 10 | 17 | 12 | 30 000 | 475 | 550 | 16 | 15 | 24 | 29,2 | 23 | 9 | 9 500 | 12,1 | 12,7 | 10,5 | 16,8 |
| 8 | 10 | 19 | 11 | 28 000 | 430 | 395 | | 17 | 26 | 31,2 | 25 | 9 | 8 500 | 13,5 | 15 | 10,8 | 18,2 |
| 9 | 12 | 19 | 12 | 26 000 | 640 | 710 | 16 | 20 | 30 | 36,2 | 30 | 10 | 7 500 | 18,6 | 23,8 | 14,3 | 24,7 |
| 10 | 14 | 22 | 16 | 25 000 | 1 010 | 1 150 | 20 | 25 | 37 | 43,2 | 30 | 11 | 6 000 | 21,3 | 30,5 | 19,6 | 37,5 |
| 12 | 16 | 24 | 13 | 24 000 | 940 | 1 090 | 20 | 30 | 42 | 48,2 | 30 | 11 | 5 000 | 25,5 | 36 | 20,4 | 42 |
| 15 | 20 | 28 | 13 | 22 000 | 1 060 | 1 360 | 23 | 35 | 47 | 53,2 | 30 | 12 | 4 600 | 27,5 | 41,5 | 21,2 | 47 |
| 17 | 22 | 30 | 13 | 21 000 | 1 100 | 1 460 | 23 | 40 | 52 | 61,2 | 32 | 13 | 4 000 | 29,5 | 47 | 27 | 63 |
| 20 | 25 | 37 | 17 | 17 000 | 2 100 | 2 550 | 30 | 45 | 58 | 66,5 | 32 | 14 | 3 600 | 31 | 53 | 28 | 69 |
| 22 | 28 | 39 | 17 | 16 000 | 2 280 | 2 950 | 30 | 50 | 62 | 71,5 | 35 | 14 | 3 300 | 43 | 74 | 29 | 75 |
| 25 | 30 | 42 | 17 | 15 000 | 2 360 | 3 150 | 30 | 60 | 72 | 86,5 | 40 | 17 | 2 800 | 47,5 | 90 | 41,5 | 113 |
| 28 | 32 | 45 | 17 | 13 000 | 2 480 | 3 350 | 30 | 70 | 85 | 96,5 | 40 | 18 | 2 400 | 50 | 92 | 43 | 127 |
| 30 | 35 | 47 | 17 | 13 000 | 2 550 | 3 550 | 30 | | | | | | | | | | |
| 32 | 40 | 52 | 20 | 12 000 | 3 050 | 4 750 | 36 | | | | | | | | | | |
| 35 | 42 | 55 | 20 | 11 000 | 3 150 | 5 000 | 36 | | | | | | | | | | |
| 40 | 48 | 62 | 22 | 9 500 | 4 300 | 6 700 | 40 | | | | | | | | | | |
| 45 | 52 | 68 | 22 | 8 500 | 4 500 | 7 300 | 40 | | | | | | | | | | |
| 50 | 58 | 72 | 22 | 8 000 | 4 700 | 8 000 | 40 | | | | | | | | | | |
| 55 | 63 | 80 | 25 | 7 500 | 5 800 | 10 000 | 45 | | | | | | | | | | |
| 60 | 68 | 85 | 25 | 7 000 | 6 000 | 10 800 | 45 | | | | | | | | | | |
| 65 | 72 | 90 | 25 | 6 500 | 6 100 | 11 200 | 45 | | | | | | | | | | |
| 70 | 80 | 100 | 30 | 6 000 | 8 400 | 15 600 | 54 | | | | | | | | | | |
| 75 | 85 | 105 | 30 | 5 500 | 8 600 | 16 200 | 54 | | | | | | | | | | |
| 80 | 90 | 110 | 30 | 5 000 | 8 900 | 17 400 | 54 | | | | | | | | | | |
| 85 | 100 | 120 | 35 | 4 800 | 11 100 | 23 700 | 63 | | | | | | | | | | |
| 90 | 105 | 125 | 35 | 4 600 | 11 400 | 25 000 | 63 | | | | | | | | | | |
| 95 | 110 | 130 | 35 | 4 400 | 11 600 | 26 000 | 63 | | | | | | | | | | |
| Option bague intérieure | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| d mm | d_a mm | B mm | d mm | d_a mm | B mm | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 7 | 12-16 | 35 | 30 | 13-17-26-30 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 9 | 12-16 | 40 | 35 | 17-20-30 | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 12 | 12-16 | 45 | 40 | 17-20-30 | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 14 | 17 | 50 | 45 | 20,5-25-35 | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 17 | 16-20-30,5 | 60 | 55 | 25-35 | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 20 | 17-20-30-38,5 | 60 | 50 | 25-28 | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 25 | 17-20-30-38,5 | 70 | 60 | 25-28 | | | | | | | | | | | | |



| Butées à aiguilles ($P = F_a$). INA... | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------|-----------|----------------------------|-------|-------|------------------------|----------|-------------|-------------|
| dimensions principales | | | | vitesse limite tr/min | charges de base | | rondelle pour double effet | | | butées avec collerette | | | |
| d mm | D_6 mm | B_6 mm | B_8 mm | | C daN | C_0 daN | d_1 | D_7 | B_9 | d_2 mm | D_8 mm | B_{11} mm | B_{10} mm |
| 5 | 15 | 2 | | 21 000 | 480 | 920 | | | | | | | |
| 8 | 21 | 2 | 2,75 | 18 000 | 780 | 1 940 | | | | | | | |
| 10 | 24 | 2 | 2,75 | 17 000 | 920 | 2 550 | | | | 14 | 27 | 3 | 3,2 |
| 12 | 26 | 2 | 2,75 | 15 000 | 990 | 2 900 | | | | 16 | 29 | 3 | 3,2 |
| 15 | 28 | 2 | 2,75 | 13 000 | 1 140 | 3 600 | 11 | 27 | 5,5 | 21 | 31 | 3,5 | 3,2 |
| 17 | 30 | 2 | 2,75 | 12 000 | 1 200 | 3 950 | 13 | 29 | 5,5 | 23 | 33 | 3,5 | 3,2 |
| 20 | 35 | 2 | 2,75 | 10 000 | 1 310 | 4 650 | 16 | 34 | 5,5 | 26 | 38 | 3,5 | 3,2 |
| 25 | 42 | 2 | 3 | 8 500 | 1 470 | 5 800 | 21 | 21 | 6 | 32 | 45 | 4 | 3,2 |
| 30 | 47 | 2 | 3 | 7 500 | 1 630 | 7 000 | 26 | 46 | 7 | 37 | 50 | 4 | 3,2 |
| 35 | 52 | 2 | 3,5 | 6 500 | 1 790 | 8 100 | 31 | 51 | 8 | 42 | 55 | 4 | 3,2 |
| 40 | 60 | 3 | 3,5 | 6 000 | 2 800 | 11 400 | 31 | 59 | 8 | 47 | 63 | 4 | 4,2 |
| 45 | 65 | 3 | 4 | 5 000 | 3 000 | 12 800 | 36 | 64 | 9 | 52 | 68 | 4 | 4,2 |
| 50 | 70 | 3 | 4 | 4 800 | 3 200 | 14 300 | 41 | 69 | 10 | 58 | 73 | 4,5 | 4,2 |
| 55 | 78 | 3 | 5 | 4 300 | 3 800 | 18 600 | 46 | 77 | 10 | | | | |
| 60 | 85 | 3 | 4,75 | 4 000 | 4 450 | 23 400 | 51 | 84 | 11,5 | | | | |
| 65 | 90 | 3 | 5,25 | 3 700 | 4 700 | 25 500 | 56 | 89 | 12 | | | | |
| 70 | 95 | 4 | 5,25 | 3 500 | 5 400 | 25 500 | 56 | 94 | 12,5 | | | | |
| 75 | 100 | 4 | 5,75 | 3 300 | 5 500 | 26 500 | 61 | 99 | 12,5 | | | | |
| 80 | 105 | 4 | 5,75 | 3 100 | 5 600 | 28 000 | 66 | 104 | 12,5 | | | | |
| 85 | 110 | 4 | 5,75 | 3 000 | 5 800 | 29 000 | 71 | 109 | 14,5 | | | | |
| 90 | 120 | 4 | 6,5 | 2 700 | 7 300 | 40 500 | 76 | 119 | 16 | | | | |





* existe avec languette à 90° vers l'avant

| Principales dimensions normalisées | | | | | | | | Manchons de serrage | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------|----|-----|
| écrous à encoches | | | | rondelles-freins | | | | diamètre roulement <i>d</i> mm | principales dimensions normalisées | | | | | |
| <i>d</i> mm | pas mm | <i>D</i> mm | <i>B</i> mm | <i>H</i> mm | <i>a</i> mm | <i>e_r</i> mm | <i>b</i> mm | | <i>d</i> _{a1} mm | <i>D</i> mm | <i>B</i> ₁ mm | <i>B</i> (mm) / séries: | | |
| | | | | | | | | | | | 02 | 22-03 | 23 | |
| M 10 | 0,75 | 18 | 4 | 8,5 | 3 | 1 | 3 | 15 | 12 | 25 | 6 | 19 | 22 | 25 |
| M 12 | 1 | 22 | 4 | 10,5 | 3 | 1 | 3 | 17 | 14 | 28 | 6 | 20 | 24 | 27 |
| M 15 | 1 | 25 | 5 | 13,5 | 4 | 1 | 4 | 20 | 17 | 32 | 7 | 24 | 28 | 31 |
| M 17 | 1 | 28 | 5 | 15,5 | 4 | 1 | 4 | 25 | 20 | 38 | 8 | 26 | 29 | 35 |
| M 20 | 1 | 32 | 6 | 18,5 | 4 | 1 | 4 | 30 | 25 | 45 | 8 | 27 | 31 | 38 |
| M 25 | 1,5 | 38 | 7 | 23 | 5 | 1,25 | 5 | | | | | | | |
| M 30 | 1,5 | 45 | 7 | 27,5 | 5 | 1,25 | 5 | | | | | | | |
| M 35 | 1,5 | 52 | 8 | 32,5 | 6 | 1,25 | 5 | | | | | | | |
| M 40 | 1,5 | 58 | 9 | 37,5 | 6 | 1,25 | 6 | 45 | 40 | 65 | 11 | 33 | 39 | 50 |
| M 45 | 1,5 | 65 | 10 | 42,5 | 6 | 1,25 | 6 | | | | | | | |
| M 50 | 1,5 | 70 | 11 | 47,5 | 6 | 1,25 | 6 | 50 | 45 | 70 | 12 | 35 | 42 | 55 |
| M 55 | 2 | 75 | 11 | 52,5 | 7 | 1,5 | 7 | | | | | | | |
| M 60 | 2 | 80 | 11 | 57,5 | 7 | 1,5 | 7 | | | | | | | |
| M 65 | 2 | 85 | 12 | 62,5 | 7 | 1,5 | 7 | | | | | | | |
| M 70 | 2 | 92 | 12 | 66,5 | 8 | 1,5 | 8 | 65 | 60 | 85 | 14 | 40 | 50 | 65 |
| M 75 | 2 | 98 | 13 | 71,5 | 8 | 1,5 | 8 | | | | | | | |
| M 80 | 2 | 105 | 15 | 76,5 | 8 | 1,8 | 8 | 70 | 60 | 92 | 14 | 41 | 52 | 68 |
| M 85 | 2 | 110 | 16 | 81,5 | 8 | 1,8 | 8 | | | | | | | |
| M 90 | 2 | 120 | 16 | 86,5 | 10 | 1,8 | 10 | | | | | | | |
| M 95 | 2 | 125 | 17 | 91,5 | 10 | 1,8 | 10 | | | | | | | |
| M 100 | 2 | 130 | 18 | 96,5 | 10 | 1,8 | 10 | 90 | 80 | 120 | 18 | 52 | 65 | 86 |
| M 105 | 2 | 140 | 18 | 100,5 | 12 | 1,8 | 12 | | | | | | | |
| M 110 | 2 | 145 | 19 | 105,5 | 12 | 1,8 | 12 | | | | | | | |
| M 115 | 2 | 150 | 19 | 110,5 | 12 | 2 | 12 | | | | | | | |
| M 120 | 2 | 155 | 20 | 115 | 12 | 2 | 12 | 100 | 90 | 130 | 20 | 58 | 71 | 97 |
| M 125 | 2 | 160 | 21 | 120 | 12 | 2 | 12 | | | | | | | |
| M 130 | 2 | 165 | 21 | 125 | 12 | 2 | 12 | | | | | | | |
| M 135 | 2 | 175 | 22 | 130 | 14 | 2 | 14 | | | | | | | |
| M 140 | 2 | 180 | 22 | 135 | 16 | 2 | 14 | 110 | 100 | 145 | 21 | 63 | 77 | 105 |
| M 145 | 2 | 190 | 24 | 140 | 16 | 2 | 14 | | | | | | | |
| M 150 | 2 | 195 | 24 | 145 | 16 | 2 | 14 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |

27

LIAISONS GLISSIÈRES GUIDAGES EN TRANSLATION

OBJECTIFS

- Décrire les principaux systèmes utilisés et préciser la normalisation correspondante.
- Indiquer les dispositifs de réglage, de lubrification et d'étanchéité à employer.

Les solutions de ce chapitre présentent, quant au principe, une certaine analogie avec les guidages en rotation. On y trouve des liaisons lisses, des systèmes antifrictions (analogie avec les coussinets) et des dispositifs avec éléments roulants (analogie avec les roulements).

I - Liaisons glissières « lisses »

Elles conviennent lorsque les vitesses de déplacement sont faibles ou modérées. Une bonne lubrification est nécessaire.

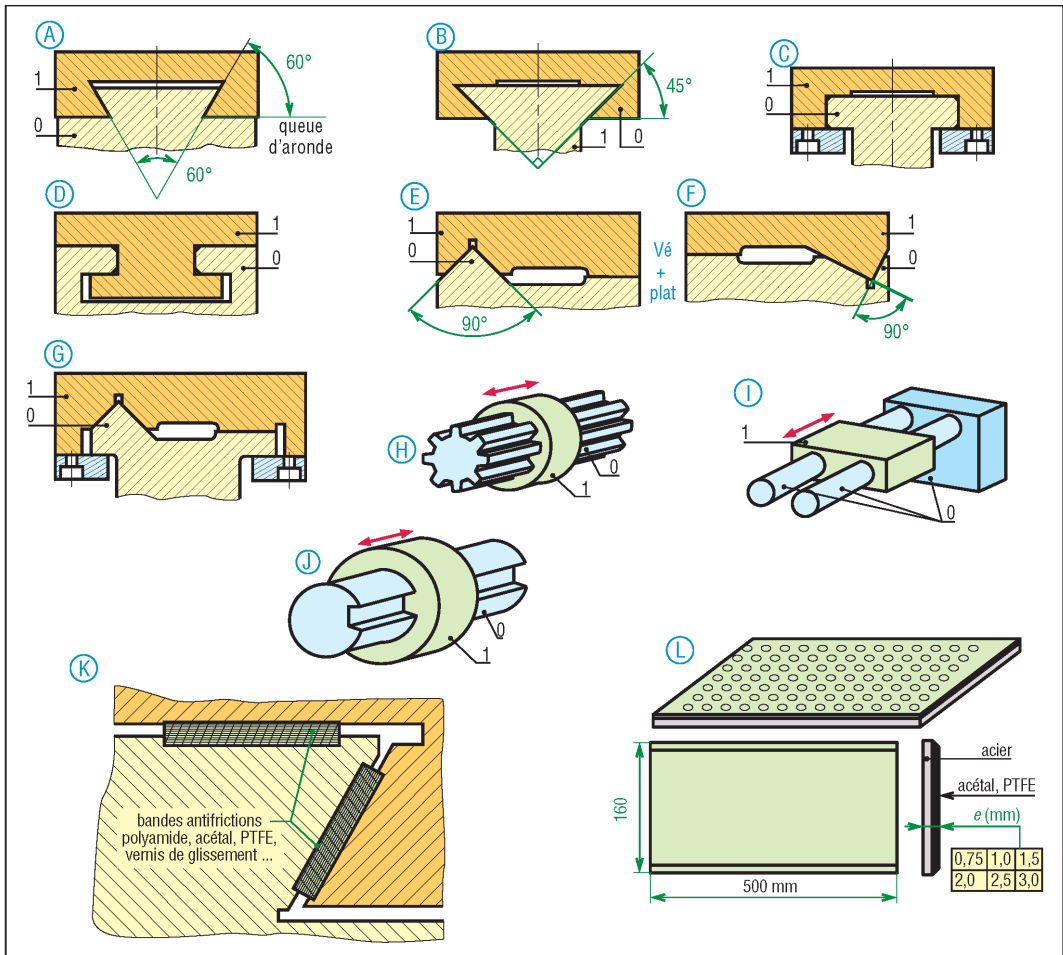
Inconvénients : frottement élevé ; broutage (stick-slip) à faible vitesse et dégradation de la précision par usure.

a) Guidages maintenus, solutions A, B, C, D, G, H, I, J (**fig. 1**) : ils supportent des efforts dans toutes les directions sans risques de déboîtement de la liaison. Les solutions par queue d'aronde (60° et 90°) et par profil rectangulaire exigent un système de réglage ou de rattrapage du jeu pour fonctionner avec précision (voir paragraphe III).

b) Guidages non maintenus, solutions E et F par vés à 90° , symétrique ou dissymétrique : ils ne supportent pas d'efforts latéraux significatifs. Caractérisés par une grande rectitude de la trajectoire du coulisseau, ils n'exigent pas de réglage du jeu. Un vés en creux facilite la lubrification mais favorise l'accumulation des impuretés (poussières...).

c) Bandes antifrictions, solutions K et L : en polyamide, acétal, PTFE ou bronzes frittés poreux imprégnés, elles favorisent le glissement comme les coussinets de même nom. Les vernis de glissement ont le même rôle.

d) Usure des liaisons : elle dépend des états de surfaces (rugosités), des traitements (trempe, traitements de surface), des pressions de contact, de la lubrification et des conditions ambiantes (poussières abrasives, corrosion, etc.). Elle est plus rapide pendant la période de rodage.



1. Principales liaisons glissières lisses.

II - Liaisons glissières avec éléments roulants

Elles permettent des fonctionnements sans jeux, améliorent la précision et les performances (vitesses, cadences, rendements), diminuent les pertes énergétiques et les efforts de manœuvre. Le frottement global f des liaisons passe de 0,05-0,2 à 0,001-0,005.

Leur calcul est analogue à celui des roulements et varie sensiblement d'un fabricant à l'autre (voir leurs catalogues). C, Co et L sont définies par la norme NF ISO 14728-1 et 2.

Utilisations : machines à positionnement précis : machines-outils ; robots ; machines de production automatisées ; matériels médicaux ; aéronautique... Vocabulaire : NF ISO 24393.

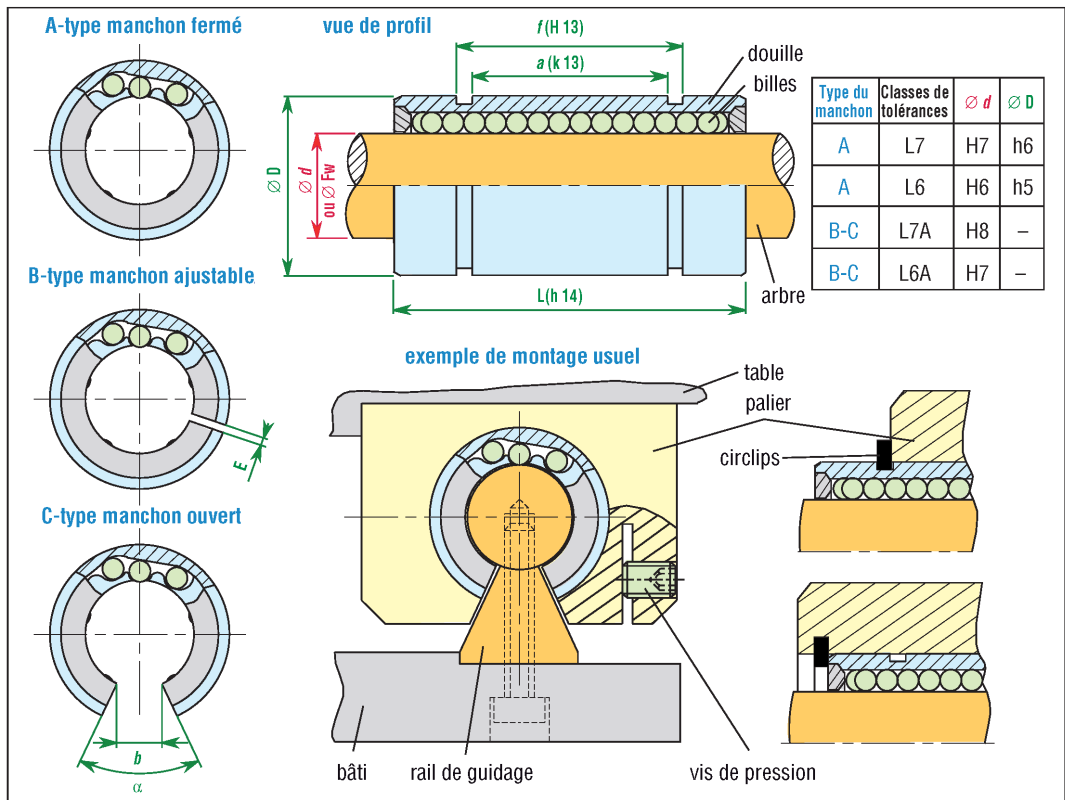
1. Douilles à billes

Économiques, souvent utilisées, elles permettent des constructions simples à partir d'arbres lisses. Elles ne tolèrent pas de rotation autour de leur axe et ne supportent que des charges radiales pures ; elles ne tolèrent aucun couple.

Les billes circulent dans des cages tubulaires, de forme oblongue, ce qui permet des courses illimitées : vitesse maximale en translation 5 m/s, accélération maxi 50 m/s². Elles exigent une faible lubrification, graisse de préférence et sont faciles à protéger ; $-30^{\circ} \leq t \leq 80^{\circ} \text{C}$.

Variante : fendue ou non ; ouverte ; anti-corrosion ; auto-alignante ; renforcée ; miniatures ; avec étanchéité intégrée ; à arbre cannelé... Classes de tolérances : L₆ - L₇ - L_{6A} - L_{7A}...

Exemples de fabricants : FAG, INA, SKF, STAR...



2. Douilles à billes standard ou roulements linéaires à recirculation de billes, type manchon (NF ISO 10285).

| Douilles à billes : principales dimensions normalisées (série 3 : NF ISO 10 285) | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|-----------|-------------------|------------|--------------|------------------------|
| d mm | D mm | L mm | a mm | f mm | E mm | circlips mm × mm | b mm | α degré | C daN | C_0 daN | //(*) μm |
| 5 | 12 | 22 | 12 | 14,2 | 1,5 | 12 × 1 | | | 13 | 18 | 4 |
| 8 | 16 | 25 | 14 | 16,2 | 1,5 | 16 × 1 | | | 18 | 30 | 4 |
| 12 | 22 | 32 | 20 | 22,6 | 1,5 | 22 × 1,2 | 5 | 65 | 23 | 43 | 5 |
| 16 | 26 | 36 | 22 | 24,6 | 1,5 | 27 × 1,2 | 9 | 50 | 28 | 52 | 5 |
| 20 | 32 | 45 | 28 | 31,2 | 2,0 | 33 × 1,5 | 9 | 50 | 56 | 100 | 7 |
| 25 | 40 | 58 | 40 | 43,7 | 2,0 | 42 × 1,75 | 11 | 50 | 110 | 180 | 9 |
| 30 | 47 | 68 | 48 | 51,7 | 2,0 | 48 × 1,75 | 12,5 | 50 | 140 | 250 | 9 |
| 40 | 62 | 80 | 56 | 60,3 | 2,0 | 62 × 2 | 16,5 | 50 | 260 | 440 | 11 |
| 50 | 75 | 100 | 72 | 77,3 | 2,0 | 75 × 2,5 | 21 | 50 | 410 | 640 | 13 |
| 60 | 90 | 125 | 95 | 101,3 | 2,0 | 90 × 3 | 26 | 50 | 580 | 900 | 16 |
| 80 | 120 | 165 | 125 | 133,3 | 2,0 | 120 × 4 | 36 | 50 | 1 100 | 1 620 | 22 |

C et C_0 indiquées sont celles de la série de base. (1 μm = 0,001 mm = 1 micromètre)
 (*) défauts admissibles du parallélisme Exemples de fabricants : FAG, INA, SKF, STAR...

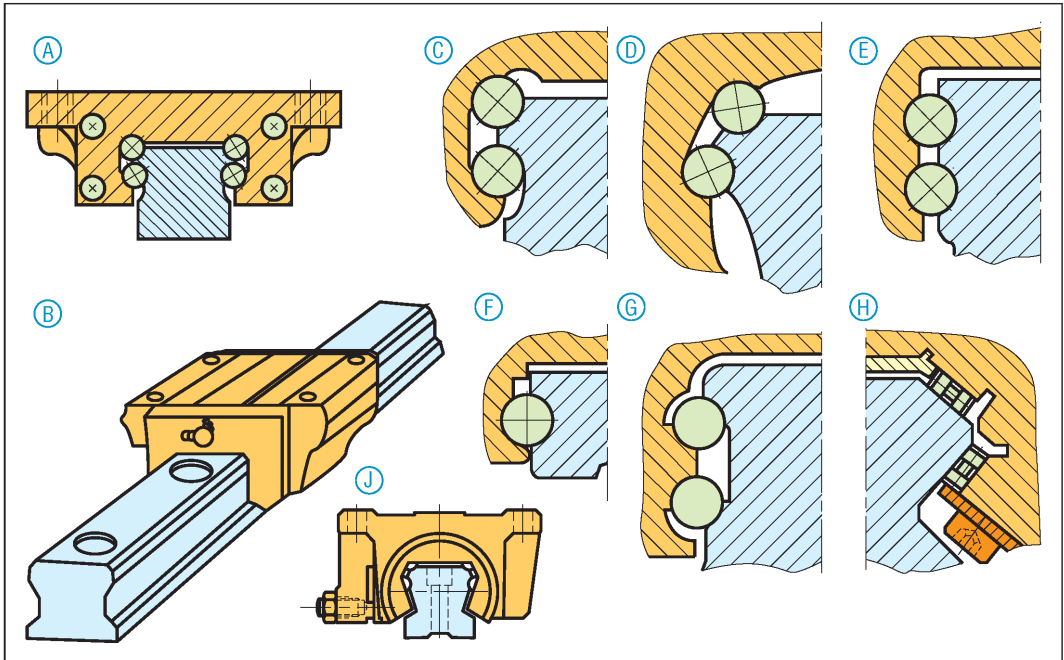
Montage : deux douilles sont nécessaires pour les guidages à un seul arbre et trois minimum dans le cas de deux arbres parallèles ; le parallélisme doit être rigoureux.

Afin de simplifier les réalisations, les fabricants proposent un grand choix d'équipements complémentaires : paliers prêts à l'emploi, rails, arbres lisses, brides... NF ISO 13012, etc.

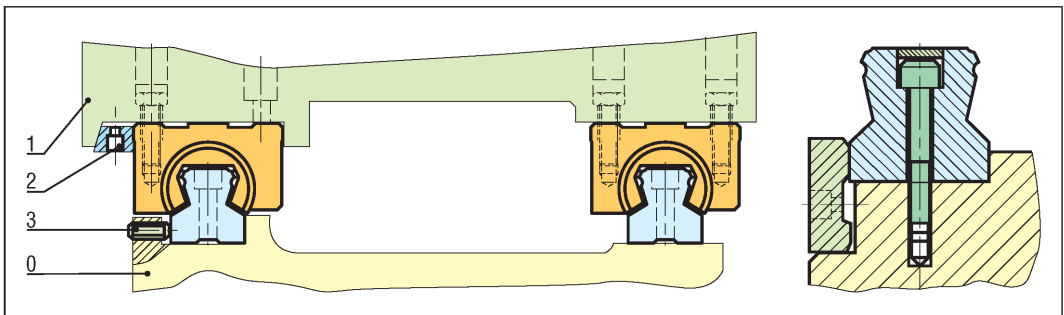
2. Guides à billes

Ils sont une variante perfectionnée des douilles à billes. Avec une capacité de charge 10 fois plus grande à taille égale, ils supportent des charges et des couples dans toutes les directions. Ils réalisent des guidages très précis : machines-outils, centres d'usinage, robots, machines à mesurer... Dimensions normalisées (séries 1-2-3-4-5) : NF ISO 12090-1 et 2.

Plusieurs dispositions de chemins de roulement sont possibles. Il en résulte des rigidités et des capacités différentes. Les solutions par rouleaux sont les plus rigides et supportent les charges les plus élevées. Certaines versions peuvent être préchargées (solution J, fig. 3).



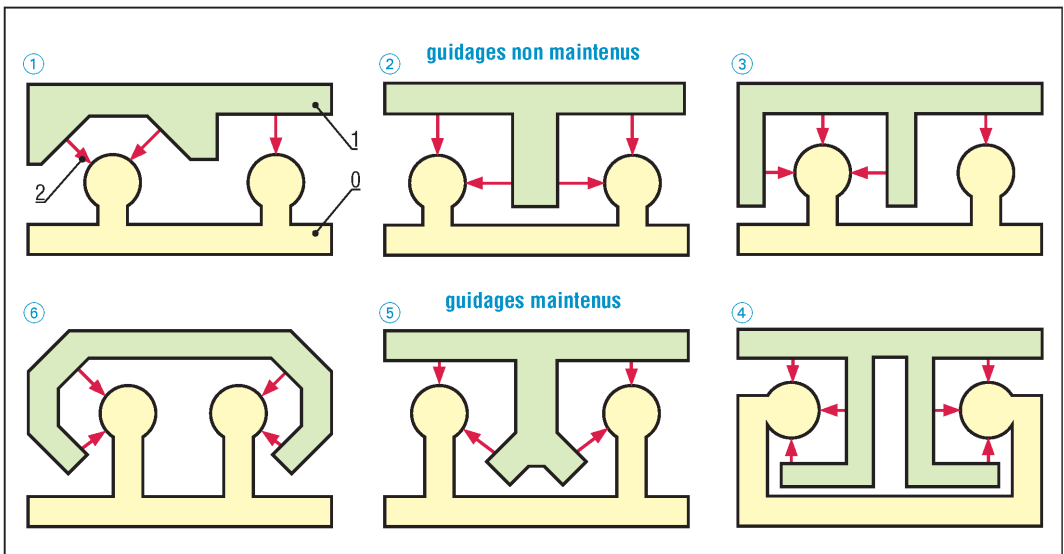
3. Guides à billes (variantes usuelles). Dimensions normalisées NF ISO 12090-1 et 2.



4. Exemples de montage. 1 : coulisseau ; 2 : cale à pente ; 3 : vis de pression ; 0 : bâti.

3. Guidage par rails, patins, galets, roues...

Il existe de nombreuses solutions, se ramenant schématiquement aux principes ci-dessous. Chaque flèche symbolise un appui, un contact ou l'action d'un élément roulant.

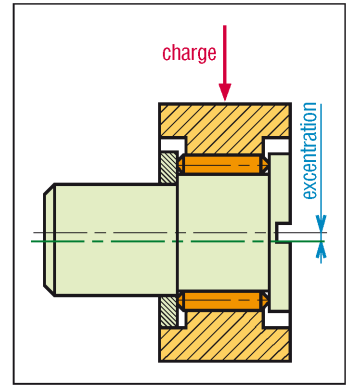


5. Exemples de guidage. ↓ → : appui par bille ou rouleau.

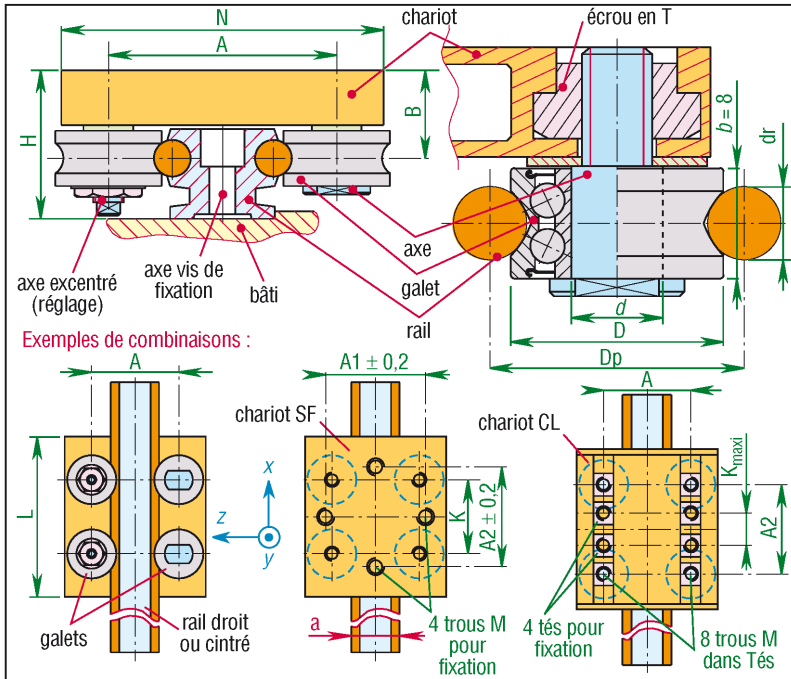
Un même élément roulant (bille, rouleau, roulement, galet ou roues diverses) peut réaliser un ou deux contacts, ou appuis, en même temps. Les surfaces d'appui peuvent être planes, cylindriques ou avoir une forme quelconque.

a) Dispositifs pour courses illimitées

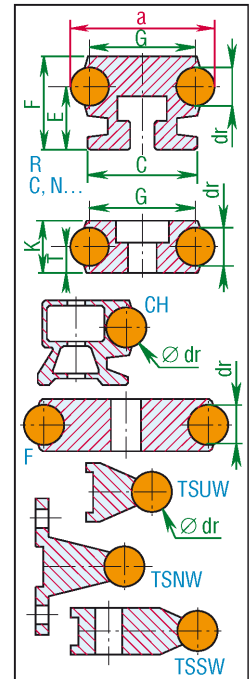
Guidages à galets INA LF : conçus comme un « mecano » faciles à intégrer et à monter, ils nécessitent peu d'entretien et admettent des vitesses jusqu'à 10 m.s^{-1} . Ils comprennent de nombreuses gammes d'éléments divers : chariots prêts à l'emploi, galets, axes, rails, étanchéités et accessoires. La forme extérieure du galet en deux arcs gothiques réalise un appui contact du type de la figure 5 schéma 6.



6. Appui réalisé par galet excentré.



7. Guidages à galets INA LF..., éléments de base.

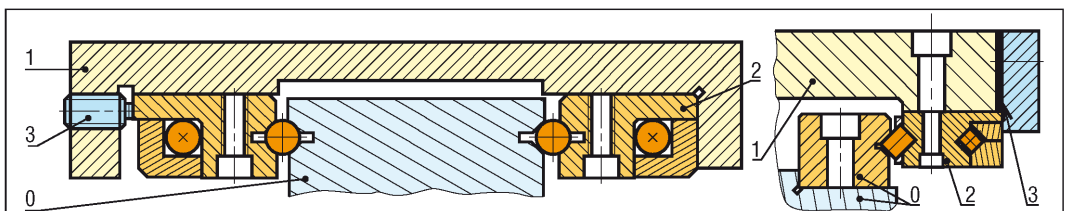


8. Rails : formes variantes.

| Rail INA LFS... (en mm) | | | | | | | Chariot CL et SF (en mm ; Fy et Fz en daN) | | | | | | | | | | Galets (mm) | | | | |
|-------------------------|----|----|----|----|------|------|--|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|----|----|----|------|
| réf. | a | dr | G | C | E | F | A | B | H | N | L | A1 | A2 | M | K | Fy | Fz | dr | D | d | Dp |
| 20SF | 20 | 4 | 16 | 17 | 9 | 12,2 | 40 | 13 | 22 | 55 | 50 | 40 | 38 | M5 | 24 | 40 | 70 | 4 | 16 | 5 | 18 |
| CL25 | 25 | 6 | 19 | 21 | 10,6 | 15 | 47 | 21,5 | 32 | 80 | 110 | 47 | 52 | M6 | 26 | 85 | 100 | 6 | 24 | 8 | 28 |
| 32SF | 32 | 6 | 26 | 24 | 15 | 20 | 54 | 20,5 | 35,5 | 80 | 90 | 59 | 70 | M8 | 60 | 85 | 100 | 6 | 24 | 8 | 28 |
| CL42 | 42 | 10 | 32 | 28 | 12,6 | 20 | 73 | 26,4 | 39 | 116 | 150 | 73 | 85 | M8 | 55 | 150 | 300 | 10 | 35 | 12 | 41,3 |
| 52SF | 52 | 10 | 42 | 40 | 25,1 | 34 | 83 | 29,2 | 54,3 | 120 | 100 | 90 | 70 | M10 | 60 | 150 | 200 | 10 | 35 | 12 | 41,3 |
| CL86 | 86 | 10 | 76 | 71 | 25,1 | 34 | 124 | 33,9 | 59 | 190 | 235 | 124 | 155 | M10 | 119 | 240 | 450 | 10 | 42 | 12 | 48 |

Patins à billes ou à rouleaux croisés à deux contacts : ils réalisent deux appuis à 90° en même temps. Principales caractéristiques : précis (trois classes de précision) ; courses illimitées ; rigides et assez compacts.

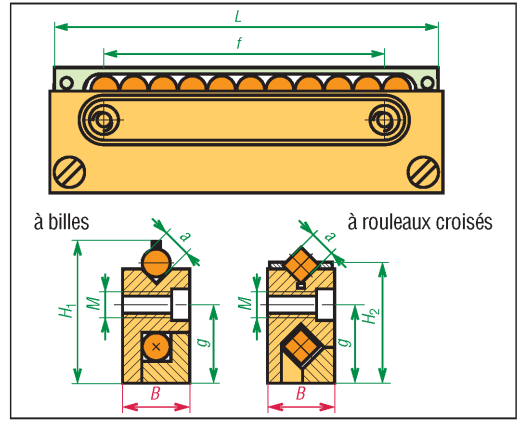
Utilisations : machines-outils légères ; robots ; tables de précision...



9. Exemples de montage. Dimensions fig. 10 et 17.

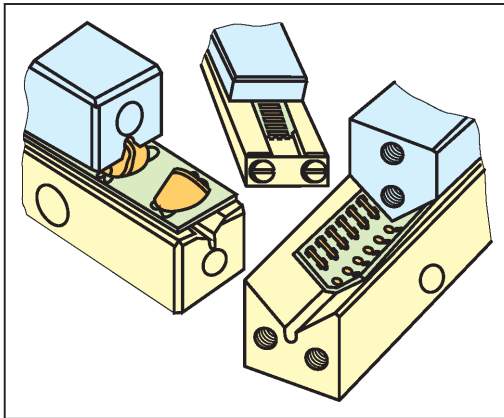
| Patins Schneeberger : extraits de dimensions | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|----------|-------|------------|-------|
| dimensions communes | | | | | | à billes | | à rouleaux | |
| L | B | a | f | g | M | H_1 | C_1 | H_2 | C_2 |
| mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | daN | mm | daN |
| 22 | 4 | 1,5 | 10 | 4,8 | M2 | 8,4 | 6,3 | - | - |
| 32 | 6 | 2 | 15 | 6 | M3 | 11 | 13,5 | 9,8 | 38 |
| 75 | 8 | 3 | 25 | 9 | M4 | 16,9 | 42,5 | 15 | 85 |
| 100 | 15 | 6 | 50 | 15 | M6 | 28,9 | 71,5 | 25,7 | 215 |
| 150 | 15 | 6 | 50 | 15 | M6 | 28,9 | 117 | 25,7 | 375 |
| 150 | 22 | 9 | 100 | 26 | M8 | 45,1 | 165 | 40,5 | 585 |
| 200 | 28 | 12 | 100 | 32 | M10 | 57,1 | 286 | 51,5 | 1 000 |
| 200 | 22 | 9 | 100 | 26 | M8 | 45,1 | 240 | - | - |

Autres fabricants : INA...



10. Exemples de dimensions de patins.

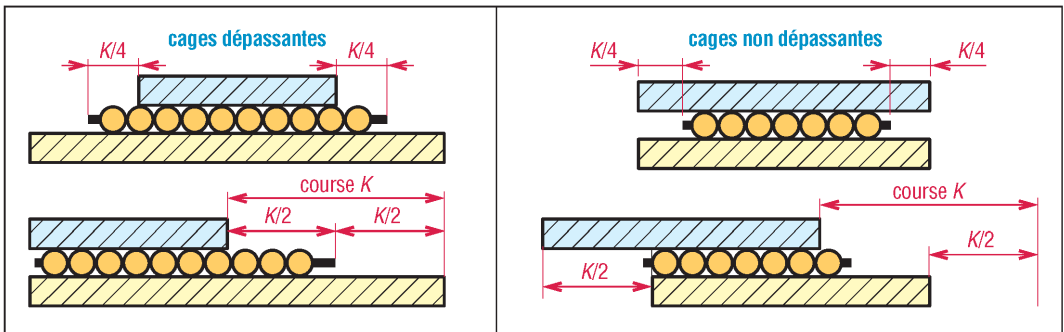
b) Dispositifs pour courses limitées



11. Exemples de réalisation.

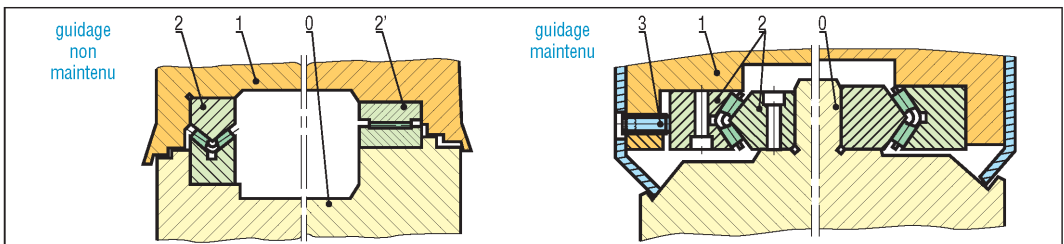
| | Guidage maintenu avec réglage | Guidage non maintenu sans réglage |
|-----------|-------------------------------|-----------------------------------|
| billes | | |
| rouleaux | | |
| aiguilles | | |

12. Combinaisons possibles.

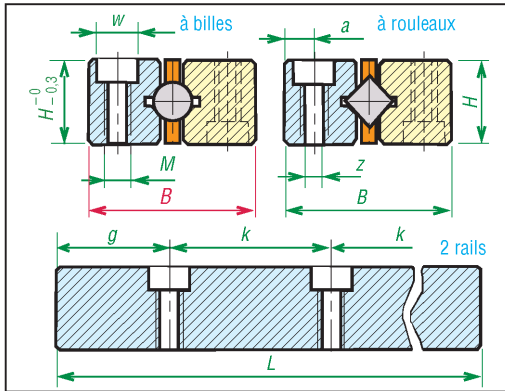


13. Courses permises.

Pour ces systèmes il n'y a pas circulation des billes ou des rouleaux comme dans les cas précédents et la longueur de la cage à éléments roulants doit être correctement ajustée en fonction de la course souhaitée. Deux cas sont possibles : cage dépassante ou cage non dépassante. Dans les deux cas, la course de la cage est moitié de celle du chariot.



14. Exemples de montage (0 : bâti ; 1 : coulisseau ; 2 et 2' : éléments de guidage ; 3 : vis de pression).

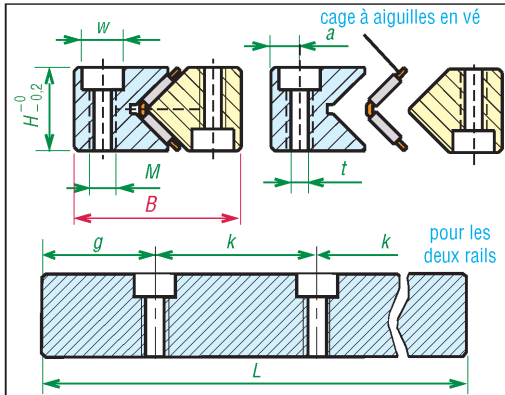


15. Exemples de dimensions de rails à billes et rouleaux.

| Rails à billes et rouleaux : extraits de dimensions * | | | | | | | | |
|---|----|-----|-----|------|------|------|-----|--------------------------|
| B | H | a | M | w | z | g | k | L |
| mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm |
| 8,5 | 4 | 1,8 | M2 | 3 | 1,65 | 5 | 10 | 20 à 120 de 10 en 10 |
| 12 | 6 | 2,5 | M3 | 4,4 | 2,55 | 7,5 | 15 | 30 à 180 de 15 en 15 |
| 18 | 8 | 3,5 | M4 | 6 | 3,3 | 12,5 | 25 | 50 à 300 de 25 en 25 |
| 22 | 11 | 4,5 | M5 | 8 | 4,3 | 20 | 40 | 80 à 400 de 40 en 40 |
| 31 | 15 | 6 | M6 | 9,5 | 5,2 | 25 | 50 | 100 à 500 de 50 en 50... |
| 44 | 22 | 9 | M8 | 10,5 | 6,8 | 50 | 100 | 200 à 800 de 100 en 100 |
| 58 | 28 | 12 | M10 | 13,5 | 8,5 | 50 | 100 | 200 à 1000 de 100 en 100 |

* fabricants : Schneberger, SKF...

(fig. 15-11-12-13) : accélérations 50 à 300 m/s² ; vitesse 1 m/s ; aciers 58 à 64 HRC ; revêtus ou non ; - 40 à 80 °C ; billes (qualité de mouvement) ou rouleaux (charges ↑)...

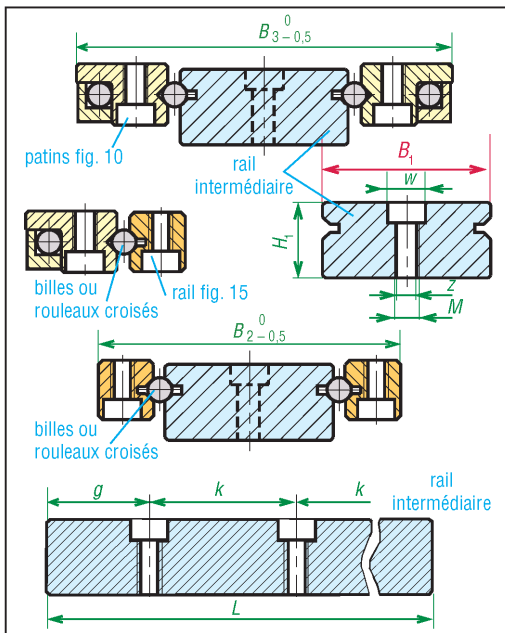


16. Exemples de dimensions de rails en vé à aiguilles.

| Rails en vé à aiguilles : extraits de dimensions * | | | | | | | | |
|--|----|-----|-----|------|------|----|-----|-------------------|
| B | H | a | M | w | z | g | k | L (de 100 en 100) |
| mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm |
| 30 | 15 | 5,5 | M4 | 8,5 | 5,25 | 15 | 40 | 100 à 600 - 150 |
| 40 | 20 | 7,5 | M6 | 11,5 | 7,5 | 15 | 80 | 100 à 600 - 150 |
| 50 | 25 | 10 | M6 | 11,5 | 7,5 | 20 | 80 | 100 à 1000 |
| 60 | 35 | 11 | M8 | 15 | 10 | 20 | 100 | 200 à 1000 |
| 70 | 40 | 13 | M10 | 18,5 | 12,5 | 20 | 100 | 200 à 1000 |
| 80 | 50 | 14 | M12 | 10 | 14 | 20 | 100 | 300 à 1500 |

* fabricants : Schneberger, SKF...

(fig. 16-11-12-13-14) : charges plus élevées mais et moins bonne qualité de mouvement ; accélérations 50 à 200 m/s² ; vitesse 1 m/s ; aciers 58 à 64 HRC ; - 40 à 80 °C...



17. Exemples de combinaisons patins et rails.

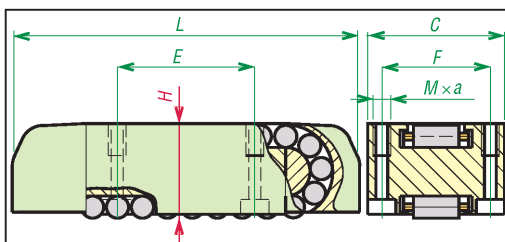
| Rail intermédiaire : extraits de dimensions * | | | | | | | | | | |
|---|----------------|-----|------|------|------|-----|---------------------|-------------------|----------------|----------------|
| B ₁ | H ₁ | M | w | z | g | k | L | Combinaisons (mm) | | |
| | | | | | | | | B ₂ | B ₃ | B ₄ |
| 12,8 | 5,5 | M3 | 4,4 | 2,55 | 12,5 | 25 | 100-150-200 | 22 | 28 | 11,5 |
| 17 | 8,5 | M4 | 6 | 3,35 | 25 | 50 | 200-300-400 | 30 | 37 | 15,5 |
| 26,6 | 11,5 | M5 | 7,5 | 4,2 | 25 | 50 | 300-400-500-600-800 | 46 | 57 | 23,5 |
| 41,8 | 19 | M6 | 9,5 | 5,2 | 50 | 100 | Max 2000 | 76 | 94 | 40 |
| 67,4 | 27 | M8 | 10,5 | 6,8 | 50 | 100 | Max 2000 | 116 | 150 | 61 |
| 70,8 | 34 | M10 | 13,5 | 8,5 | 50 | 100 | Max 2000 | 135 | 175 | 78 |

* fabricants : Schneberger...

Patins (fig. 17-9-10) : charges faibles ou moyennes ; 50 m/s² ; 2 m/s ; aciers 58 à 64 HRC.

Patins à rouleaux

Ces patins à recirculation de rouleaux sont conçus pour des charges moyennes à élevées. Ils peuvent s'utiliser seuls ou combiner aux guidages précédents et être précontraints (cale pentée réglable...). 50 m/s² ; 1 m/s ; aciers 58 à 64 HRC ; graisseurs auto. ou graissage centrali.



18. Patins à rouleaux : principales dimensions.

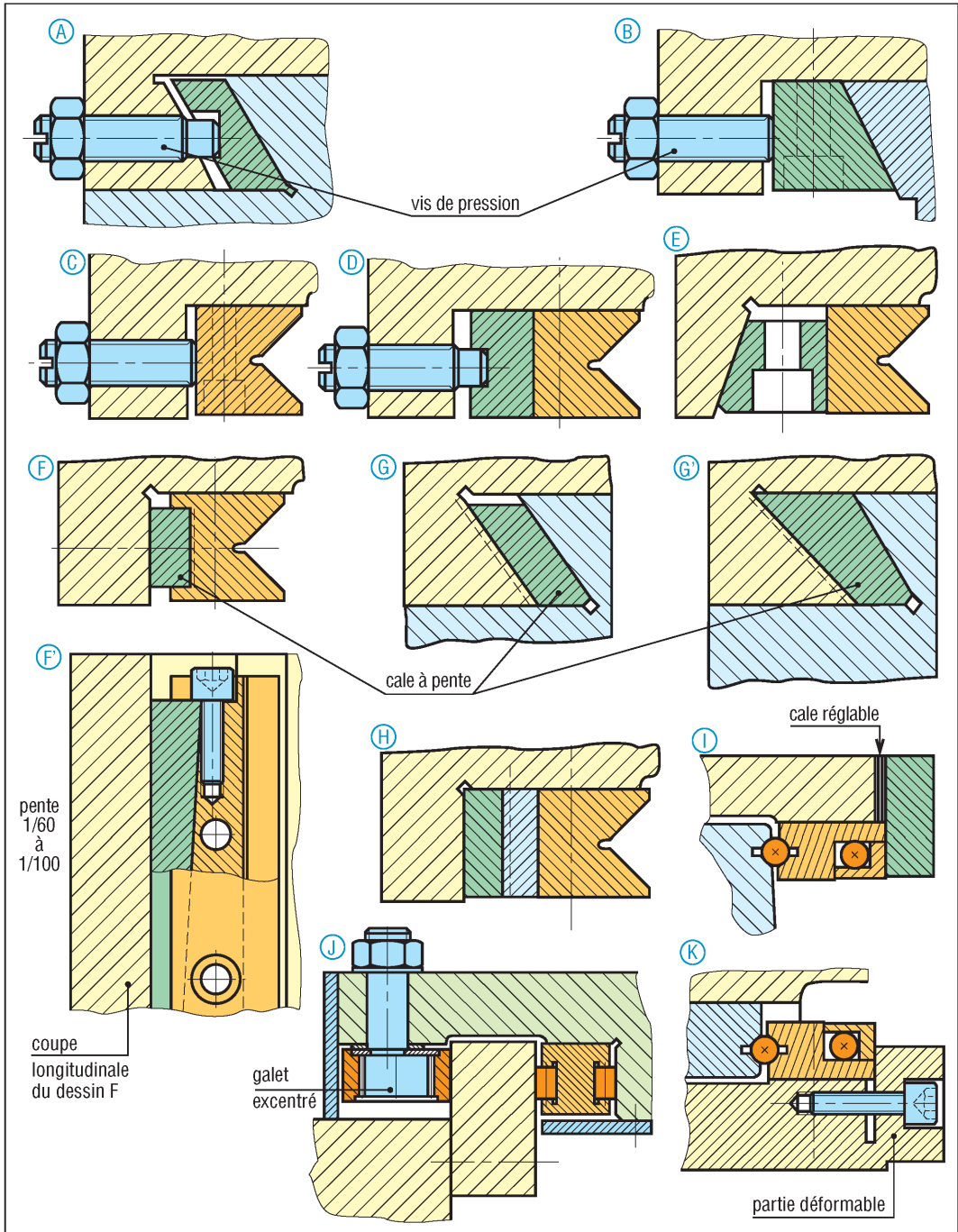
| Patins à rouleaux : extraits de dimensions * | | | | | | | | |
|--|----|-----|------|------|----|----|-----------------------|----------------|
| H | C | L | E | F | M | a | Charges de base (daN) | |
| | | | | | | | C | C ₀ |
| 16 | 25 | 62 | 17 | 19 | M4 | 6 | 1 540 | 3 400 |
| 19 | 27 | 69 | 25,5 | 20,6 | M4 | 6 | 2 610 | 5 800 |
| 26 | 40 | 86 | 28 | 30 | M6 | 10 | 5 000 | 10 600 |
| 26 | 40 | 102 | 44 | 30 | M6 | 10 | 6 250 | 14 200 |
| 26 | 40 | 126 | 68 | 30 | M6 | 10 | 8 000 | 19 500 |
| 38 | 52 | 134 | 51 | 41 | M8 | 14 | 12 400 | 27 000 |

* fabricants : INA, Schneberger...

III – Systèmes de réglage du jeu des liaisons

Un jeu trop élevé amène une imprécision angulaire du coulisseau par rapport à la direction de la translation. Les déformations sous charges, les variations de température et l'usure accentuent le phénomène.

Les dispositifs de réglage permettent de rattraper ou compenser les jeux parasites et de précharger, « ou régler », les éléments roulants.



19. Principaux systèmes de réglage de jeu.

Principaux dispositifs (fig. 19) : vis de pression plus cales parallèles (A, B, C, D) ; cales ou lardons à pente (F, G, H) ; cales de réglage de jeu (A, I) ; galets excentrés (J) et pièces déformables (K). Les fabricants proposent, prêts à l'emploi, la plupart de ces systèmes.

IV – Lubrification et étanchéité des liaisons glissières

1. Lubrification

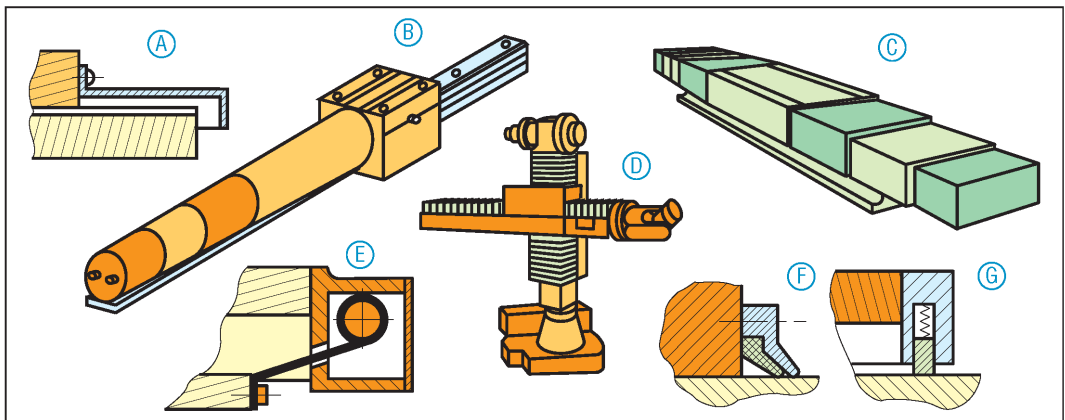
Elle assure une protection contre la corrosion. Elle est nécessaire pour maintenir la précision, la fiabilité, la durabilité et ralentir l'usure.

Une lubrification à la graisse suffit dans la plupart des cas. Si le frottement doit être très faible, il faut utiliser de préférence des huiles. Les additifs solides sont à éviter.

2. Étanchéité

Une étanchéité soignée s'impose lorsque le milieu ambiant est pollué (poussières, copeaux, liquides corrosifs, etc.). Il est nécessaire de protéger à la fois les surfaces de guidage et les composants de base de la liaison : douilles, guides, patins...

Principaux dispositifs : joints racleurs (F, G) ; capots de protection (A) ; capots télescopiques (B, C) ; bande déroulante (E) ; soufflets (D) ; protections latérales par labyrinthes et chicanes (fig. 14).



20. Principaux dispositifs d'étanchéité.

V – Vis à billes

Complémentaires des liaisons glissières, elles sont utilisées dans les machines et équipements exigeant précision, vitesse et rendement élevé : commandes numériques, robots, machines à mesurer, matériels médicaux, militaires...

Le mouvement est celui du système vis-écrou classique. Les billes, interposées entre les filets de la vis et de l'écrou, suppriment le frottement (analogie avec un roulement à billes). Le rendement est très élevé : près de 98 % contre 50 % environ pour un filet trapézoïdal classique.

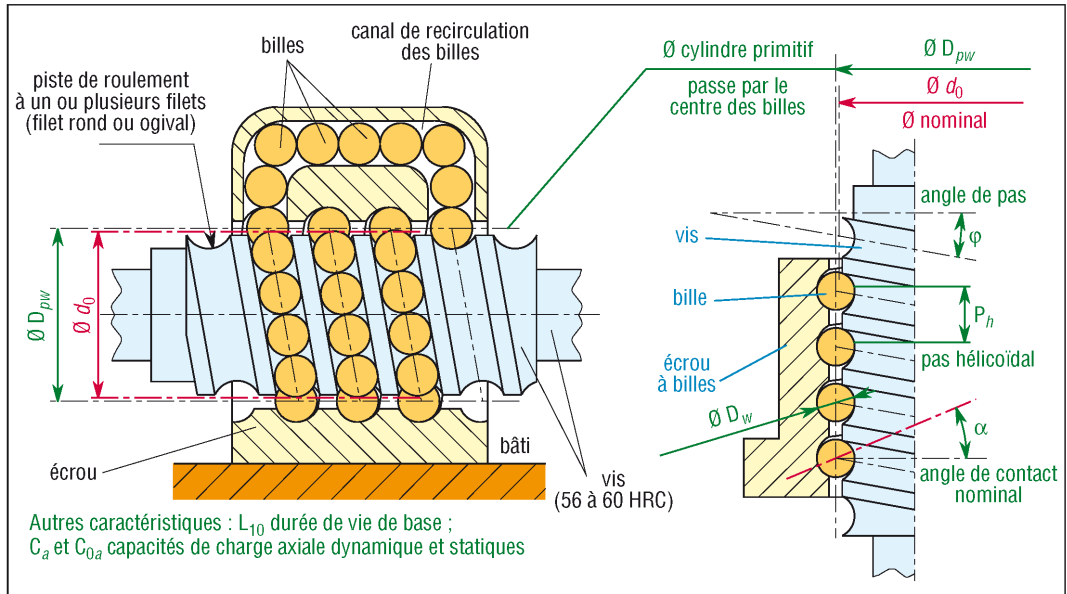
Elles se calculent de la même manière que les roulements à billes.

Avantages : rendement élevé ; vitesses de déplacement élevées ; durée de vie calculable ; grande précision (position axiale, répétabilité...) ; pas de jeux à rattraper ; contrôle plus aisé du mouvement ; pas de broutage et échauffements réduits.

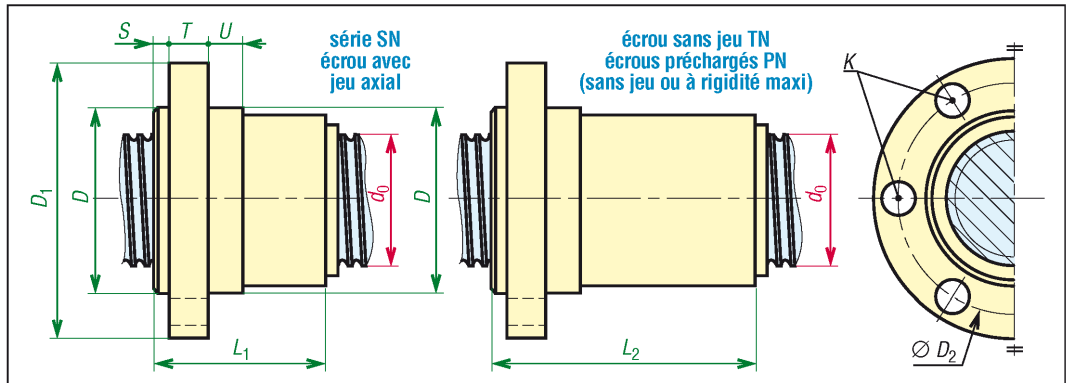
Inconvénients par rapport à un système classique : la réversibilité a lieu plus tôt, ils sont « moins irréversible » ; moins rigides : guidage moins long et flexions plus grandes ; la lubrification est généralement indispensable.

| Vis à billes : diamètres et pas nominaux préférés – NF ISO 3408-2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| d | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 |
| pas (mm) | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | | | | | | | | | | | |
| | | | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | | | | |
| | | | | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | | |
| | | | | | | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | | | | | | | | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |

Pas non préférés : 1 - 2 - 3 - 4 - 6 - 8 - 12 - 16 - 25 - 32



21. Principe de fonctionnement d'une vis à billes. Vocabulaire et définitions : extraits NF ISO 3408-1.



22. Exemples de dimensions de vis à billes. Calculs analogues aux roulements (C , C_0 , L_{10}).

| Vis à billes de précision : extraits de dimensions (SKF – Séries SN, TN et PN) | | | | | | | | | | | |
|--|-----|----------------|------|-------|---|----|----|------------|-----------------------|-------|------------|
| d_0 | pas | L_{maxi} vis | D g6 | D_1 | S | T | U | D_2 js12 | K trou lisse pour vis | L_1 | L_2 js13 |
| 16 | 5 | 2 100 | 28 | 48 | 6 | 10 | 11 | 38 | 6 × M5 | 50,5 | 52 |
| 20 | 5 | 5 000 | 33 | 57 | 6 | 12 | 15 | 45 | 6 × M6 | 52,5 | 58 |
| 25 | 5 | 5 000 | 38 | 62 | 6 | 12 | 15 | 50 | 6 × M6 | 52,5 | 70 |
| 25 | 10 | 6 000 | 43 | 67 | 6 | 12 | 15 | 55 | 6 × M6 | 85 | 85 |
| 32 | 5 | 6 000 | 45 | 70 | 6 | 12 | 15 | 58 | 6 × M6 | 57,5 | 80 |
| 32 | 10 | 6 000 | 54 | 87 | 6 | 16 | 20 | 70 | 6 × M8 | 79 | 113 |
| 40 | 5 | 6 000 | 53 | 80 | 6 | 14 | 15 | 68 | 6 × M6 | 64,5 | 94 |
| 40 | 10 | 6 000 | 63 | 95 | 6 | 16 | 20 | 78 | 6 × M8 | 99 | 134 |
| 50 | 10 | 6 000 | 72 | 110 | 6 | 16 | 20 | 90 | 6 × M10 | 99 | 157 |
| 63 | 10 | 6 000 | 85 | 125 | 6 | 20 | 20 | 105 | 6 × M10 | 103 | 161 |

28

LIAISONS ÉLASTIQUES RESSORTS

OBJECTIFS

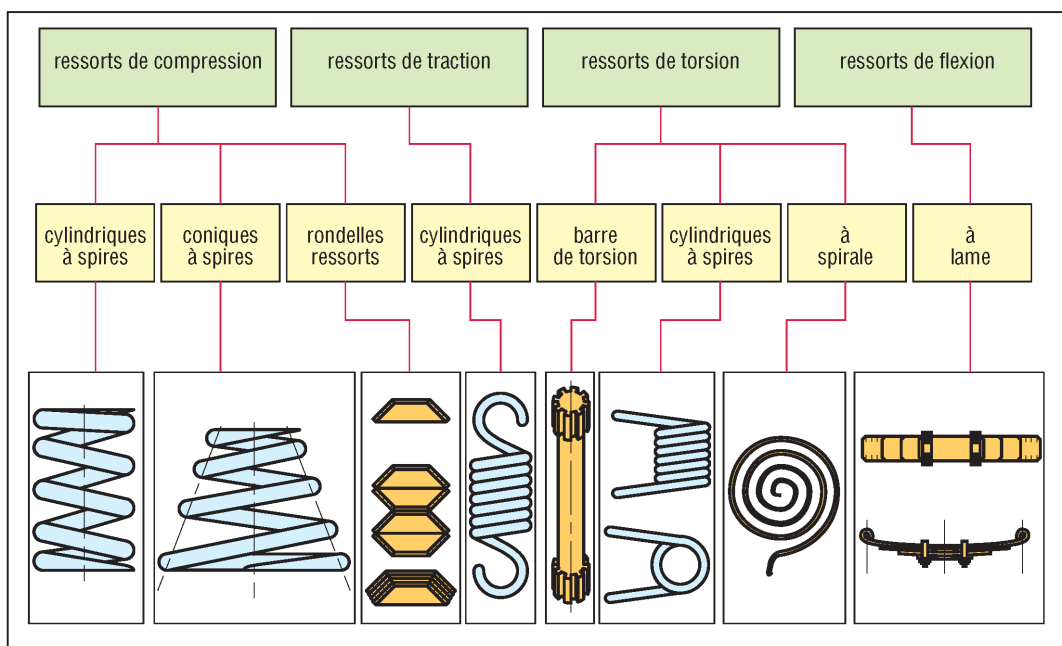
- Décrire les principales familles de ressorts.
- Fournir les éléments essentiels concernant leur calcul.

En se déformant, ces liaisons absorbent une certaine quantité d'énergie mécanique qu'elles restituent ensuite plus ou moins rapidement. La restitution peut être totale ou partielle avec amortissement. Les ressorts métalliques, contrairement aux liaisons élastiques par blocs élastomères, ne réalisent aucun amortissement et restituent presque totalement l'énergie reçue. Les goupilles élastiques, les anneaux d'arrêts (circlips...), les rondelles élastiques diverses font aussi partie des ressorts. Vocabulaire : NF EN ISO 26909.

I - Généralités

1. Classification des ressorts

Les ressorts sont classés à partir de la sollicitation reçue. Le matériau travaille soit en torsion, soit en flexion. La sollicitation du ressort n'est pas nécessairement la même que celle du matériau.



1. Principaux ressorts. Voir aussi NF EN ISO 26909.

2. Principaux matériaux pour ressorts

Les aciers (bruts, zingués, étamés, etc.) sont les plus utilisés. Leur résistance varie avec la taille et le procédé d'obtention. (NF EN 10270.1 à 3)

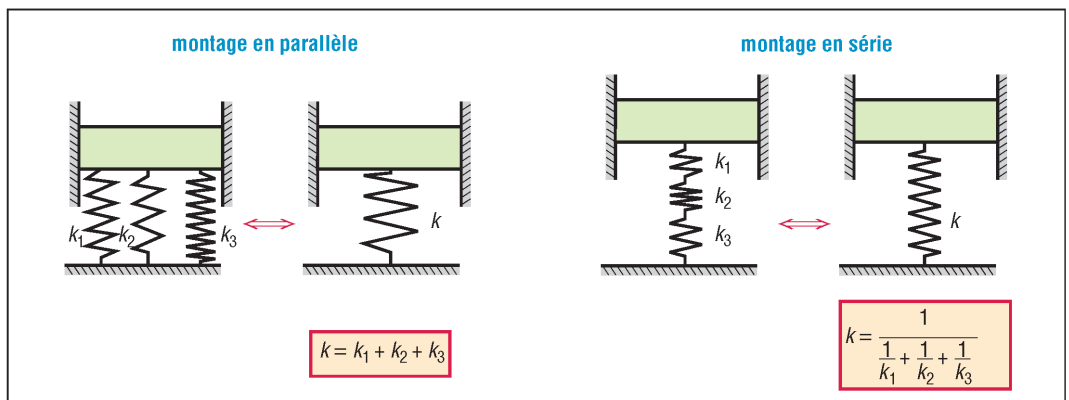
| Principaux matériaux pour ressorts | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------|-------------------|------------------------|---------|-----------------|--|--|
| matériaux | | Rm ou Rr (MPa) | | | principaux éléments d'addition en % | | | | E (GPa) | G (GPa) | ∅ des fils (mm) | observations | |
| famille | sous-groupes normalisé | ∅ fil (mm) | | | carbone C | Cr | Si (Ni) | V | | | | | |
| | | 1 | 5 | 10 | | | | | | | | | |
| aciers « C » non allié EN 10270-1 | régime statique | SL* SM* SH* | 1950 2220 2450 | 1430 1630 1820 | 1230 1380 1550 | 0,35 à 1,00 | - | 0,10 à 0,30 | (Mn) 0,40 à 1,20 | 206 | 81,5 | 0,05 à 20 | C60-C70 non trempé : solutions économiques ; C60-C70 trempé revenu remplace C80-C95 aux gros ∅ ; C80-C95 (corde à piano) : petits ressorts résistants et tenaces |
| | régime dynamique | DM* DH* | 2220 2450 | 1630 1820 | 1380 1550 | 0,45 à 1,00 | - | 0,10 à 0,30 | (Mn) 0,4-1,20 | | | | |
| aciers alliés trempés et revenus EN 10270-2 | C** | | 2010 | 1620 | 1510 | 0,6-0,75 | - | 0,15-0,3 | - | 206 | 79,5 | 0,2 à 17 | résistent à la fatigue, supportent des contraintes et des chocs plus élevés que les « C » ; ceux au silicium sont les plus performants |
| | CrV** | | 2160 | 1710 | 1600 | 0,6-0,72 | 0,4-0,6 | 0,15-0,3 | 0,15-0,3 | | | | |
| | SiCr** | | 2300 | 1980 | 1810 | 0,5-0,6 | 0,5-0,8 | 1,2-1,6 | - | | | | |
| | SiCrV** | | 2430 | 2160 | 2010 | 0,5-0,7 | 0,5-1,0 | 1,2-1,7 | 0,1-0,25 | | | | |
| aciers inoxydables EN 10270-3 | X10CrNi18-8 | | 1990 | 1560 | 1360 | ≤ 0,15 | 16 à 19 | 6 à 9,5 | - | 185 | 73 | 0,2 à 10 | Les plus résistants à la corrosion et aux contraintes exercées sous des températures moyennement élevées 250°C à 300°C. |
| | X7CrNiAl17-7 | | 2020 | 1560 | 1440 | ≤ 0,09 | 16 à 18 | 6,5 à 8 | Al ≤ 1,5 | 200 | 78 | | |
| | X5CrNiMo17-12-2 | | 1790 | 1380 | 1210 | ≤ 0,07 | 16,5/18,5 | 10 à 13 | Mo ≤ 2,5 | 180 | 71 | | |
| | X2CrNiMoN22-5-3 | | 2410 | 1670 | | ≤ 0,03 | 21 à 23 | 4,5 à 6,5 | Mo ≤ 3,5 | 200 | 79 | | |
| alliages de cuivre NF EN 1654 (NF EN 12166) | CuBe1,7 | | 410 à 1450*** | | | 1,6 ≤ Be ≤ 1,7 % ; | | | | 135 | 53 | 0,2 à 10 | utilisés en bandes (épaisseurs 0,1 à 1 mm ; largeurs 3 à 20 mm) ; bonnes résistances à la corrosion et bonnes conductivité électrique. |
| | CuBe2 | | 410 à 1520*** | | | 1,8 ≤ Be ≤ 2,1 % ; | | | | 135 | 53 | | |
| | CuCo2Be | | 240 à 1040*** | | | 0,4 ≤ Be ≤ 0,7 % ; 2,0 ≤ Co ≤ 2,8 % | | | | 140 | 55 | | |
| | CuNi2Be | | 240 à 1040*** | | | 0,2 ≤ Be ≤ 0,6 % ; 1,6 ≤ Ni ≤ 2,0 % | | | | 140 | 55 | | |
| alliages de nickel | Ni + Cu | | 850 à 1050 | | | NiCu30Fe (monel400) | | | | 195 | 70 | Résistent à la corrosion, aux hautes > (700°C) et bases températures ; non magnétiques. | |
| | Ni + Cr + Mo | | 1300 à 1600 | | | NiCr22Mo9Nb (inconel625) | | | | 206 | 79 | | |
| | Ni + Cr + Fe | | 800 à 1500 | | | NiCr19Fe19Nb5Mo3 (inconel718) | | | | 205 | 77 | | |

* une faible résistance à la traction pour SL ; résistance moyenne à la traction pour SM et DM ; résistance élevée à la traction pour SH et DH.
 ** existent en variantes FD pour régime statique ; TD (résistance moyenne à la fatigue) et VD (résistance élevée à la fatigue) pour régimes dynamiques.
 *** valeurs dépendantes de l'état métallurgique (R...; H...; Y...; B... voir page 169) et de l'épaisseur de la bande.

| Principaux diamètres de fils normalisés pour ressorts à spires | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 0,12 | 0,16 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,56 | 0,60 | 0,65 |
| 0,70 | 0,75 | 0,80 | 0,90 | 1,00 | 1,10 | 1,30 | 1,40 | 1,50 | 1,60 | 1,70 |
| 1,80 | 1,90 | 2,00 | 2,10 | 2,25 | 2,40 | 2,50 | 2,60 | 2,80 | 3,00 | 3,20 |
| 3,40 | 3,60 | 3,80 | 4,00 | 4,25 | 4,50 | 4,75 | 5,00 | 5,30 | 5,60 | 6,00 |
| 6,30 | 6,50 | 7,00 | 7,50 | 8,00 | 8,50 | 9,00 | 9,50 | 10,0 | 11,00 | 12,00 |

II - Groupements ou associations de ressorts

Les ressorts peuvent être montés en parallèles ou en séries ; les raideurs K correspondantes sont indiquées ci-dessous.

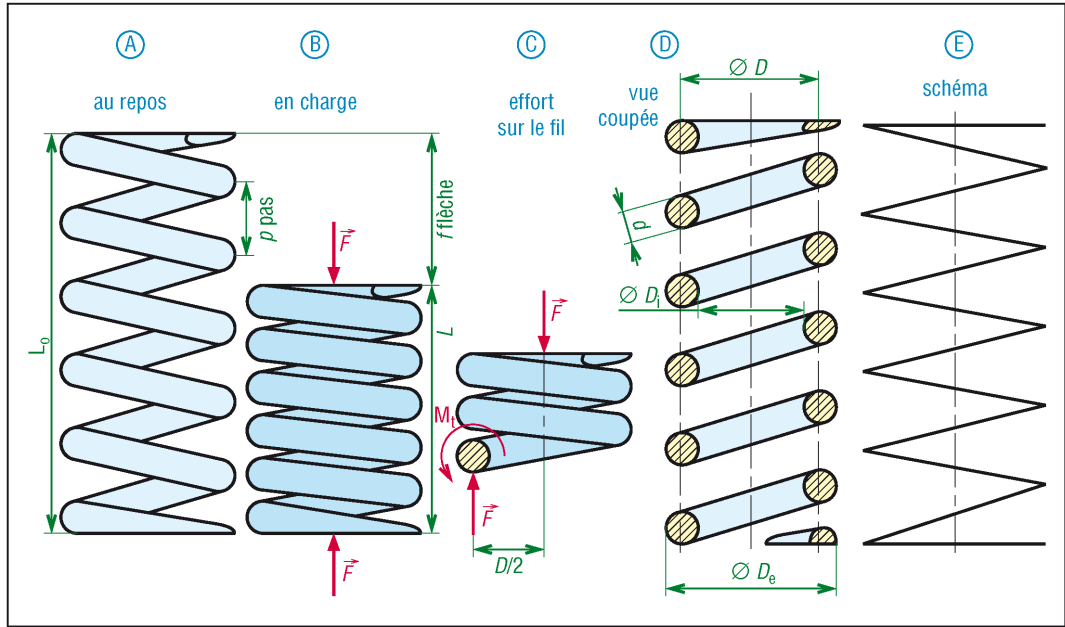


2. Groupements de ressorts.

III - Ressorts de compression à spires

Cette famille est la plus répandue. Le fil enroulé en hélice travaille essentiellement en torsion (analogie avec une barre de torsion enroulée en hélice).

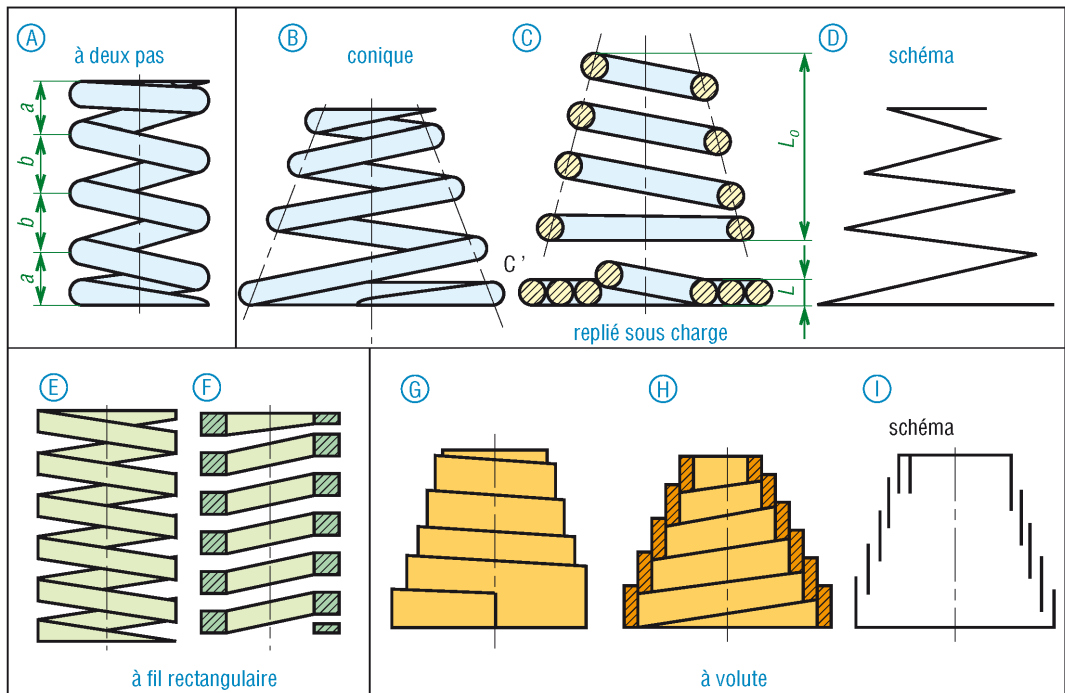
1. Principe et représentations normalisées (NF ISO 2162)



3. Ressorts de compression cylindrique.

Les spires deviennent jointives, en contact les unes avec les autres, en cas de surcharge et le ressort réagit comme une pièce « solide », ce qui le protège de la rupture.

Les ressorts coniques et à volute sont très peu encombrants en position comprimée.



4. Autres ressorts de compression.

2. Calculs et formules utiles (voir aussi NF EN 13906-1)

Les formules suivantes sont obtenues en résistance des matériaux « cas de la torsion ». Le fil enroulé supporte un couple de torsion $Mt = F \cdot D/2$.

Flèche
$$f = \frac{8 \cdot N_a \cdot F \cdot D^3}{G \cdot d^4}$$

Raideur
$$K = \frac{F}{f} = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot N_a \cdot D^3}$$

f : $L - L_0$ = flèche du ressort en mm

F : charge appliquée en N

D : diamètre d'enroulement en mm

d : diamètre du fil en mm

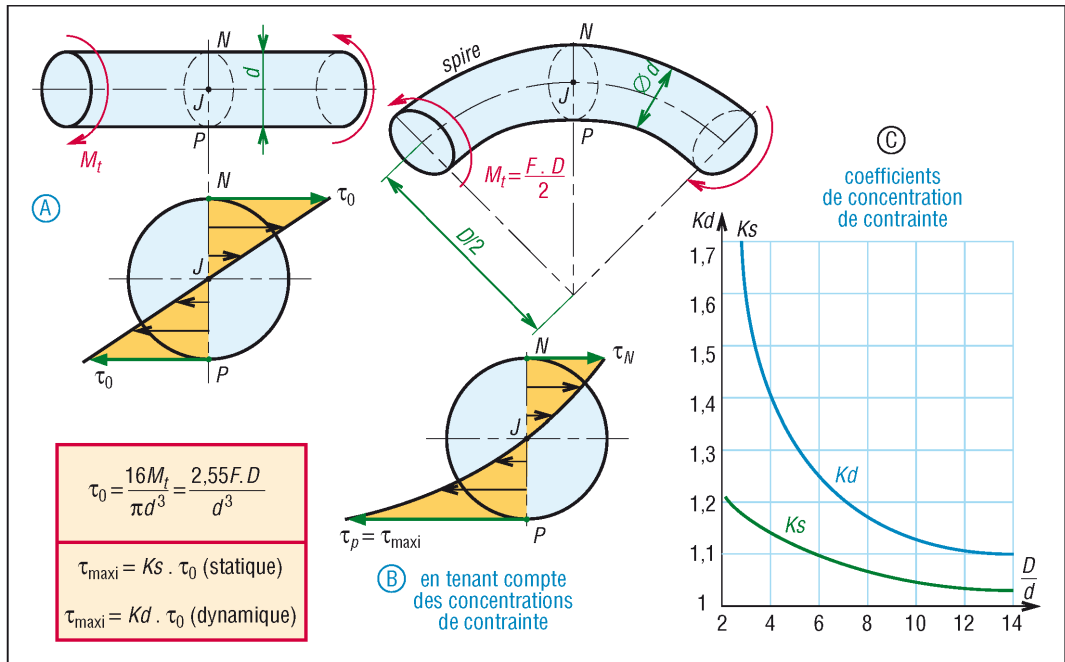
G : module d'élasticité transversal du matériau ($G \approx 80\,000 \text{ N/mm}^2$ pour les aciers)

K : raideur ou rigidité du ressort en N/mm

N_a : nombre de spires actives (ou n) ou utiles

| Spires rapprochées | | Spires non rapprochées | |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|
| non meulées | meulées | meulées | coupées |
| | | | |
| $L = N_a \cdot p + 3d$ | $L = N_a \cdot p + 2d$ | $L = N \cdot p + d/2$ | $L = N \cdot p + d$ |
| $N_a = N - 2 = n = n_t - 2$ | | $N_a = N - 1 = n_t = n$ | |

5. Calcul des différentes spires. $n_t = N =$ nombre total de spires.



6. Contraintes dans une spire.

a) Contraintes de cisaillement maximales du matériau

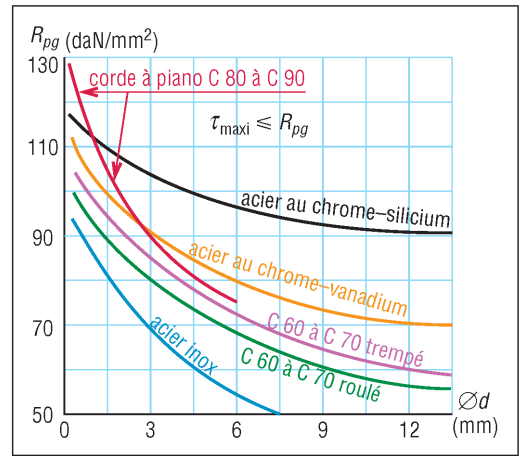
La valeur $(16Mt/\pi d^3 \leq Rpg)$ correspond au cas d'un fil droit avec courbure négligée et permet un calcul approximatif. L'enroulement ou la courbure des spires amène un phénomène de concentration de contrainte augmentant les valeurs précédentes. La contrainte maximale dépend alors de la courbure $C = D/d$.

K_s (charge statique) et K_d (charge dynamique) sont les coefficients de concentration de contraintes correspondants à utiliser.

Exemples d'unités : Mt en mmN ; d en mm ; Rpg et contraintes en N/mm^2 ou MPa.

b) Résistance pratique au cisaillement R_{pg}

Les valeurs indiquées sur le graphe correspondent à des valeurs moyennes et à un service normal. Elles doivent être diminuées de 15 à 20 % si les conditions de service sont sévères et peuvent être majorées d'autant dans le cas contraire.



7. Résistance pratique au cisaillement de quelques métaux.

| R_{pg} ou τ_{adm} contrainte admissible au cisaillement (aciers) | | | | | | | | |
|---|----------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ressorts enroulés à froid | compression | $R_{pg} = \tau_{adm} = 0,56 R_m = 0,56 R_r^*$ | | | | | | |
| | traction | $R_{pg} = \tau_{adm} = 0,45 R_m = 0,56 R_r^*$ | | | | | | |
| Ressorts enroulés à chaud | R_{pg} (MPa) | d (mm) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| | | compression | 920 | 840 | 790 | 760 | 730 | 700 |
| | | traction | 600 | | | | | |

* R_m ou R_r , tableau page 324

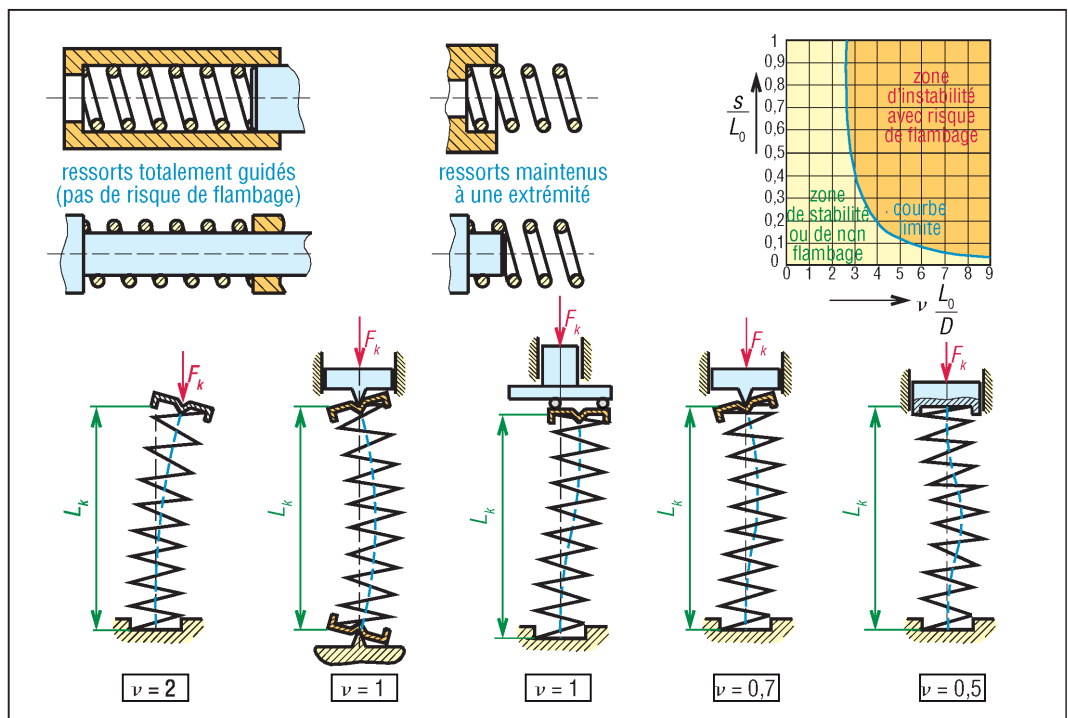
c) Résistance au flambage

Schématiquement, il y a risque de flambage lorsque la longueur libre L_0 est supérieure à $4D$ ou $5D$. Ce risque diminue lorsque les ressorts sont maintenus aux extrémités et disparaît s'ils sont totalement guidés (fig. 8).

La flèche critique de flambage f_k se calcule (NF EN 13906-1) à partir de la formule qui suit ; on peut aussi utiliser le graphe de la figure 8.

$$f = L - L_0 < f_k = L_k - L_0 \text{ avec } \begin{cases} L : \text{longueur du ressort sous charge } F \\ L_k : \text{longueur (critique) de flambage} \\ f : \text{flèche sous la charge } F (F < F_k) \end{cases}$$

$$f < f_k = L_0 \frac{0,5}{1 - \frac{G}{E}} \left[1 - \sqrt{\frac{1 - \frac{G}{E}}{0,5 + \frac{G}{E}}} \left(\frac{\pi D}{\nu L_0} \right)^2 \right] \text{ avec } \begin{cases} f_k : \text{flèche critique de flambage sous charge } F_k \\ G : \text{module d'élasticité transversal (page 324)} \\ E : \text{module d'élasticité longitudinal (page 324)} \\ L_0 : \text{longueur ressort à l'état libre} \end{cases}$$



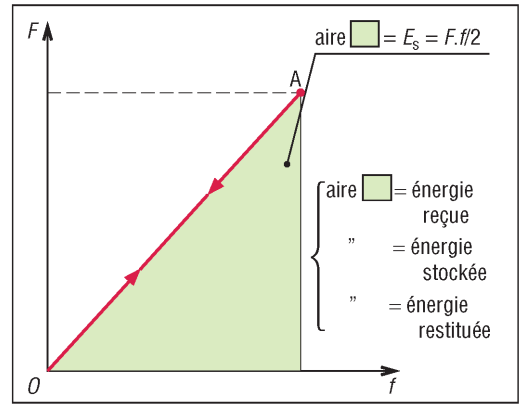
8. Flambage en compression des ressorts : valeurs du coefficient d'assise (ν) en fonction du type de support.

d) Énergie stockée (E_s)

Pour des ressorts parfaitement élastiques, l'énergie stockée E_s correspond à l'énergie reçue au moment de la compression et a même valeur que celle restituée pendant la détente.

$$E_s = 1/2.F.f$$

E_s : énergie stockée en joules
 $f = L - L_0$: course en mm
 F : charge sur le ressort en N

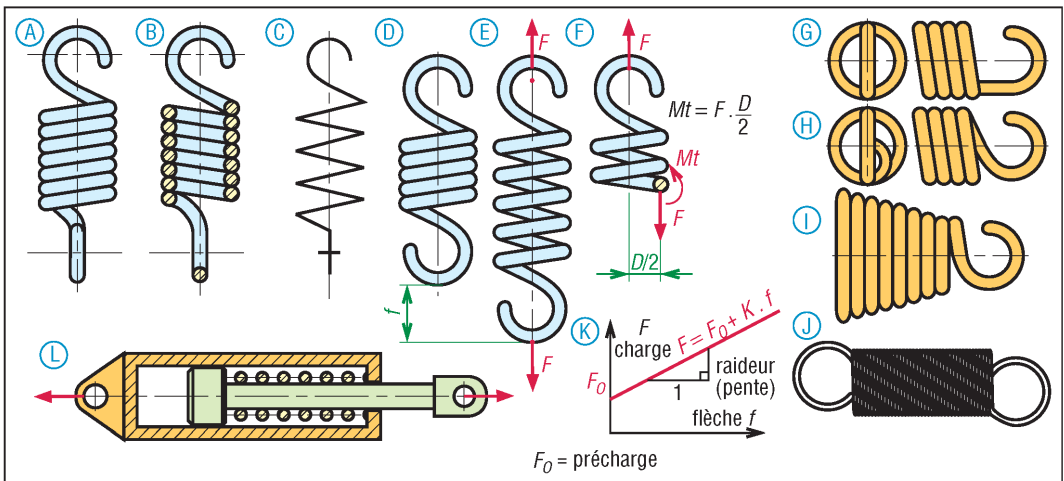


9. Énergie mise en jeu lors des déformations.

IV - Ressorts de traction cylindriques à spires

Les spires sont jointives ou en contact au repos car ces ressorts sont légèrement préchargés au moment de leur fabrication (tension initiale F_0 valant 10 à 25 % de la valeur de la charge maximale admissible).

La déformation lors des surcharges n'est pas limitée comme dans le cas des ressorts de compression (pas d'effet de « bloc solide » protecteur).



10. Ressorts de traction : principales caractéristiques (NF ISO 2162...).

Représentations normalisées (cas A, B, C), formes de boucles possibles (G, H, I, J). La réduction progressive du diamètre des spires (cas I) permet de diminuer les concentrations de contraintes au niveau du crochet, point faible de ces ressorts. Pour les cas difficiles, il est préférable d'utiliser un ressort de compression transformé plutôt qu'un ressort de traction (cas L). L'étude de ces ressorts (contraintes, énergie stockée, associations...) est analogue à celle des ressorts de compression (D, E, F, K). Mêmes formules pour τ , τ_{maxi} , K_d et K_s (fig. 6).

Formules utiles (calculs : voir aussi NF EN 13906-2) ; $E_s = (F + F_0)f/2$

Flèche $f = \frac{8.N_a.D^3.(F - F_0)}{G.d^4}$

Raideur $K = \frac{G.d^4}{8.N_a.D^3} = \frac{F - F_0}{f}$

Unités : F , charge sur le ressort, et F_0 précharge en N ; N_a : nombre de spires actives ; d et D en mm ; G en N/mm^2 (module d'élasticité transversal du matériau).

V - Ressorts de torsion

Il existe trois familles : les barres de torsion, les ressorts de torsion cylindriques à spires et ressorts en spirale.

Dans les trois cas, l'énergie stockée est :

$$E_s = 1/2.Mt.\alpha$$

E_s : énergie stockée en joules

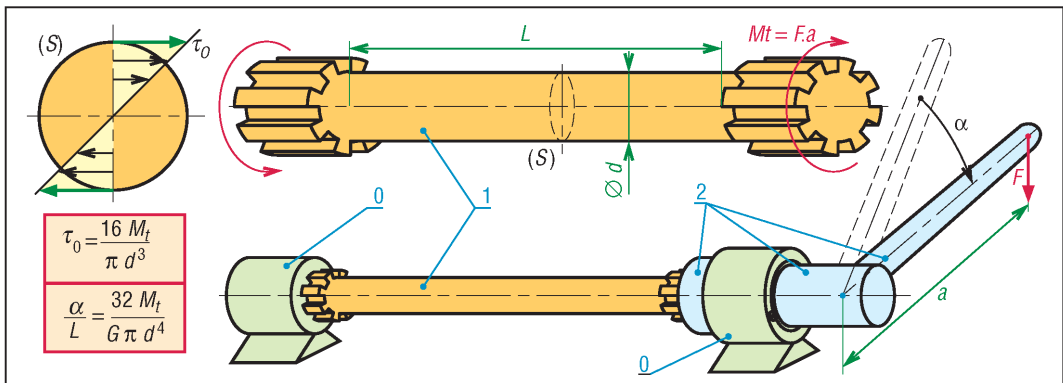
Mt : couple $F.a$ en mN

α : angle de torsion en radians

1. Barres de torsion

Surtout utilisées dans les suspensions d'automobiles, elles ont la forme d'une barre cylindrique pleine avec des cannelures aux extrémités pour ancrage.

Principe

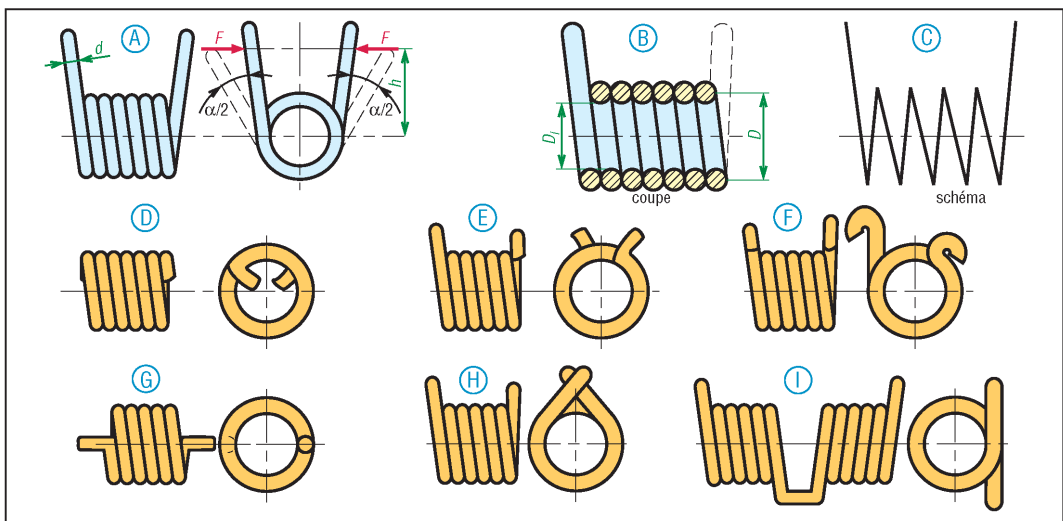


11. Barre de torsion.

Remarques : liaison 2/0 = liaison pivot, α = angle de torsion, $d.L$ = partie active ; le matériau travaille en torsion.

Unités : α en radians ; L , d et a en mm ; F en N ; Mt en Nmm ; G et la contrainte en N/mm^2 .

2. Ressorts de torsion cylindriques à spires



12. Ressorts de torsion à spires. Représentation et charges : A-B-C ; extrémités possibles : D à I.

Ces ressorts sont généralement montés sur un axe qui les traverse. Le diamètre de l'axe doit être plus petit que le diamètre intérieur D_i du ressort afin de tenir compte de la contraction sous charge.

La déformation du ressort résulte de la flexion du fil des spires.

Formules utiles (issues de la résistance des matériaux, cas de la flexion) :

| | | |
|---|---|---|
| Angle d'enroulement $\alpha = \frac{64 F.h.D.N}{E.d^4}$ | Raideur $K = \frac{E.d^4}{64 N.D} = \frac{M_f}{\alpha}$ | Contrainte maxi (flexion) $\sigma = K_f \frac{32 h.F}{\pi.d^3} \leq R_{pe}$ |
|---|---|---|

Unités (calcul normalisé : voir NF EN 13906-3)

D, d et h en mm

α : angle d'enroulement en radians

F : charge en N

N : nombre de spires actives

E : module d'élasticité longitudinal en MPa (page 324)

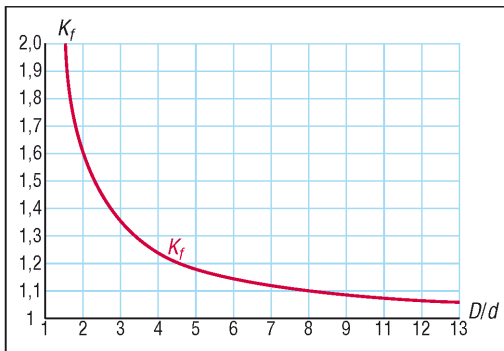
$M_f = F.h$: moment de flexion en Nmm

σ : contrainte en N/mm² ou MPa

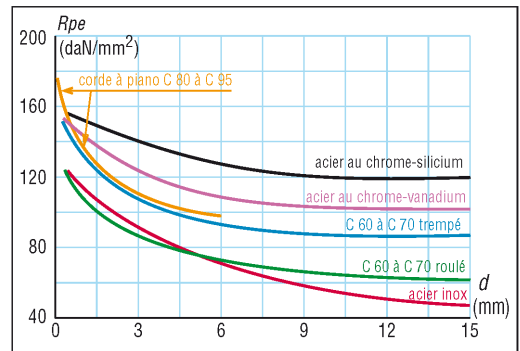
K_f : coefficient de concentration de contraintes fonction de la courbure

R_{pe} : résistance pratique à l'extension en N/mm² ; $R_{pe} \approx 0,7 R_r$ ($R_r = R_m$)

$$K_f \approx \frac{\frac{D}{d} + 0,07}{\frac{D}{d} - 0,75}$$



13. Coefficient de concentration de contraintes K_f



14. Résistance pratique à l'extension de quelques matériaux.

Remarques : les valeurs de R_{pe} proposées sur le graphe conviennent à un service normal. Il faut majorer de 15 à 20 % si les conditions de service sont sévères et diminuer d'autant dans le cas contraire.

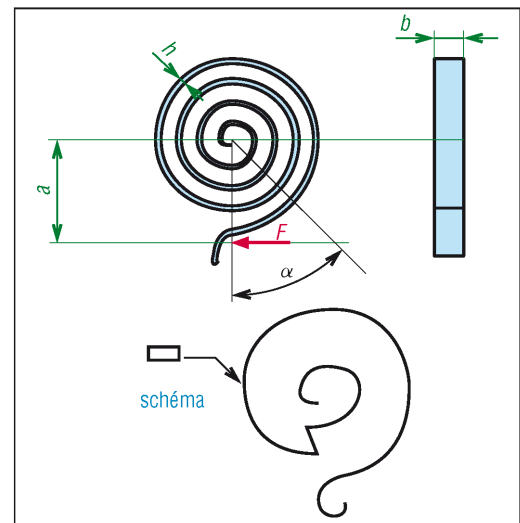
3. Ressorts de torsion à spirale

La spire enroulée, de forme rectangulaire ($b \times h$), travaille en flexion. Le moment fléchissant est maximum au centre ($M_{f_{maxi}} = F.a$).

| | |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Angle d'enroulement | $\alpha = \frac{12.F.a.L}{E.b.h^3}$ |
|----------------------------|-------------------------------------|

| | |
|----------------|---|
| Raideur | $K = \frac{M_f}{\alpha} = \frac{E.b.h^3}{12 L}$ |
|----------------|---|

Unités : a, L (longueur de la spirale), b et h en mm ; F en N ; M_f en mmN ; E (module d'élasticité longitudinal du matériau) en N/mm².



15. Ressort de torsion à spirale (NF ISO 2162).

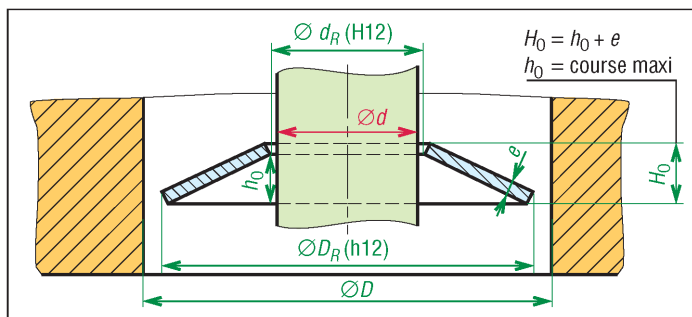
VI - Rondelles ressorts (« type Belleville »)

De forme tronconique, elles permettent de réaliser simplement et « sur mesure » des ressorts de compression à l'unité ou en petites séries. Le matériau (C65, C70, C75 et 50CrV4 si $e < 4$; 45SiCrMo6 et 45SiCr7 si $e \geq 4$, etc.) travaille en flexion, dureté maxi 48HRC.

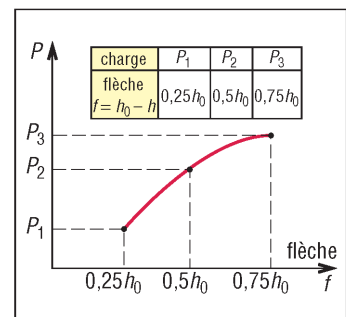
Différents empilages sont possibles : en série, en parallèle ou une combinaison des deux. L'utilisateur peut choisir entre plusieurs raideurs et plusieurs déformations. NFE 25-104.

| | | | | |
|------------------------------|-------------------------------|------|-------|--------|
| Exemples d'empilages | | | | |
| | capacité de charge | P | P | $6P$ |
| déformation ou flèche sous P | $f = h_0 - h \approx H_0 - H$ | $6f$ | $f/6$ | $3f/2$ |
| schéma | | | | |

16. Exemples d'empilages de rondelles ressorts.



17. Dimensions des rondelles élastiques et cotes de montage.



18. Courbe effort/déformation.

| Rondelles ressorts coniques ou dynamiques («Belleville») : principales dimensions (NFE 25-104) | | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 25 | 28 | 30 | 35 | 40 | 45 |
|--|----------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| dimensions communes | d mm | | 8 | 10 | 12,5 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22,5 | 25 | 28 | 31,5 | 35,5 | 40 | 45 | 50 | 56 | 63 | 71 | 80 | 90 |
| | d_R mm | | 4,2 | 5,2 | 6,2 | 7,2 | 8,2 | 9,2 | 10,2 | 11,2 | 12,2 | 14,2 | 16,3 | 18,3 | 20,4 | 22,4 | 25,4 | 28,5 | 31 | 36 | 41,0 | 46,0 |
| | D mm | | 8,5 | 10,5 | 13 | 14,5 | 16,5 | 18,5 | 20,5 | 23 | 25,6 | 28,6 | 32,4 | 36,4 | 41 | 46 | 51 | 57,2 | 64,5 | 72,5 | 81,5 | 91,5 |
| série épaisse A | e_A mm | | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,1 | 1,25 | 1,5 | 1,5 | 1,75 | 2 | 2,25 | 2,5 | 3 | 3 | 3,5 | 4 | 5 | 5 |
| | h_A mm | | 0,6 | 0,75 | 1 | 1,1 | 1,25 | 1,4 | 1,55 | 1,75 | 2,05 | 2,15 | 2,45 | 2,80 | 3,15 | 3,5 | 4,1 | 4,3 | 4,9 | 5,6 | 6,7 | 7 |
| | $f = 0,25 h_0$ | P_{1A} daN | 7 | 12 | 24 | 28 | 36 | 45 | 54 | 69 | 105 | 104 | 139 | 186 | 234 | 278 | 425 | 413 | 540 | 736 | 1182 | 1129 |
| | $f = 0,50 h_0$ | P_{2A} daN | 14 | 22 | 45 | 54 | 69 | 86 | 105 | 133 | 203 | 198 | 267 | 357 | 448 | 533 | 821 | 788 | 1040 | 1412 | 2292 | 2165 |
| | $f = 0,75 h_0$ | P_{3A} daN | 21 | 32 | 66 | 79 | 101 | 125 | 152 | 193 | 296 | 286 | 387 | 518 | 651 | 774 | 1197 | 1137 | 1503 | 2049 | 3356 | 3146 |
| série mince B | e_B mm | | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,25 | 1,25 | 1,5 | 1,75 | 2 | 2 | 2,5 | 2,5 | 3 | 3,5 |
| | h_B mm | | 0,55 | 0,7 | 0,85 | 0,9 | 1,05 | 1,20 | 1,35 | 1,45 | 1,60 | 1,80 | 2,15 | 2,25 | 2,65 | 3,05 | 3,40 | 3,60 | 4,25 | 4,50 | 5,30 | 6,0 |
| | $f = 0,25 h_0$ | P_{1B} daN | 5 | 8 | 12 | 12 | 17 | 23 | 30 | 30 | 37 | 48 | 79 | 73 | 111 | 153 | 195 | 190 | 294 | 289 | 445 | 580 |
| | $f = 0,50 h_0$ | P_{2B} daN | 7 | 15 | 21 | 20 | 30 | 41 | 54 | 53 | 65 | 84 | 141 | 127 | 195 | 270 | 348 | 333 | 527 | 504 | 784 | 1034 |
| | $f = 0,75 h_0$ | P_{3B} daN | 11 | 20 | 29 | 27 | 41 | 56 | 74 | 71 | 87 | 111 | 191 | 169 | 262 | 365 | 470 | 443 | 719 | 671 | 1052 | 1406 |

f est la flèche ; d est le diamètre nominal.
Exemple de désignation : rondelle ressort 25 x 1,5 ; NFE 25-104.

Le guidage ou le maintien latéral de l'ensemble des rondelles après montage doit être assuré par un axe ($\varnothing d$ fig. 17) ou un alésage ($\varnothing D$).

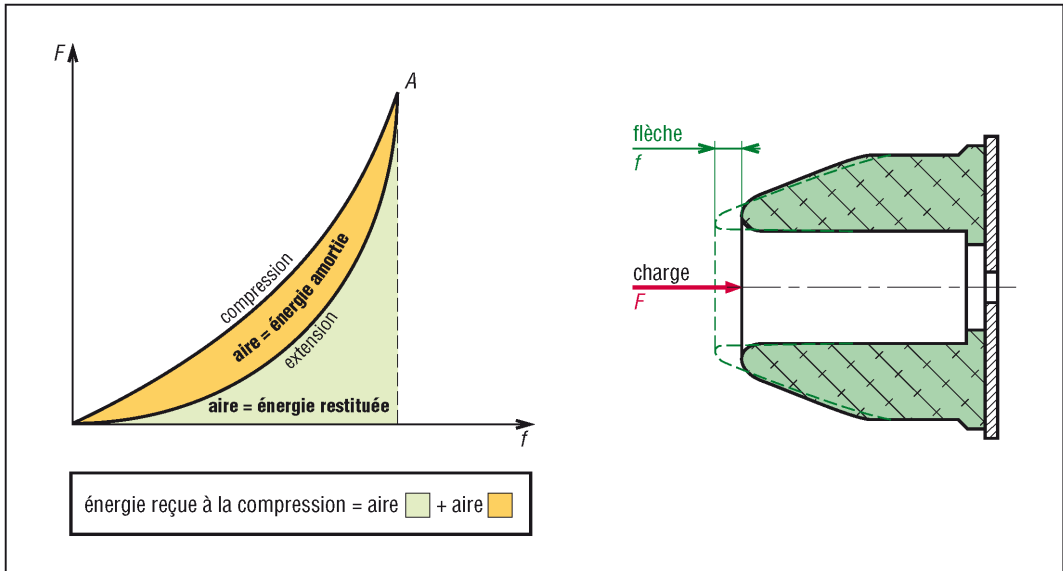
Une série épaisse (type A), une série mince (type B) et d'autres variantes sont disponibles.

VII – Liaisons élastiques par blocs élastomères

À base d'élastomère, ces liaisons possèdent à des degrés divers des propriétés d'élasticité et d'amortissement.

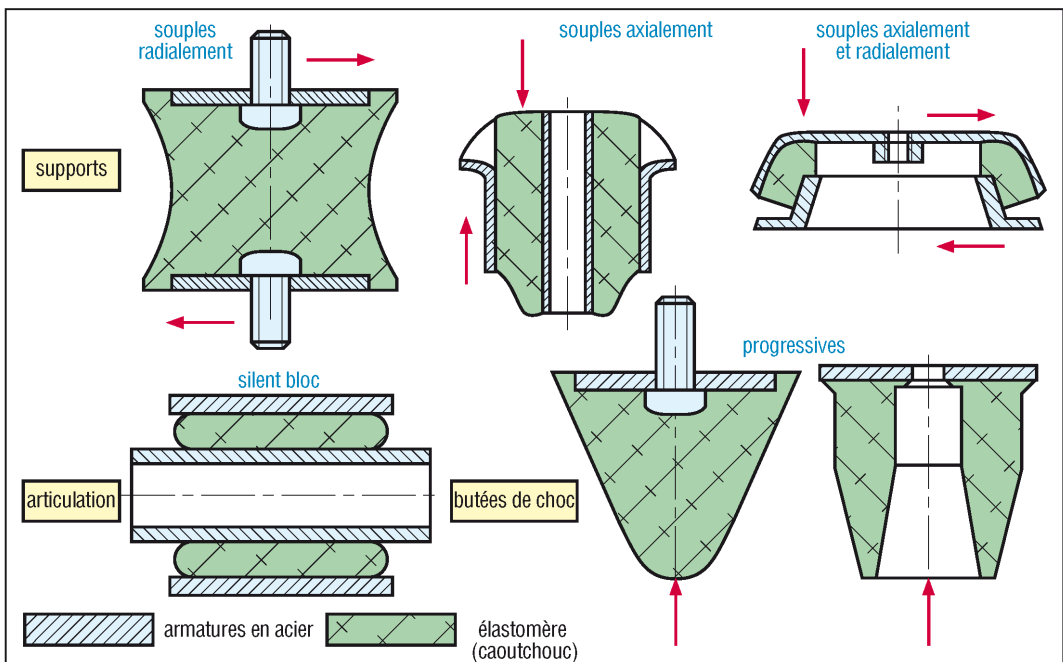
L'amortissement se traduit par un freinage du mouvement réduisant les amplitudes des oscillations et des vibrations.

La déformation (flèche f) des élastomères sous l'action d'une charge F est différente de celle des ressorts métalliques (graphes avec hystérésis caractéristique du phénomène d'amortissement). L'élastomère peut travailler en compression, au cisaillement ou suivant une combinaison des deux.



19. Principe de l'amortissement des systèmes à blocs élastomères.

Principales réalisations : supports, articulations et butées de chocs (voir dimensions dans le chapitre 20 : éléments d'assemblage).



20. Exemples de réalisations : voir dimensions pages 219 à 221.

29

ENGRENAGES ÉTUDE GÉNÉRALE

OBJECTIFS

- Décrire et indiquer les caractéristiques essentielles (terminologie, formules, étude cinématique, propriétés) des principaux types d'engrenages et des dentures en développante de cercle.

Les engrenages sont des composants mécaniques essentiels. Ils font partie des systèmes de transmission de mouvement et de puissance les plus utilisés, les plus résistants et les plus durables.

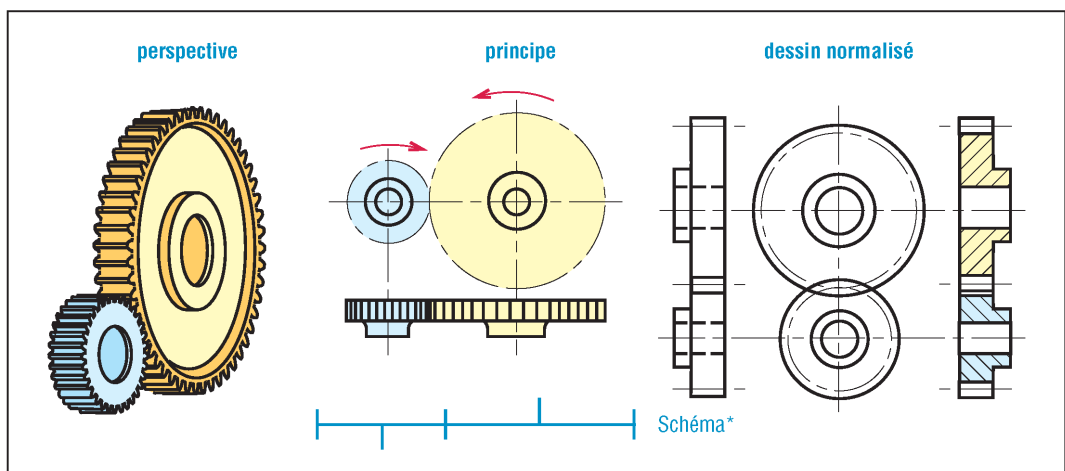
Ils sont normalisés. Les engrenages fabriqués avec la norme internationale ISO présentent l'avantage d'être facilement interchangeables et permettent des possibilités de fabrication plus économiques (conception type, méthodes de calcul normalisées, taillage et contrôle automatisés, équipements standards). Vocabulaire : NF ISO 1122-1 et 2. Dessins normalisés NF EN ISO 2203, symboles géométriques : NF ISO 701.

Lorsqu'il s'agit d'engrenages pour très grandes séries (automobiles...) les constructeurs s'écartent de ces standards afin d'optimiser les coûts.

I - Différents types d'engrenages

Définition : on appelle engrenage l'ensemble des deux roues dentées engrénant l'une avec l'autre.

1. Engrenages droits à denture droite

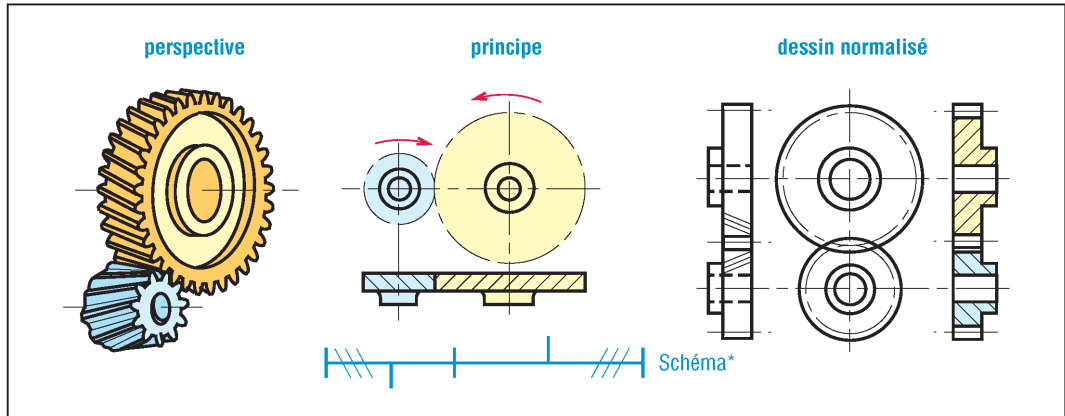


1. Engrenage droit à denture droite pour arbres parallèles. (* NF EN ISO 3952-2 – Voir aussi page 608).

Les plus simples et les plus économiques, ils sont utilisés pour transmettre le mouvement et la puissance entre deux arbres parallèles. Les dents des deux roues de l'engrenage sont parallèles à l'axe de rotation des arbres.

Du fait de leur relative simplicité, ils sont souvent utilisés pour introduire les relations de cinématique et les définitions normalisées concernant la géométrie des engrenages.

2. Engrenages droits à denture hélicoïdale



2. Engrenage droit à denture hélicoïdale pour arbres parallèles (* avec indication de denture – NF EN ISO 3952-2).

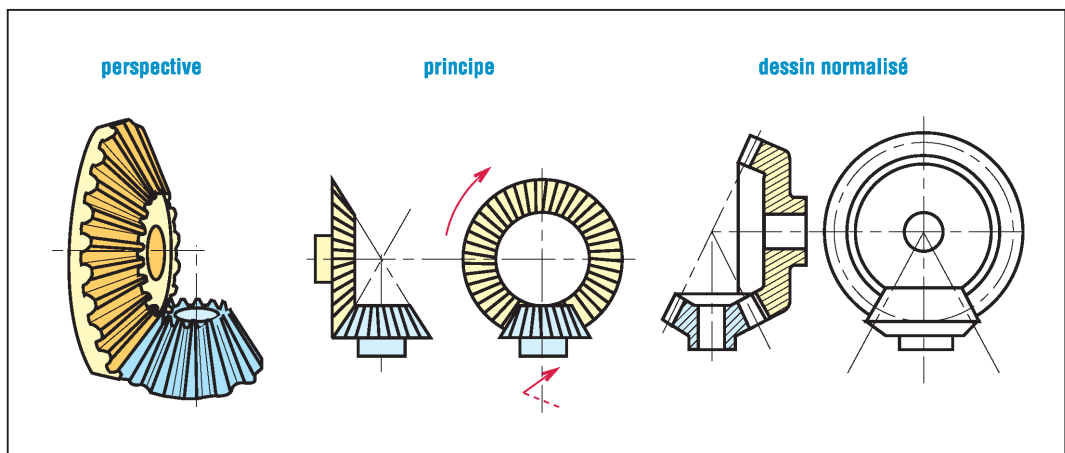
De même usage que les précédents, ils sont très utilisés en transmission de puissance ; les dents des roues sont inclinées par rapport à l'axe de rotation des deux arbres.

À taille égale, ils sont plus performants que les précédents pour transmettre puissance et couple. Du fait d'une meilleure progressivité et continuité de l'engrènement ils sont aussi plus silencieux.

L'inclinaison de la denture engendre des efforts axiaux, suivant l'axe de l'arbre, qui doivent être supportés par les paliers et des couples supplémentaires qui accentuent le fléchissement des arbres.

Remarque : ils sont parfois utilisés pour transmettre le mouvement entre des arbres non parallèles et sont appelés engrenages gauches.

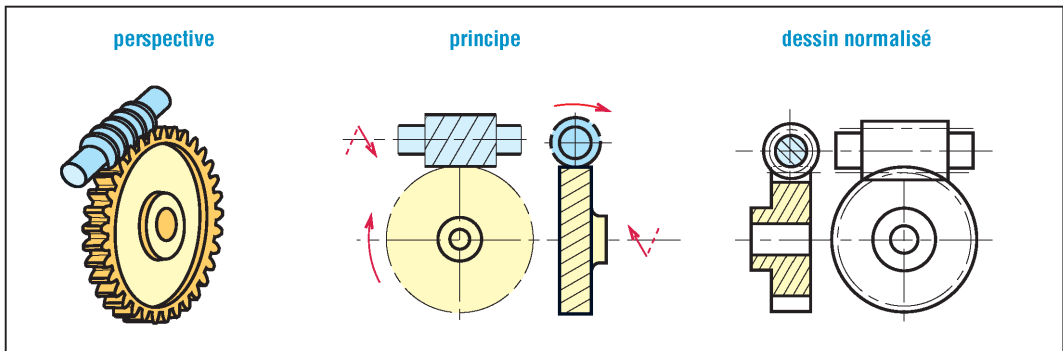
3. Engrenages coniques



3. Engrenage conique à denture droite pour arbres concourants (schéma page 608).

Leurs dents sont taillées dans des surfaces coniques. Ils sont utilisés pour transmettre le mouvement entre des arbres concourants, perpendiculaires ou non. La denture peut être droite mais aussi hélicoïdale, ou spirale.

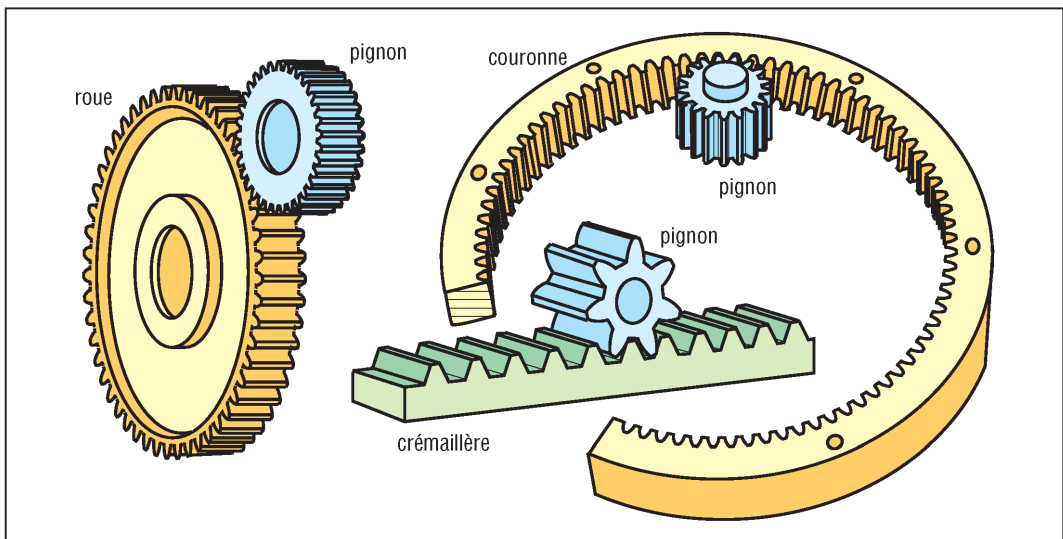
4. Engrenages roue et vis sans fin



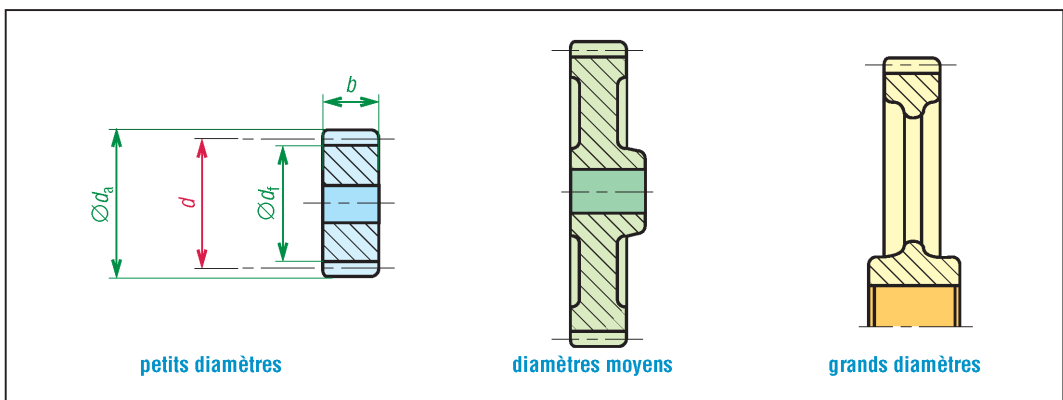
4. Engrenages roues et vis entre arbres orthogonaux (schéma page 608).

L'une des roues ressemble à une vis et l'autre à une roue hélicoïdale. Le sens de rotation de la roue dépend de celui de la vis mais aussi de l'inclinaison de la denture, filet à droite ou à gauche. L'irréversibilité est possible.

II - Engrenages droits à denture droite



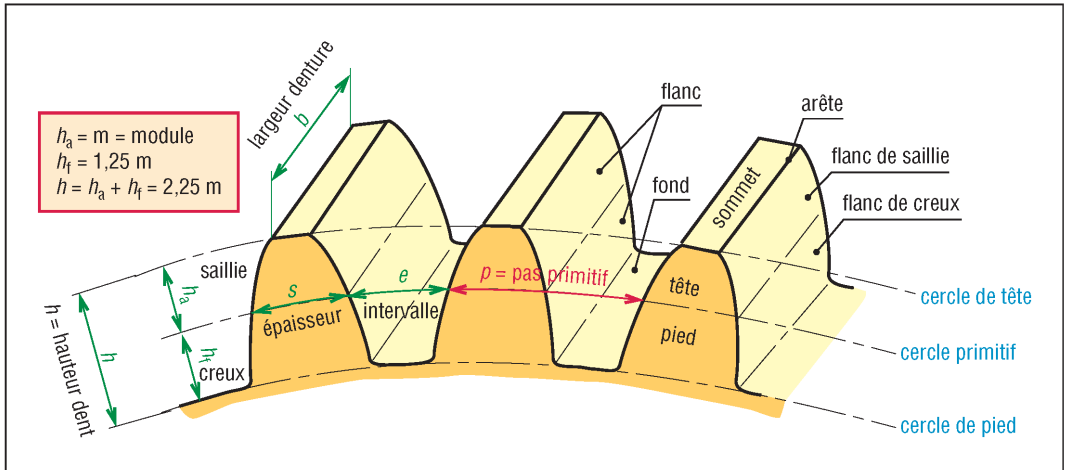
5. Différents types d'engrenages droits à dentures droites (schéma page 608).



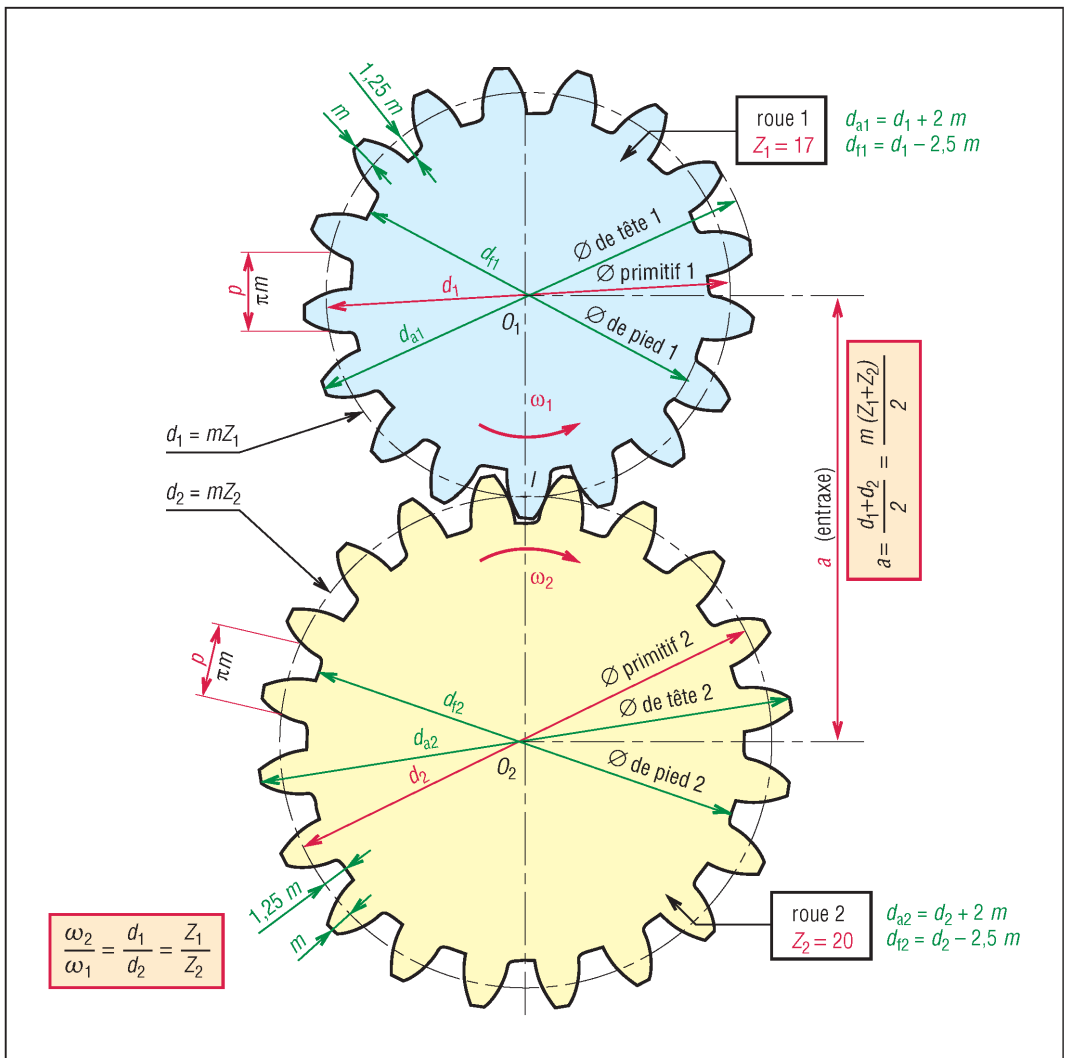
6. Différentes formes de roues dentées.

Les engrenages typiques sont pignon/roue, pignon/couronne intérieure et pignon crémaillère. Le pignon est la plus petite des deux roues ; c'est souvent la roue menante. La forme des roues varie avec les dimensions (fig. 7).

1. Définitions, terminologie et symboles normalisés ISO



7. Symboles et vocabulaire utilisés pour décrire la forme de la denture (denture normale).



8. Entraxe, diamètres, pas et m module normalisé (denture normale).

| Valeurs normalisées du module m (profil en développante) | | | | | | | | | | |
|--|--|------------------------------------|----|-------------------------------|-----|--------------------------------------|----|--|---------|---------|
| Mécanique générale – NF ISO 54 | | | | | | | | Micromécanique (horlogerie...) – NF S 80-501 | | |
| Valeurs principales en mm | | | | Valeurs secondaires (mm) | | | | Valeurs principales et secondaires (en mm) | | |
| 1,0 | 3 | 10 | 32 | 1,125 | 3,5 | 11 | 26 | 0,120 | 0,400 | 0,800 |
| 1,25 | 4 | 12 | 40 | 1,375 | 4,5 | 14 | 45 | 0,160 | 0,500 | (0,900) |
| 1,5 | 5 | 16 | 50 | 1,75 | 5,5 | 18 | | 0,200 | (0,550) | 1,00 |
| 2 | 6 | 20 | | 2,25 | 7 | 22 | | 0,250 | 0,600 | |
| 2,5 | 8 | 25 | | 2,75 | 9 | 28 | | 0,320 | (0,700) | |
| Mécanique générale | dentures en développante (denture normale) si $Z \leq 17$ dents ; dentures corrigées en dessous de 17 (voir II.5) et cas divers. | | | | | | | | | |
| Micromécanique (horlogerie...) Normes NF S 80-5** | Type de trains | Réducteurs | | Multiplicateurs | | Réducteurs et multiplicateurs | | | | |
| | Profil cycloïdal | – | | $6 \leq Z < 17$ dents | | $6 \leq Z < 17$ dents | | | | |
| | Profil en développante | $8 \leq Z < 17$: denture corrigée | | $Z \geq 17$: denture normale | | $Z \geq 17$: denture normale | | $Z \geq 17$: denture normale | | |

| Caractéristiques et formules des engrenages droits à denture droite | | |
|---|--------------|---|
| caractéristiques | symboles ISO | observations et formules usuelles |
| vitesse angulaire | ω | $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \approx 0,1n$ (unités : rad/s) |
| nombre de tours par minute | n | n_1 (roue 1) et n_2 (roue 2) |
| module | m | valeurs normalisées (tableau des modules) |
| pas primitif | p | $p = \pi m = 3,14159 m$ ($p = p_1 = p_2$) |
| nombre de dents | Z | Z_1 (roue 1) et Z_2 (roue 2) |
| rayon primitif | r | r_1 (roue 1) et r_2 (roue 2) ; $r = d/2$ |
| diamètre primitif | d | $d_1 = mZ_1$ et $d_2 = mZ_2$ |
| entraxe entre les 2 roues | a | $a = r_1 + r_2 = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m(Z_1 + Z_2)}{2}$ |
| largeur de la dent | b | $b = k \cdot m$ ($7 \leq k \leq 12$) |
| saillie | h_a | $h_a = m$ |
| creux | h_f | $h_f = 1,25m$ |
| hauteur de dent | h | $h = h_a + h_f = 2,25m$ |
| diamètre de tête | d_a | $d_a = d + 2m$ |
| rayon de tête | r_a | $r_a = r + m = d_a/2$ |
| diamètre de pied | d_f | $d_f = d - 2,5m$ |
| rayon de pied | r_f | $r_f = r - 1,25m = d_f/2$ |
| épaisseur de la dent | s | $s_1 = e_2 = s_2 = e_1 = \pi m/2$ (avec jeu nul) |
| intervalle | e | $s_1 + e_1 = s_2 + e_2 = p$ |
| angle de pression | α | valeur usuelle : $\alpha = 20^\circ$ |
| rayon de base | r_b | $r_b = d_b/2$ |
| diamètre de base | d_b | $d_b = d \cdot \cos \alpha$ |
| pas de base | p_b | $p_b = p \cdot \cos \alpha$ |

a) Circonférence primitive : de périmètre ($\pi.d$), elle doit impérativement comporter un nombre entier de dents (Z) toutes placées à intervalles successifs égaux au pas primitif (p). Il en résulte que :

$$\pi.d = p.Z = \text{périmètre circonférence primitive.}$$

En posant :

$$m = p/\pi = \text{module}$$

l'expression se simplifie et devient :

$$d = m.Z$$

| Indices normalisés utilisés | |
|-----------------------------|--------------------------|
| indice | observations |
| 1 | relatif au pignon |
| 2 | relatif à la roue |
| a | de tête |
| b | de base |
| f | de pied |
| n | réel (ou normal) |
| t | apparent (ou tangentiel) |

b) Pas primitif (p)

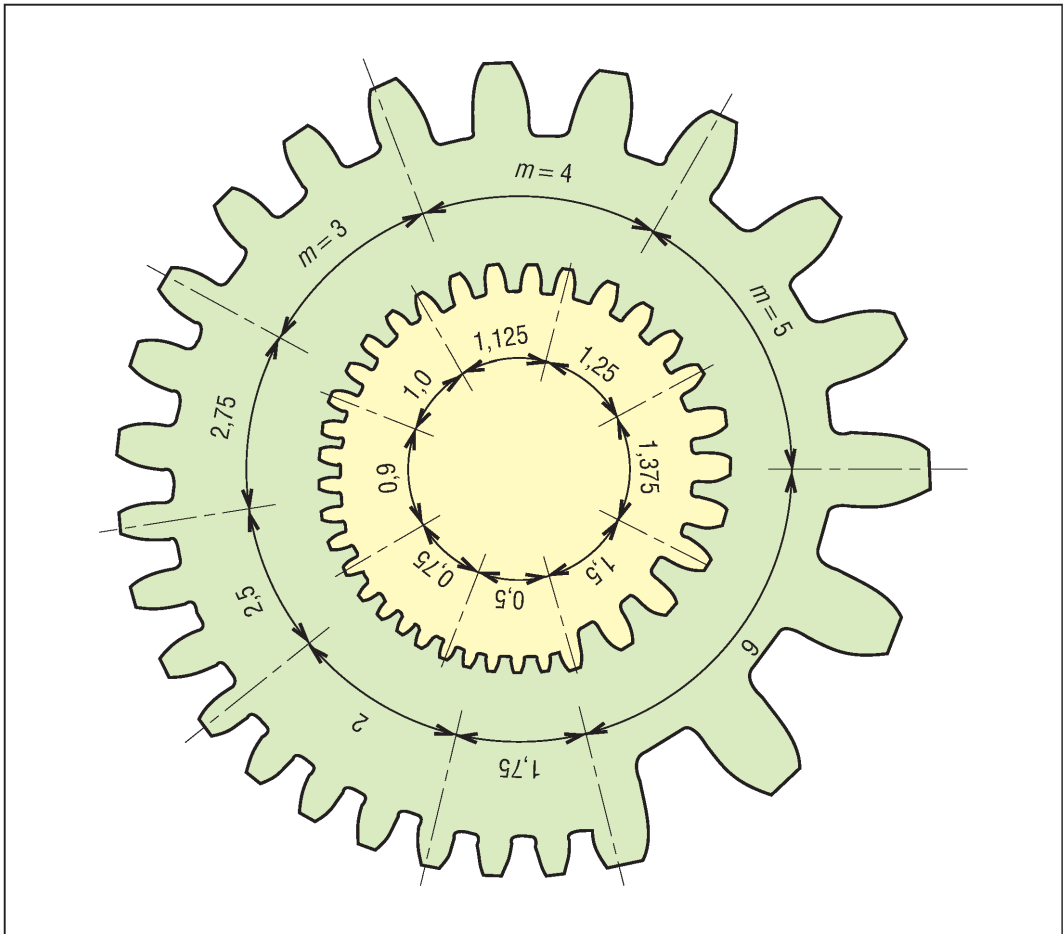
$$p = \frac{\text{circonférence primitive}}{\text{nombre de dents}} = \frac{\pi.d}{Z} = \frac{\pi.(mZ)}{Z} = \pi m = 3,141\ 59\ m$$

c) Module (m)

Quel que soit le nombre de dents, toutes les roues de même module et de même angle de pression (α) peuvent être fabriquées à partir du même outil.

Pour limiter le nombre des outils et des systèmes de mesure, une série de modules a été normalisée (tableau p. 337).

L'épaisseur de la dent et sa résistance dépendent du choix du module. Ce choix ne doit pas être improvisé mais étudié et calculé (voir chapitre 31 : efforts sur les dentures).



9. Exemples de modules (= tracés à l'échelle 1 ou en vraie grandeur).

Exemple : pour l'engrenage dessiné (fig. 8) $Z_1 = 17$ dents, $Z_2 = 20$ dents, module $m = 4$ mm, déterminons les principales caractéristiques.

Pas primitif : $p = \pi m = \pi \times 4 = 12,56$ mm

Diamètres primitifs : $d_1 = mZ_1 = 4 \times 17 = 68$ mm et $d_2 = mZ_2 = 4 \times 20 = 80$ mm

Entraxe : $a = \frac{1}{2}(d_1 + d_2) = 74$ mm

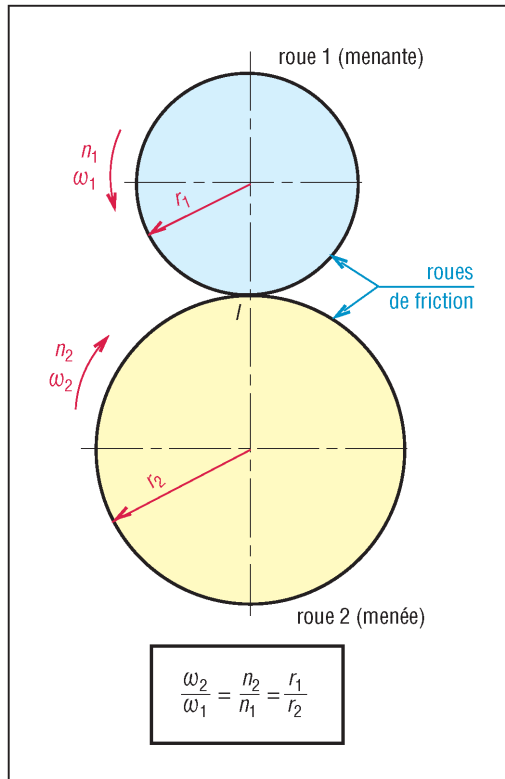
Hauteur de saillie : $ha_1 = ha_2 = m = 4$ mm

Hauteur de creux : $hf_1 = hf_2 = 1,25m = 5$ mm

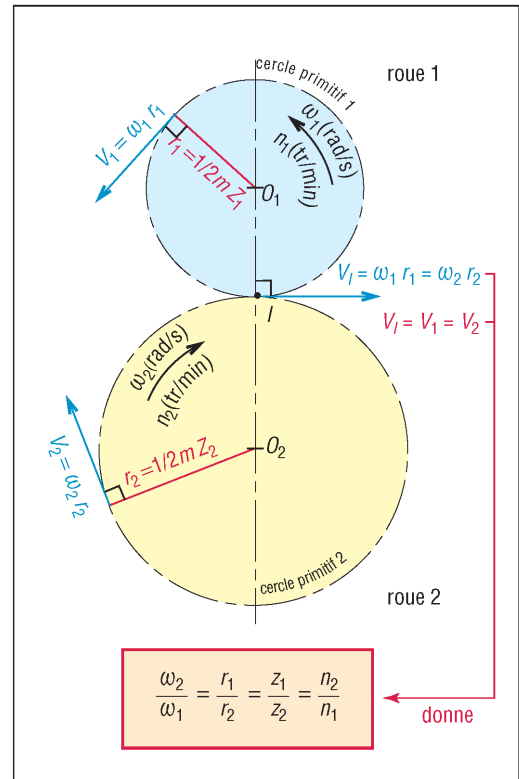
Hauteur de dent : $h_1 = h_2 = ha + hf = 9$ mm

Largeur des dents : $7m \leq b \leq 12m$ ou $28 \leq b \leq 48$ mm

2. Étude cinématique



10. Roues de friction.



11. Cas des engrenages.

Lorsque la roue 1 engrène avec la roue 2, les cercles primitifs des deux roues roulent l'un sur l'autre sans glisser au point I (pas de patinage, analogie avec deux roues de friction roulant l'une sur l'autre sans glisser).

Si V_1 est la vitesse linéaire des points du cercle primitif 1 et V_2 celle des points du cercle primitif 2, le non glissement en I , point de contact des deux cercles, se traduit par $V_1 = V_2 = V_I$.

Exemple : on souhaite construire un réducteur de façon à ce que la vitesse d'entrée de 1 500 tr/min soit réduite à 500 tr/min. Si $Z_1 = 18$, quelle est la valeur de Z_2 ? Si $m = 3$, quelle est la valeur de d_2 ?

Rapport de transmission : $n_2/n_1 = 500/1\,500 = 1/3$

Rapport des nombres de dents : $Z_2/Z_1 = n_1/n_2 = 3/1 = 3$

$Z_2 = 3.Z_1 = 54$ dents

$d_2 = mZ_2 = 3.54 = 162$ mm

Remarque :

$d_1 = mZ_1 = 3.18 = 54$ mm

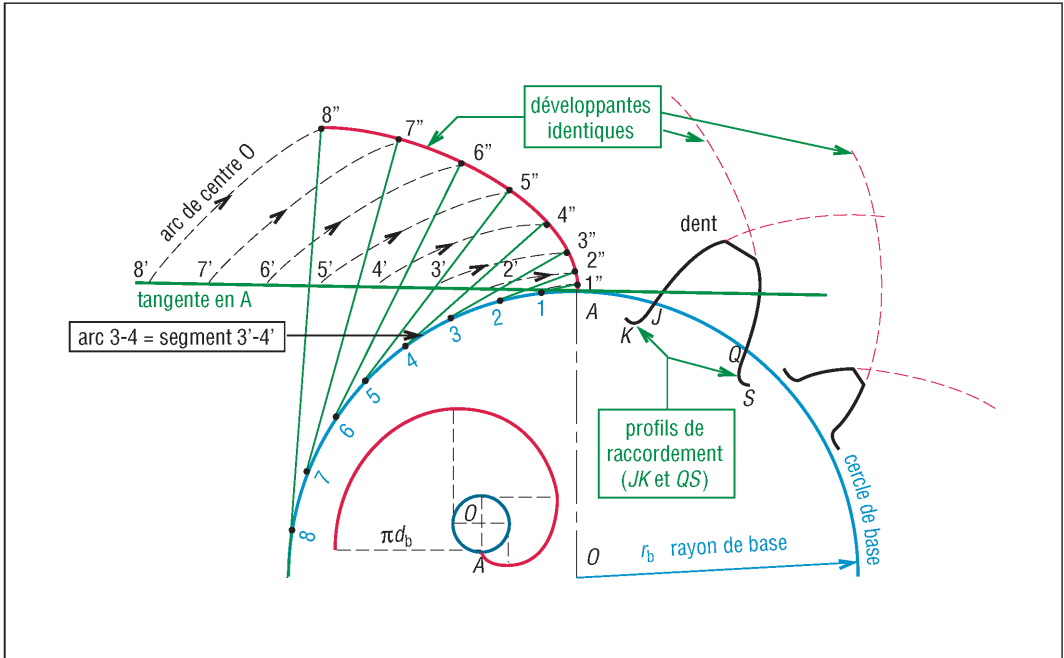
$d_2/d_1 = 162/54 = 3 = n_1/n_2$

3. Étude du profil en développante de cercle

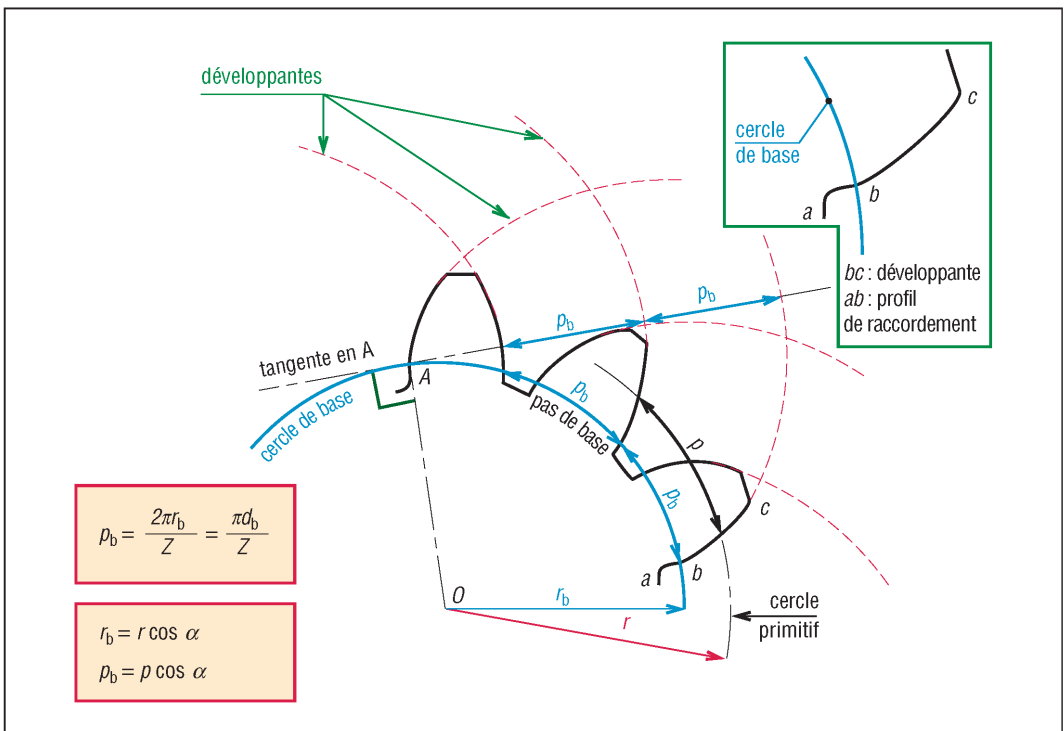
a) Développante de cercle

Le cercle qui sert de support au tracé de la développante est appelé cercle de base (rayon r_b). Les développantes tracées à partir d'un même cercle de base sont toutes géométriquement identiques ou superposables. Tracé de référence normalisé : NF ISO 53.

Les profils des flancs et faces des dents suivent rigoureusement la géométrie de la développante.



12. Développante de cercle.



13. Pas de base p_b .

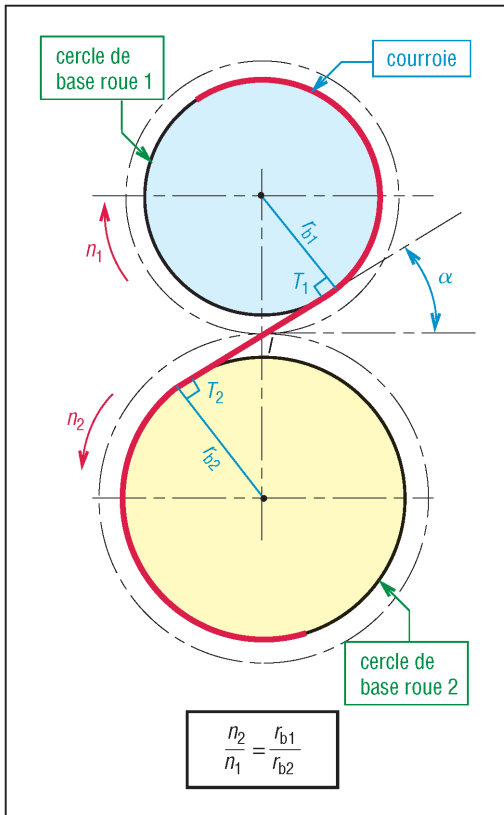
Remarque : pour la tangente au point repère 8, le segment 88'' est égal à l'arc 8A lui-même égal au segment 8'A. La remarque est la même pour les autres points.

b) Propriétés et caractéristiques du profil en développante de cercle

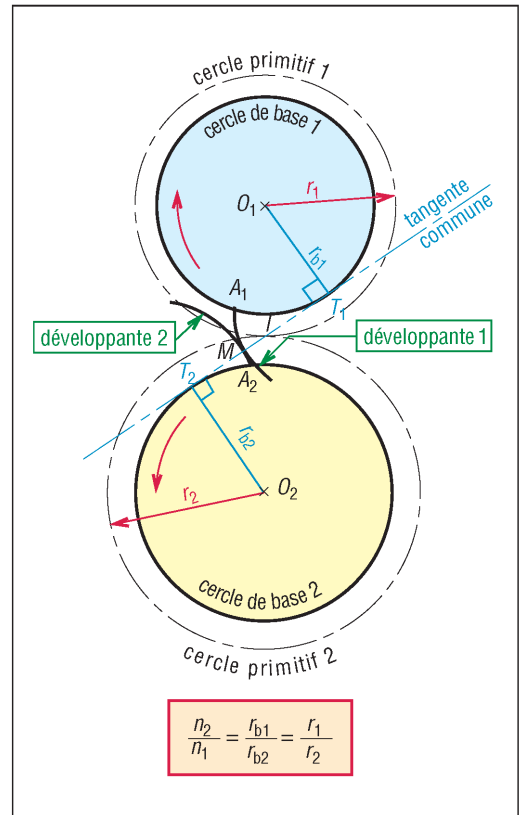
Le profil en développante de cercle est le plus utilisé ; il est insensible aux variations d'entraxes et se laisse tailler à l'aide d'outils relativement simples.

Le profil cycloïdal, également utilisé, est surtout employé en micromécanique.

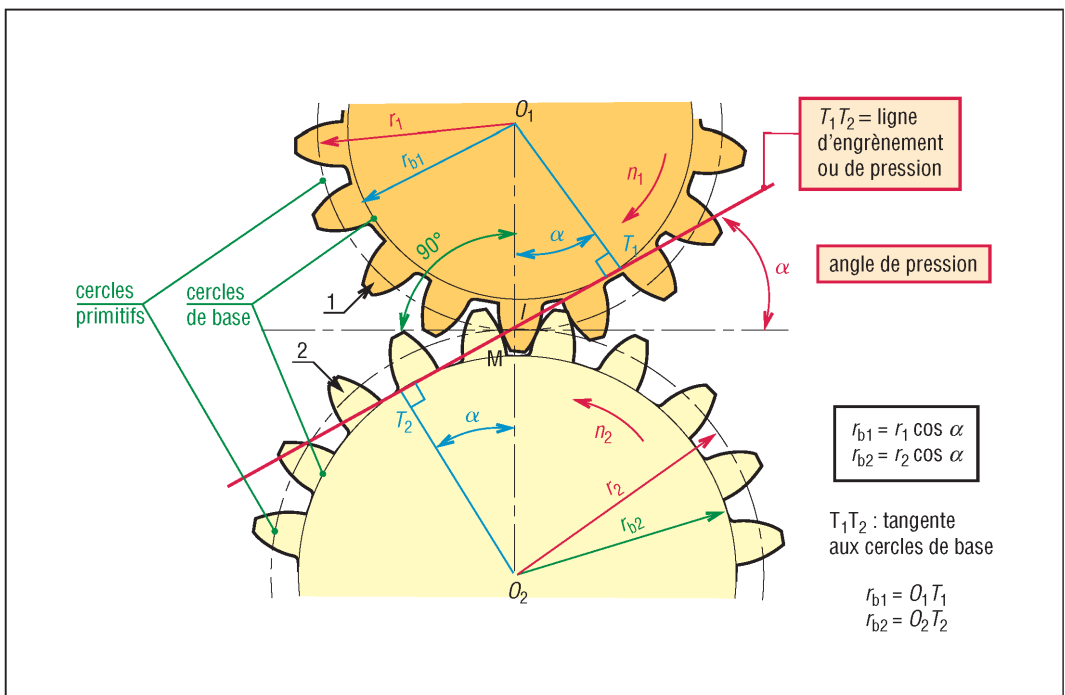
Propriété : il permet d'obtenir des roues avec de petits nombres de dents sans interférence de taillage. Inconvénient : il est sensible aux variations d'entraxes.



14. Analogie avec une transmission par courroie.



15. Cercles de base et cercles primitifs.



16. Angle de pression et ligne d'engrènement.

Profils conjugués : les profils en développante font partie des profils conjugués. Les profils conjugués sont des profils qui transmettent le mouvement d'une roue à une autre sans à-coups, de façon régulière, sans fluctuation, même infime, du rapport de l'engrenage ($n_2/n_1 = \text{constante}$).

Pas de base (p_b) : il est égal à la longueur de l'arc, mesuré sur le cercle de base, entre deux dents consécutives. C'est aussi la distance entre les profils des dents successives.

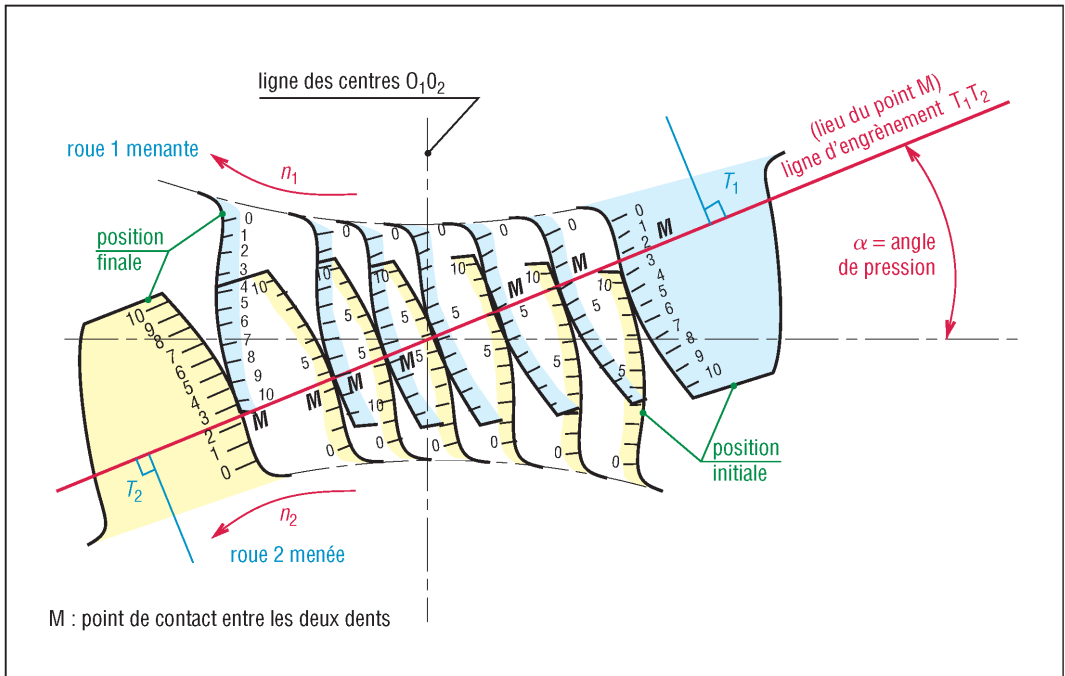
Règle : pour que deux roues puissent engrener il faut qu'elles aient le même pas de base ($p_{b1} = p_{b2}$).

Ligne d'engrènement ou ligne de pression T_1T_2 : elle est tangente aux deux cercles de base et porte en permanence l'effort de contact s'exerçant entre les deux roues.

Propriétés : le point de contact (M) entre les dents est toujours situé sur cette ligne.

La tangente en M aux deux profils en contact est toujours perpendiculaire à T_1T_2 .

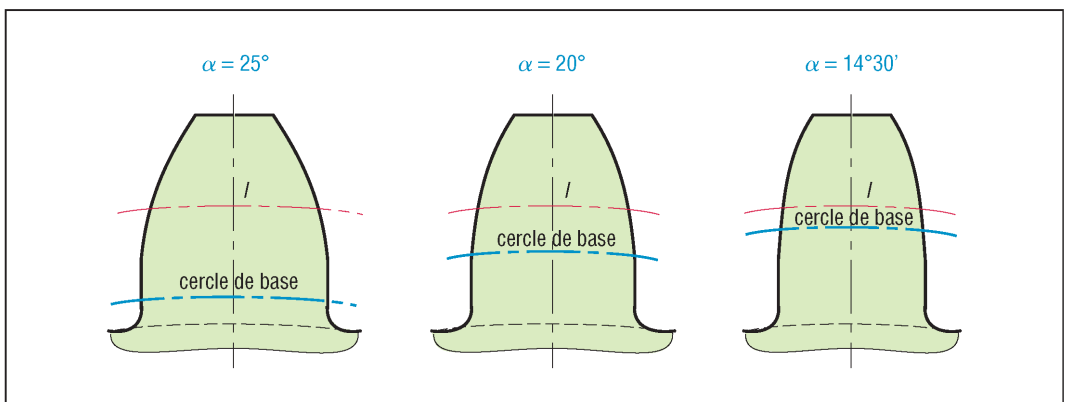
Remarque : le contact en M entre les deux dents se fait à la fois avec du roulement et du glissement.



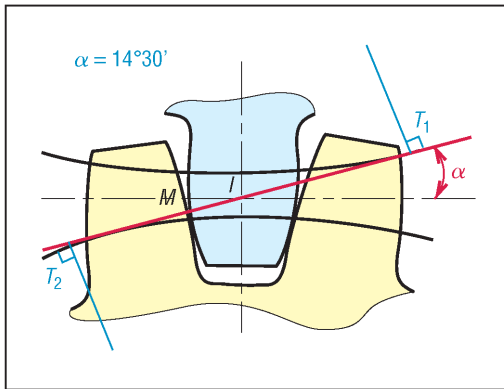
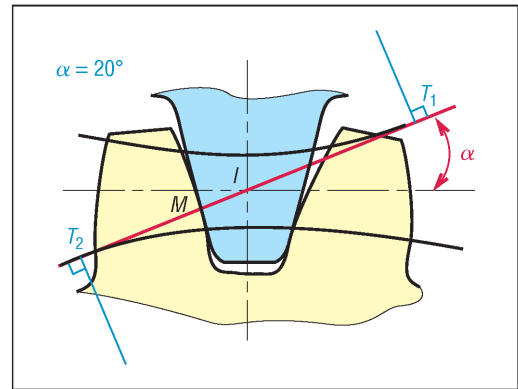
17. Positions successives de deux dents en contact au cours de l'engrènement ; glissement entre les dents.

Angle de pression (α) : autre caractéristique importante, il définit l'inclinaison de la droite de pression T_1T_2 et la forme de la dent.

$\alpha = 20^\circ$ est la valeur la plus utilisée, $\alpha = 14^\circ30'$ est utilisé en remplacement d'engrenages anciens, $\alpha = 25^\circ$ est un standard aux USA.



18. Forme de la dent en fonction de l'angle de pression.

19. Contact dans le cas d'un angle de pression de $14^{\circ}30'$.20. Contact dans le cas d'un angle de pression de 20° .

Cercles de base et cercles primitifs : pour un engrenage les cercles primitifs sont uniques. Ils définissent le rapport de la transmission.

Les cercles de base définissent le profil et la forme de la denture (la développante). À deux cercles primitifs peut correspondre, en théorie, une infinité de cercles de base et d'angles de pression possibles ; condition : $r_2/r_1 = r_{b2}/r_{b1}$.

c) Exemple : un engrenage se compose d'un pignon de 17 dents et d'une roue de 51 dents ; le module est de 2 mm et l'angle de pression de 20° .

1- Déterminons l'entraxe, les rayons de base et le pas de base.

$$d_1 = mZ_1 = 2 \times 17 = 34 \text{ mm} ;$$

$$d_2 = mZ_2 = 2 \times 51 = 102 \text{ mm}$$

$$\text{entraxe} : a = 1/2 (d_1 + d_2) = 17 + 51 = 68 \text{ mm}$$

$$r_{b1} = r_1 \cos \alpha = 17 \cos 20 = 15,97 \text{ mm}$$

$$r_{b2} = r_2 \cos \alpha = 51 \cos 20 = 47,92 \text{ mm}$$

$$p_b = p \cos \alpha = 2 \cos 20 = 1,88 \text{ mm}$$

$$\frac{r_{b1}}{r_{b2}} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{17}{51} = \frac{1}{3}$$

2- À l'assemblage on constate qu'il manque 2 mm d'entraxe pour monter les roues.

Si les rayons de base restent inchangés, quelle nouvelle valeur de l'angle de pression permettrait le montage ?

$$a' = a + 2 = 68 + 2 = 70 = r'_1 + r'_2$$

$$r'_1/r'_2 = 1/3 \quad (r'_2 = 3r'_1)$$

$$a' = r'_1 + 3r'_1 = 4r'_1 = 70$$

$$r'_1 = 70/4 = 17,5 \text{ mm} \quad (r'_2 = 52,5 \text{ mm})$$

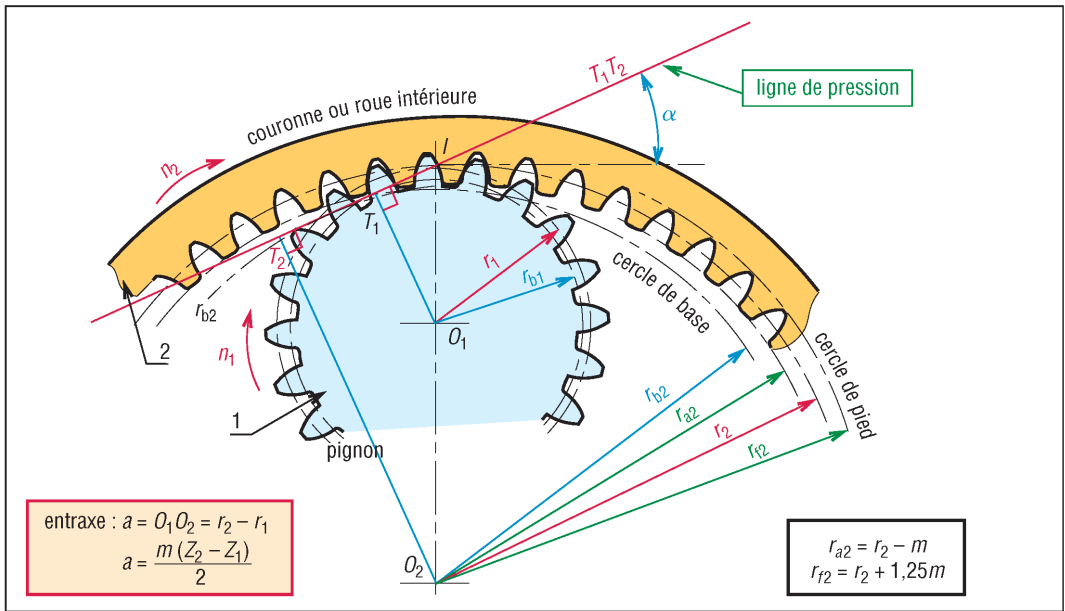
$$r_{b1} = r'_1 \cos \alpha' = 17,5 \cos \alpha' = 15,97 \text{ (question 1)}$$

$$\cos \alpha' = 15,97/17,5 = 0,913$$

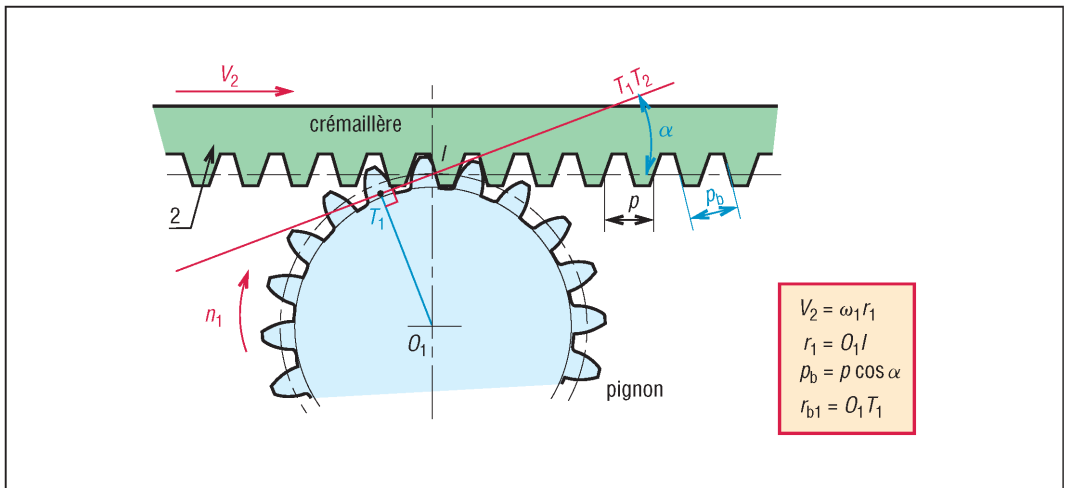
$$\alpha' = 24,13^{\circ}$$

| Évolution des diamètres de base avec $\alpha : m = 2 ; Z_1 = 17 ; Z_2 = 51$ | | | | | |
|---|--------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| α | 10° | $14^{\circ}30'$ | 20° | 25° | 30° |
| d_1 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 |
| d_2 | 102 | 102 | 102 | 102 | 102 |
| a | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 |
| d_{b1} | 33,48 | 32,92 | 31,95 | 30,81 | 29,44 |
| d_{b2} | 100,45 | 98,75 | 95,85 | 92,44 | 88,33 |

4. Cas des roues intérieures et des crémaillères



21. Cas d'un pignon et d'une roue intérieure.

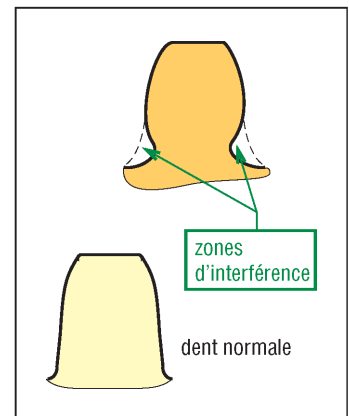


22. Cas d'un pignon et d'une crémaillère.

5. Problèmes de l'engrènement : phénomène d'interférence

Il y a interférence lorsque le sommet de la dent d'une roue rencontre le fond d'une dent de l'autre roue. Au moment du taillage, ce défaut est caractérisé par un usinage parasite du pied de la dent. D'une manière générale l'interférence est évitée si : $r_a \leq [r_b^2 + a^2 \sin^2 \alpha]^{1/2}$. Avec $\alpha = 20^\circ$, si les deux roues ont plus de 17 dents, il n'y a pas de risque d'interférence. Pour un système pignon/crémaillère l'interférence est évité si $Z_1 \geq 18$. Un nombre de dents Z_1 inférieur à 13 est à éviter.

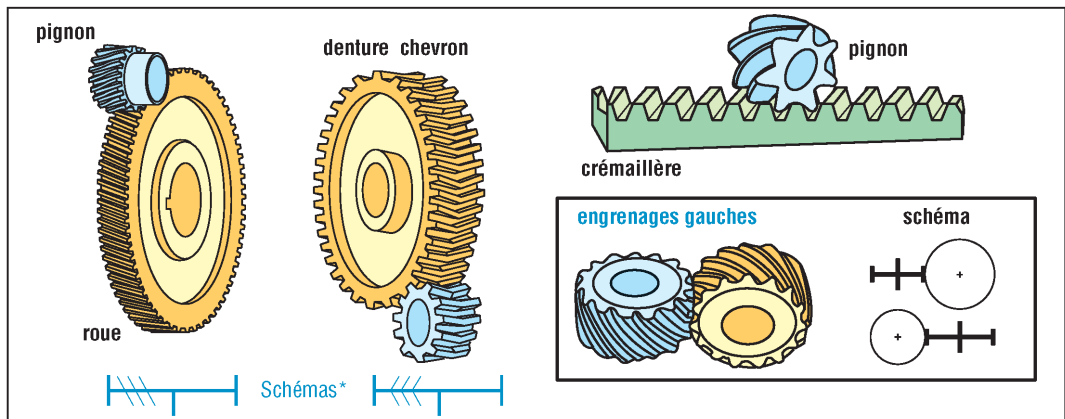
| Nombre de dents évitant le phénomène d'interférence ($\alpha = 20^\circ$) | | | | | |
|---|----|----|----|-----|------|
| nombre de dents du pignon Z_1 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| nombre maximum de dents pour la roue Z_2 | 16 | 26 | 45 | 101 | 1309 |



23. Interférence sur la forme de la dent.

III - Engrenages droits à denture hélicoïdale

Ils transmettent le mouvement entre deux arbres parallèles. L'angle d'inclinaison de la denture, l'angle d'hélice, est le même pour les deux roues, mais en sens inverse.



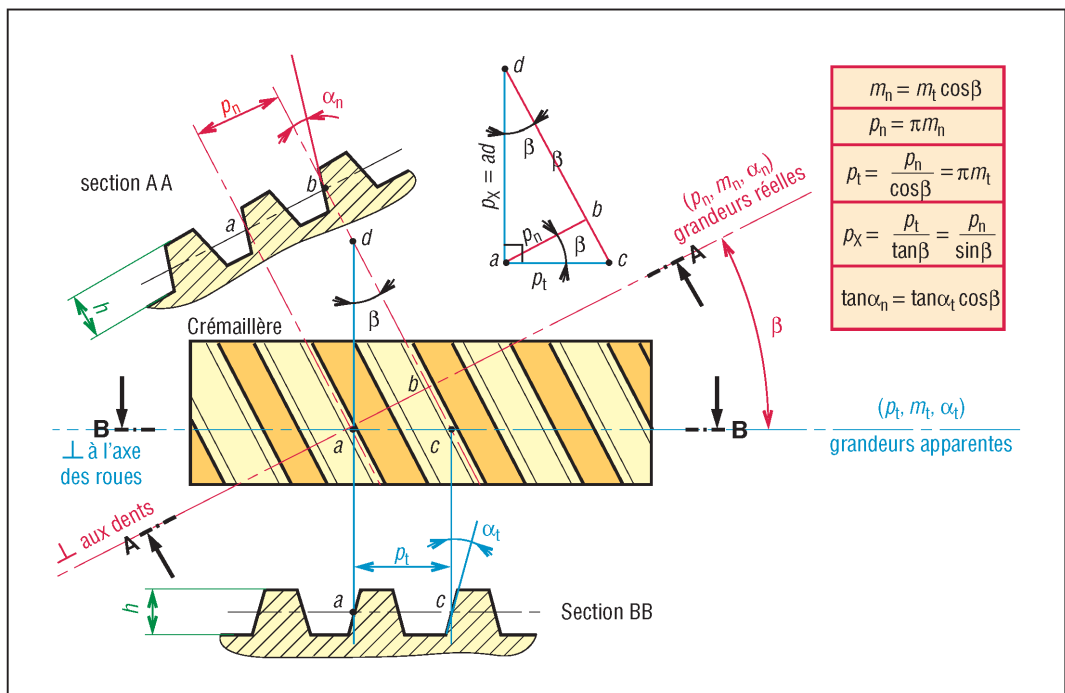
24. Différents types d'engrenages hélicoïdaux (page 608 – NF EN ISO 3952-2 ; avec indication de denture).

1. Comparaison entre dentures droites et dentures hélicoïdales

Avantages de la denture hélicoïdale : transmission plus souple, plus progressive et moins bruyante ; conduite plus grande : 2, 3 ou 4 couples de dents toujours en prise ; transmission d'efforts importants à vitesses élevées ; réalisation facile d'un entraxe imposé en faisant varier l'angle d'hélice.

Inconvénients : efforts supplémentaires dus à l'angle d'hélice (force axiale sur les paliers et augmentation des couples de flexion) et rendement un peu moins bon. L'utilisation est impossible sous forme de baladeur ; ces engrenages doivent toujours rester en prise.

2. Définitions et caractéristiques



25. Définition des principales caractéristiques à partir d'une crémaillère hélicoïdale.

| Principales caractéristiques des engrenages droits à denture hélicoïdale | | |
|--|--------------|--|
| caractéristiques | symboles ISO | observations et formules usuelles |
| angle d'hélice | β | valeurs usuelles : $15^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ |
| sens de hélice | | si la roue 1 a une hélice à droite, alors la roue 2 a une hélice à gauche |
| module réel | m_n | m_n est à choisir dans la série des modules normalisés |
| pas réel | p_n | $p_n = \pi \cdot m_n$ |
| module apparent | m_t | $m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$ (augmente avec β) |
| pas apparent | p_t | $p_t = \frac{p_n}{\cos \beta} = \pi \cdot m_t$ |
| vitesse angulaire | ω | $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \approx 0,1n$ (unités rad/s) |
| nombre de tours/minute | n | n_1 (roue 1) n_2 (roue 2) |
| nombre de dents | Z | Z_1 (roue 1) Z_2 (roue 2) |
| diamètre primitif | d | $d_1 = m_t Z_1$ et $d_2 = m_t Z_2$ |
| entraxe entre 2 roues | a | $a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m_t(Z_1 + Z_2)}{2} = \frac{m_n(Z_1 + Z_2)}{2 \cos \beta}$ |
| saillie | h_a | $h_a = m_n$ |
| creux | h_f | $h_f = 1,25 m_n$ |
| hauteur de dent | h | $h = h_a + h_f = 2,25 m_n$ |
| diamètre de tête | d_a | $d_a = d + 2m_n$ |
| diamètre de pied | d_f | $d_f = d - 2,5m_n$ |
| diamètre de base | d_b | $d_b = d \cos \alpha_t$ |
| angle de pression réel | α_n | valeur la plus usuelle : $\alpha = 20^\circ$ |
| angle de pression apparent | α_t | $\tan \alpha_n = \tan \alpha_t \cdot \cos \beta$ |
| pas de base réel | p_{bn} | $p_{bn} = p_n \cdot \cos \alpha_n$ |
| pas de base apparent | p_{bt} | $p_{bt} = p_t \cdot \cos \alpha_t$ |
| pas axial | p_x | $p_x = \frac{p_t}{\tan \beta} = \frac{p_n}{\sin \beta} = \frac{p_z}{Z}$ |
| pas de l'hélice primitive | p_z | $p_z = \frac{\pi \cdot d}{\tan \beta} = Z \cdot p_x$ |
| largeur de dent | b | $b > 2 \frac{\pi \cdot m_n}{\sin \beta} = 2 p_x$ |

Angle d'hélice β : il mesure l'inclinaison de la denture, ou de l'hélice, par rapport à l'axe de la roue ; les valeurs usuelles se situent entre 15 et 30°. De grandes valeurs de β amènent plus de douceur et de progressivité mais aussi des efforts axiaux plus grands. Un engrenage droit est un engrenage hélicoïdal avec $\beta = 0^\circ$.

Grandeurs réelles (ou normales) : p_n , m_n et $\alpha_n (=20^\circ)$.

Elles sont normalisées et mesurées perpendiculairement à l'hélice (**fig. 25**).

Grandeurs apparentes (ou tangentielles) : p_t , m_t et α_t ne sont pas normalisées et dépendent de la valeur de β . Elles sont mesurées dans le plan de rotation de la roue (analogie avec une denture droite).

Entraxe a : il dépend de l'angle β . En faisant varier β on peut obtenir n'importe quel entraxe désiré, ce qui est particulièrement intéressant pour les trains d'engrenages.

$$a = \frac{m_t (Z_1 + Z_2)}{2} = \frac{m_n (Z_1 + Z_2)}{2 \cos \beta}$$

Largeur b : pour des raisons de continuité et de progressivité la largeur b de la roue doit être supérieure au pas axial p_x ($b \geq 1,2p_x$ est nécessaire, valeurs usuelles : $b \geq 2p_x$).

Exemple :

Soit un engrenage tel que $Z_1 = 33$, $Z_2 = 44$ et $m_n = 2$ mm.

1- Quel doit être l'angle d'hélice nécessaire pour réaliser un entraxe a de 80 mm ?

$$a = \frac{m_n}{2 \cos \beta} (Z_1 + Z_2) = \frac{2}{2 \cos \beta} (33 + 44) = \frac{77}{\cos \beta} = 80 \text{ mm}$$

$$\cos \beta = \frac{77}{80} = 0,9265$$

$$\beta = 15,74^\circ$$

2- Quelles sont les valeurs possibles pour l'entraxe si β varie entre 0° et 40° ?

À partir de la formule précédente on obtient :

| β (°) | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
|---------------|----|------|------|------|------|----|------|----|-------|
| α (mm) | 77 | 77,3 | 78,2 | 79,7 | 81,9 | 85 | 88,9 | 94 | 100,5 |

Les valeurs possibles sont donc comprises entre 77 et 100,5 mm.

3- Si $\beta = 35^\circ$ et $\alpha_n = 20^\circ$, quelles sont les valeurs de m_t , p_n , p_t , p_x , d_1 et d_2 et α_t ?

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = \frac{2}{\cos 35} = 2,442 \text{ mm}$$

$$p_t = \pi \cdot m_t = \pi \times 2,44 = 7,67 \text{ mm}$$

$$p_n = \pi \cdot m_n = \pi \times 2 = 6,283 \text{ mm}$$

$$p_x = p_t / \tan \beta = 7,67 / \tan 35^\circ = 10,95 \text{ mm}$$

$$d_1 = m_t \cdot Z_1 = 2,442 \times 33 = 80,57 \text{ mm}$$

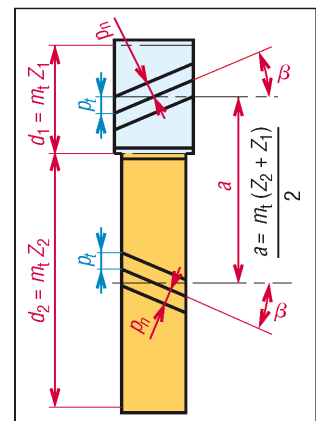
$$d_2 = m_t \cdot Z_2 = 2,442 \times 44 = 107,43 \text{ mm}$$

$$a = 1/2 (d_1 + d_2) = 1/2 (80,57 + 107,43) = 94 \text{ mm}$$

$$\tan \alpha_n = \tan \alpha_t \cdot \cos \beta$$

$$\tan \alpha_t = \tan 20^\circ / \cos 35^\circ = 0,444$$

$$\alpha_t = 23,96^\circ$$



26. $a, \beta, d_1, d_2, p_n, p_t$.

3. Nombre fictif ou virtuel de dents

Ce nombre est utilisé dans certains calculs de résistance de la dent.

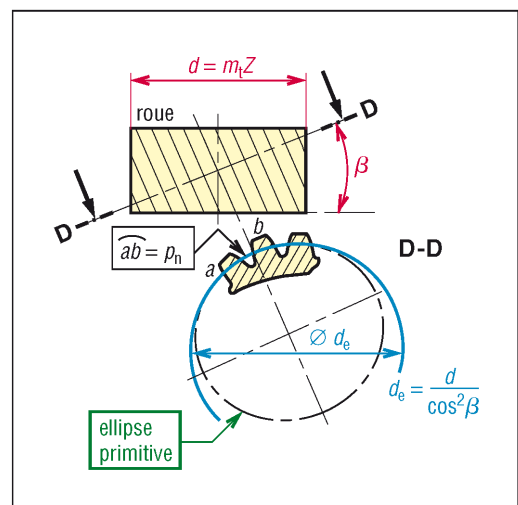
Ellipse primitive : elle est obtenue en coupant le cylindre primitif par un plan perpendiculaire à une hélice. La denture se comporte comme s'il existait un cercle primitif fictif de diamètre $d_e = d / \cos^2 \beta$.

Nombre fictif de dent Z_e : nombre de dents correspondant au diamètre fictif précédent (d_e).

$$d_e = m_n \cdot Z_e = m_t \cdot Z / \cos^2 \beta = m_n \cdot Z / (\cos \beta)^3$$

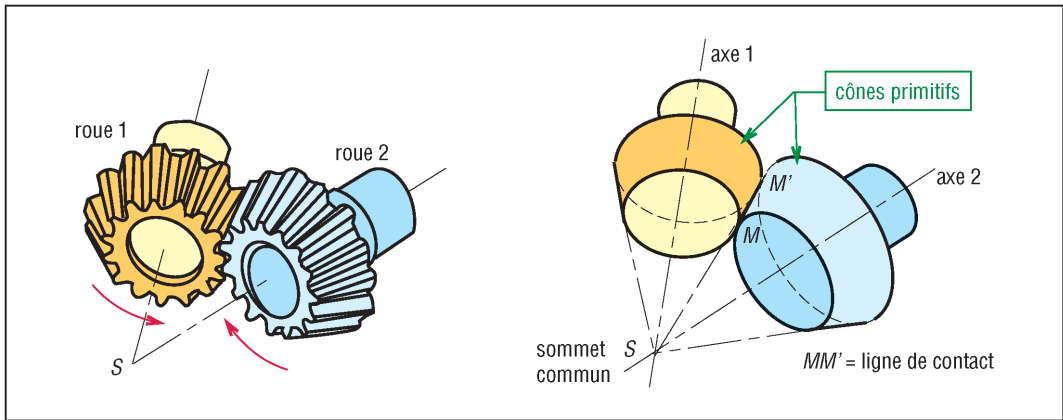
et

$$Z_e = \frac{Z}{(\cos \beta)^3}$$



27. Ellipse primitive.

IV – Engrenages coniques ou à axes concourants

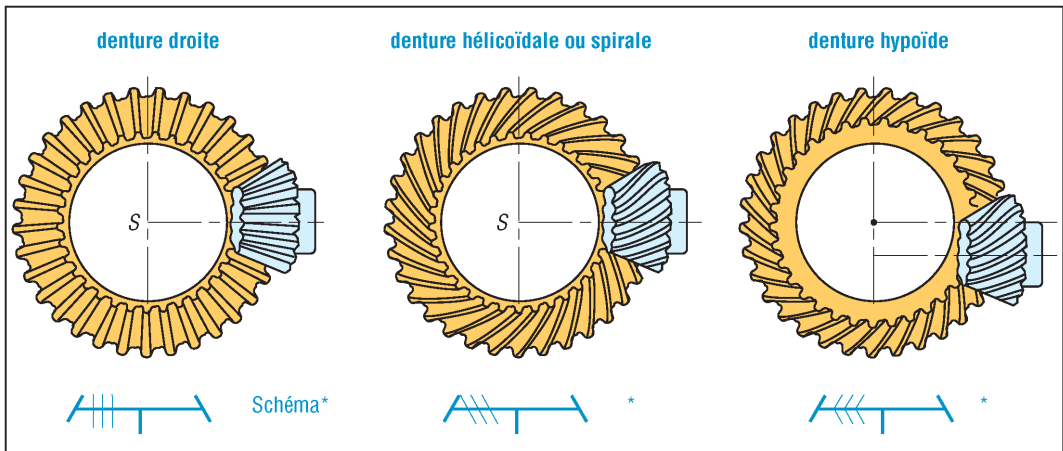


28. Engrenages coniques ou à axes concourants.

C'est un groupe important utilisé pour transmettre le mouvement entre deux arbres non parallèles dont les axes sont concourants ; les axes à 90° sont les plus courants.

Les surfaces primitives ne sont plus des cylindres mais des cônes (cônes primitifs). Les cônes sont tangents sur une ligne de contact MM' et leur sommet commun est le point S , c'est aussi le point d'intersection des axes de rotation des deux roues. Géométrie : NF ISO 23509.

1. Principaux types



29. Principaux engrenages coniques (schémas page 608 NF EN ISO 3952-2 ; * avec indication de denture).

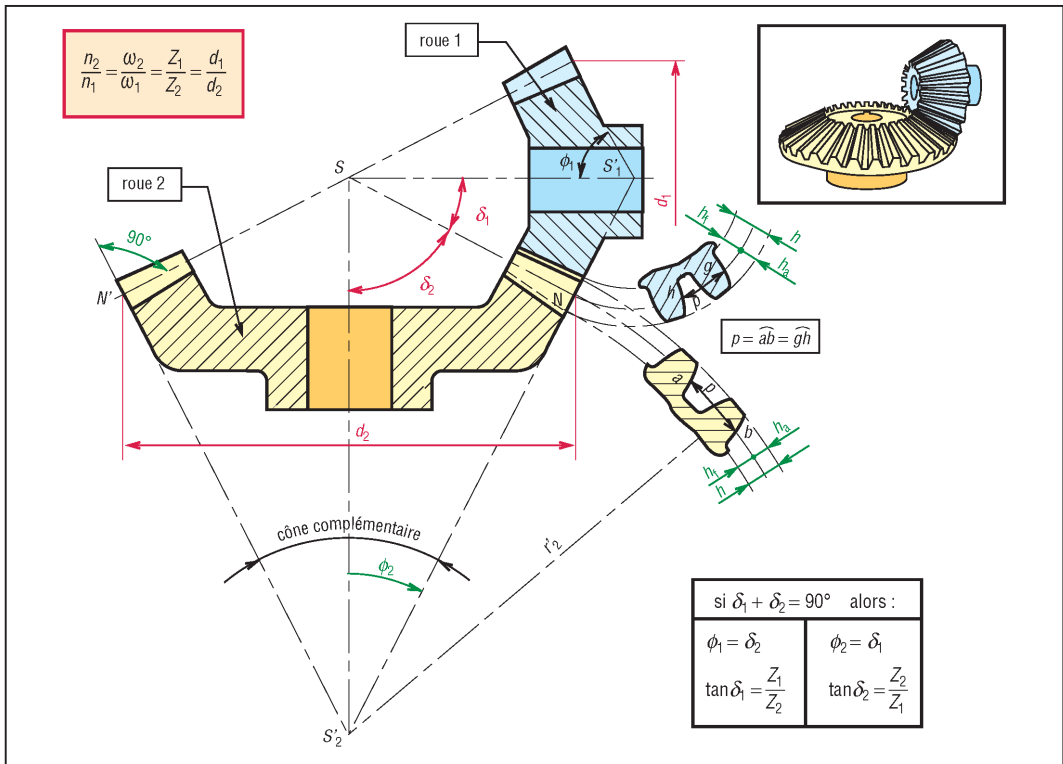
a) Engrenages coniques à denture droite : ce sont les plus simples. La direction des génératrices du profil de la denture passe par le sommet S . Aux vitesses élevées on retrouve les mêmes inconvénients que les engrenages droits à dentures droites (bruits de fonctionnement, fortes pressions sur les dents...).

b) Engrenages coniques à denture hélicoïdale ou spirale : ils sont conçus sur le même principe que les engrenages droits. Pour diminuer les bruits aux grandes vitesses et assurer une plus grande progressivité de la transmission, la denture droite est remplacée par une denture spirale (angle de pression usuel $\alpha_n = 20^\circ$ ou $14^\circ 30'$, angle de spirale 35°).

c) Engrenages hypoïdes : variante complexe des précédents, avec les mêmes qualités générales, ils sont à mi-chemin entre les engrenages coniques et les engrenages roue et vis. Les axes des roues sont orthogonaux mais non concourants, les surfaces primitives ne sont plus des cônes mais des hyperboloïdes (forme d'hyperbole). Le glissement ou le frottement entre les dents est élevé.

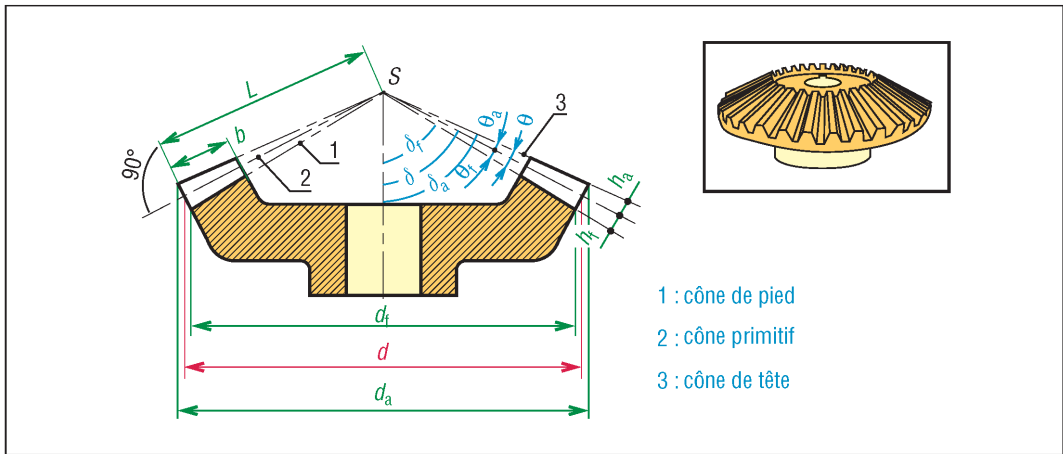
2. Caractéristiques des engrenages coniques à denture droite

La taille et la forme de la dent (module m , pas p , d , d_a , d_f , h , h_a , h_f) sont définies à partir du plus grand cercle ou sur l'extrémité la plus large de la denture.



30. Cas d'arbres perpendiculaires.

| Principales caractéristiques des engrenages coniques à denture droite (NF ISO 23509) | | |
|--|--------------|---|
| caractéristiques | symboles ISO | observations et formules usuelles |
| vitesse angulaire | ω | $\omega = (\pi \cdot n)/30 \approx 0,1n$ (unités : rad/s) |
| nombre de tours/minute | n | n_1 (roue 1) n_2 (roue 2) |
| module | m | valeurs normalisées (tableau 1) mesurée sur cône complémentaire |
| pas primitif | p | $p = \pi \cdot m = 3,141 59m$ (avec $p = p_1 = p_2$) |
| nombre de dents | z | Z_1 (roue 1) Z_2 (roue 2) |
| diamètre primitif | d | $d_1 = mZ_1$ et $d_2 = mZ_2$ |
| angle primitif | δ | δ_1 (roue 1) δ_2 (roue 2) |
| angle de pression | α | valeur usuelle $\alpha = 20$ |
| angle de cône de tête | δ_a | $\delta_a = \delta + \theta_a$ |
| angle de cône de pied | δ_f | $\delta_f = \delta - \theta_f$ |
| angle de saillie | θ_a | $\tan \theta_a = 2m \cdot \sin \delta / d$ |
| angle de creux | θ_f | $\tan \theta_f = 2,5m \cdot \sin \delta / d$ |
| angle de hauteur | θ | $\theta = \theta_a + \theta_f$ |
| longueur génératrice primitive | R_e | $L = d_1/2 \sin \delta_1 = d_2/2 \sin \delta_2 = R_e$ |
| largeur de dent | b | $L/4 \leq b \leq L/3$ (raisons de taillage) |
| saillie | h_a | $h_a = m$ |
| creux | h_f | $h_f = 1,25m$ |
| hauteur de dent | h | $h = h_a + h_f = 2,25m$ |
| diamètre de tête | d_a | $d_a = d + 2m \cdot \cos \delta$ |
| diamètre de pied | d_f | $d_f = d - 2,5m \cdot \cos \delta$ |
| $\delta_1 + \delta_2 = 90^\circ$ | | $\delta_1 + \delta_2 < 90^\circ$ |
| $\phi_1 = \delta_2$ $\phi_2 = \delta_1$ $\tan \delta_1 = Z_1/Z_2$ $\tan \delta_2 = Z_2/Z_1$ | | $\phi_1 = 90 - \delta_1$ $\phi_2 = 90 - \delta_2$ $\tan \delta_2 = \frac{\sin(\delta_1 + \delta_2)}{Z_1/Z_2 + \cos(\delta_1 + \delta_2)}$ |
| | | $\delta_1 + \delta_2 > 90^\circ$ |
| | | $\phi_1 = 90 - \delta_1$ $\phi_2 = 90 - \delta_2$ $\tan \delta_2 = \frac{\sin[180 - (\delta_1 + \delta_2)]}{Z_1/Z_2 - \cos[180 - (\delta_1 + \delta_2)]}$ |



31. Principaux paramètres des roues coniques.

Cône complémentaire : cône de sommet S' dont les génératrices ($S'_2N...$), tracées à partir de l'extrémité la plus large de la denture, sont perpendiculaires à celles du cône primitif.

Remarque : l'étude géométrique d'un engrenage conique (continuité d'engrènement, interférences, glissement...) se ramène à l'étude de l'engrenage droit complémentaire (approximation de Tredgold) de rayons primitifs r'_2, r'_1 et de nombre de dents $Z' = 2\pi r'/p$.

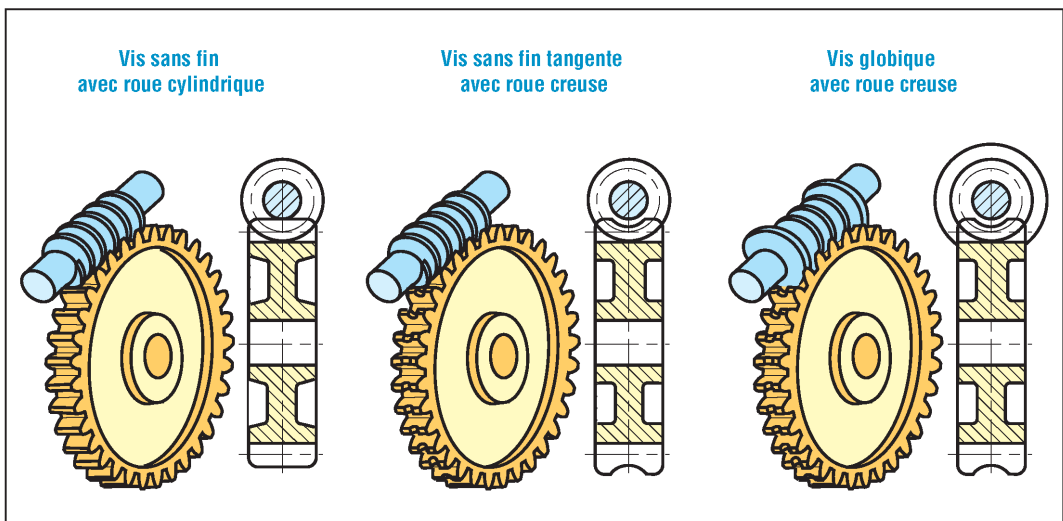
V - Engrenages roues et vis sans fin

La vis ressemble à une vis d'un système vis/écrou et la roue à une roue droite à denture hélicoïdale. La transmission de mouvement est effectuée entre deux arbres orthogonaux.

Ces engrenages permettent de grands rapports de réduction (jusqu'à 1/200) et offrent des possibilités d'irréversibilité. Vocabulaire : NF EN ISO 112-2.

Ils donnent l'engrènement le plus doux de tous les engrenages, silencieux et sans chocs. Contrepartie : un glissement et un frottement important provoquent un rendement médiocre. De ce fait, une bonne lubrification est indispensable ainsi que des couples de matériaux à faible frottement (exemple : vis acier avec roue en bronze).

1. Principales familles



32. Principaux engrenages roue et vis (Schémas page 608).

| Principales caractéristiques des engrenages roue et vis | | |
|---|--------------|---|
| caractéristiques | symboles ISO | observations et formules usuelles |
| nombre de filets vis | Z_V | |
| nombre de dents roue | Z_R | $Z_R + Z_V > 40$ |
| angle d'hélice vis | β_V | irréversibilité si $\beta_V < 6^\circ$ à 10° |
| angle d'hélice roue | β_R | $\beta_V + \beta_R = 90^\circ$ |
| sens des hélices | | le sens (à droite ou à gauche) est le même pour la vis et la roue |
| module réel roue | m_n | m_n (le même pour la vis et la roue) |
| module axial vis | m_x | $m_x = \frac{p_x}{\pi} = \frac{m_n}{\cos \beta_R} = \frac{m_n}{\sin \beta_V}$ |
| pas réel roue | p_n | $p_n = \pi \cdot m_n$ |
| pas apparent roue | p_t | $p_t = \frac{p_n}{\cos \beta_R} = \pi \cdot m_t$ |
| pas axial vis | p_x | $p_x = p_t$ (pas axial vis = pas apparent roue) |
| pas de l'hélice | p_z | $p_z = Z_V \cdot p_x$ |
| vitesse angulaire | ω | $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \approx 0,1n$ (unités rad/s) |
| nombre de tours/minute | n | n_V vis et n_R roue |
| diamètre primitif roue | d_R | $d_R = m_t \cdot Z_R$ |
| diamètre primitif vis | d_V | $d_V = \frac{p_z}{\pi \tan \beta_R}$ et $\frac{a^{0,875}}{3} \leq d_V \leq \frac{a^{0,875}}{1,7}$ |
| entraxe entre 2 roues | a | $a = \frac{d_V + d_R}{2}$ |
| saillie | h_a | $h_a = m_n$ |
| creux | h_f | $h_f = 1,25 m_n$ |
| hauteur de dent | h | $h = h_a + h_f$ |
| diamètre de tête vis | d_{aV} | $d_{aV} = d_V + 2m_n$ |
| diamètre de pied vis | d_{fV} | $d_{fV} = d_V - 2,5m_n$ |
| angle de pression réel | α_n | commun à la vis et à la roue valeur : $14^\circ 30'$, 20° , 25° et 30° |
| angle de pression axial vis | α_x | $\alpha_x = \alpha_t$ (roue) |
| longueur de la vis | L | $L \approx 5p_x$ ou $6p_x$ |

Remarque : une roue creuse est une roue cylindrique légèrement creusée, ce qui accroît la surface de contact entre les dents et permet d'augmenter les efforts transmissibles. Le principe est le même avec la vis globique (assemblage plus difficile).

2. Caractéristiques cinématiques et géométriques

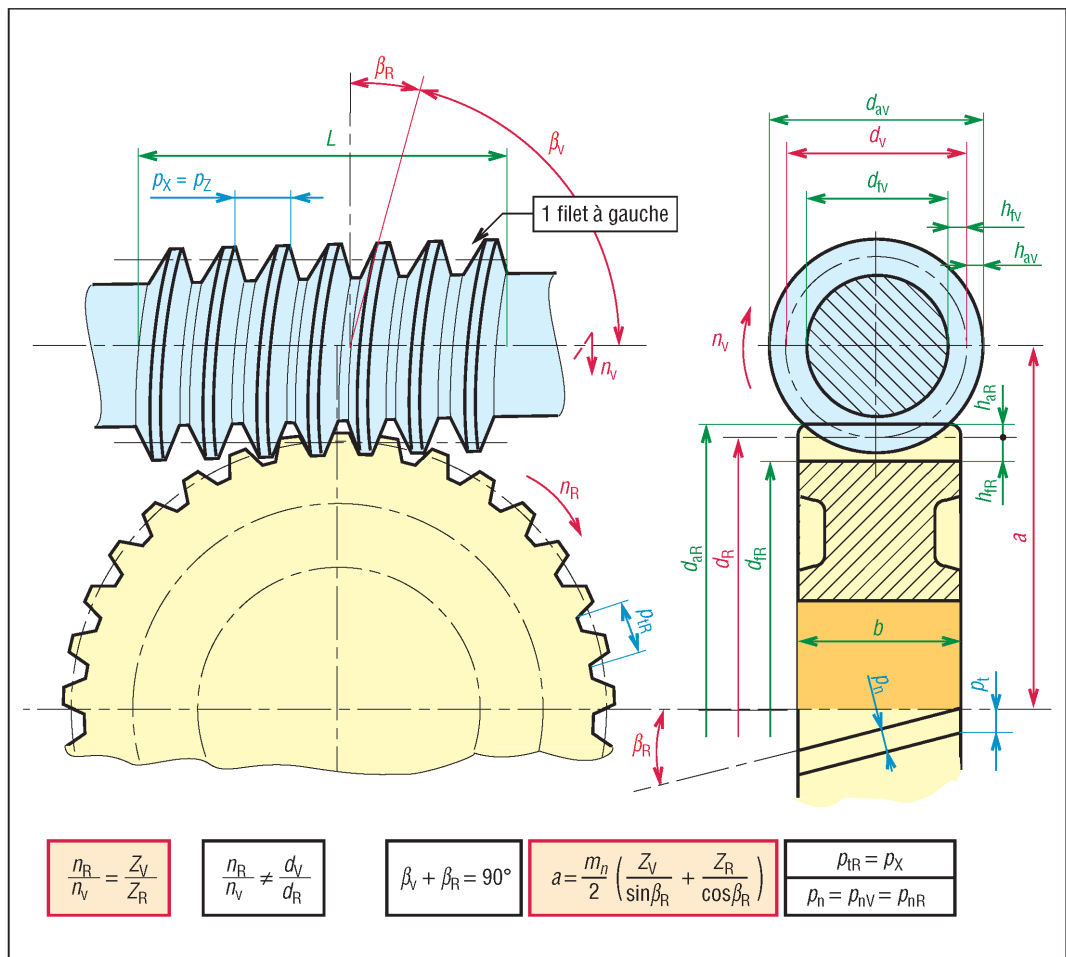
Particularité : le rapport des nombres de dents est différent du rapport des diamètres primitifs comme pour les engrenages hypoides.

Les caractéristiques de la roue sont celles d'une roue droite à denture hélicoïdale (paragraphe III). Z_v représente le nombre de filets de la vis (de 1 à 8 filets et parfois plus).

Le pas axial p_x mesure la distance (suivant l'axe) entre deux filets consécutifs de la vis.

Le pas de l'hélice p_z représente le pas du filet, ou d'un des filets, de la vis ($p_z = Z_v \cdot p_x$ et $\tan \beta_R = p_z / \pi d_v$).

La vis et la roue ont même pas normal p_n . Le pas axial de la vis est égal au pas apparent de la roue ($p_x = p_t R$). Voir aussi géométrie des profils : FD ISO/TR 10828.

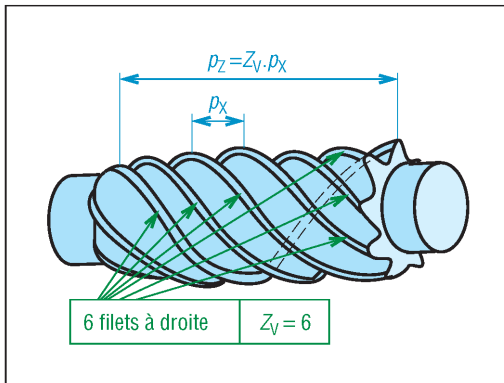


33. Principaux paramètres du système roue et vis.

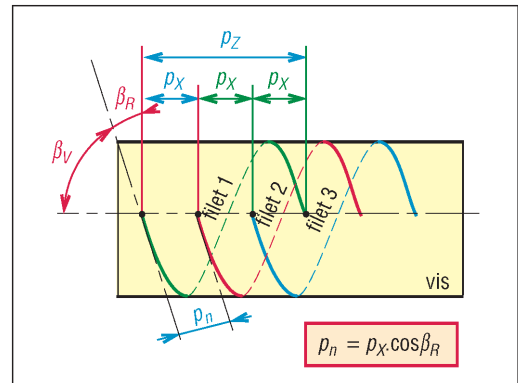
3. Irréversibilité du système roue et vis

Si la vis peut toujours entraîner la roue, par contre l'inverse n'est pas toujours possible. Lorsque l'angle d'inclinaison de l'hélice β_R est suffisamment petit (moins de 6 à 10°) le système devient irréversible et la roue ne peut pas entraîner la vis, il y a blocage en position. Cette propriété est intéressante pour des dispositifs exigeant un non retour.

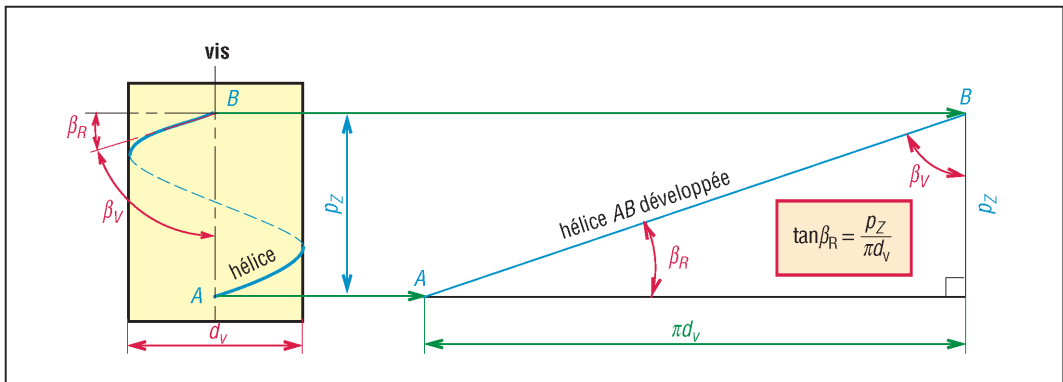
Ce phénomène est comparable à l'irréversibilité du système vis écrou. Les engrenages roue et vis sont les seuls à posséder cette propriété.



34. Cas d'une vis à six filets.



35. Position des filets dans le cas d'une vis à trois filets.



36. Développement de l'hélice.

VI - Qualité des engrenages, NF ISO 1328-1 et 2

La norme ISO prévoit 13 classes de qualité (0 à 12) pour les dentures, 0 est la plus précise et 12 la moins précise (progression de $\sqrt{2}$ entre classes). La norme donne les définitions, règles, formules, domaines de validité et les valeurs admissibles des écarts sous formes de tables de valeurs (idem ajustements). Écarts concernés : pas, division, profil, hélice, composés radiaux et faux rond. Engrenages coniques NF ISO 17485 ; usures défauts NF ISO 10825.

Exemple de désignation : 8-af (af = précision courante, df = bonne précision, etc. définissant la tolérance d'épaisseur de la dent). Voir norme NF E 23-006.

Domaines d'emplois indicatifs :

Classes 1 à 4 : pour denture de précision exceptionnelle ou pour grandes vitesses ($V > 30$ m/s). Engrenages étalons, turbines...

Classes 5 et 6 : denture rectifiée ou rasée, $R_a < 0,2$ ou $0,4 \mu\text{m}$. Pour engrenages sous vitesses élevées ($V < 20$ m/s). Machines outils, appareils de mesure, turbines, automobiles...

Classe 7 : cas de denture taillée par fraise mère et rectifiée, $R_a = 0,8$ à $3,2 \mu\text{m}$, $V < 10$ m/s. Bonne qualité en mécanique générale : manutention, automobiles, machines outils, machines de bureau...

Classes 8 et 9 : qualité courante pour roues trempées non rectifiées, $R_a = 3,2 \mu\text{m}$, $V < 7$ m/s.

Classe 10 : procédés usuels et aussi extrusion, filage, frittage, moulage par injection pour engrenages en plastique...

Classes 11 et 12 : engrenages lents ($V < 2$ m/s) et engrenages à gros modules.

VII - Exercices

Exercice 1

Soit un engrenage droit à denture droite, pas primitif 6,28 mm (2π), angle de pression 20° , nombre de dents de la roue 80, rapport de transmission 0,25. Déterminer le nombre de dent du pignon, le module et l'entraxe a .

Exercice 2

Soit un engrenage droit à denture droite, $m = 3$, entraxe approximatif 150 mm, $n_2/n_1 = 0,25$. Déterminer les nombres de dents des deux roues.

Exercice 3

Un pignon de 17 dents (engrenage droit à denture droite) ayant un module de 4 mm tourne à 1 000 tr/min. La roue menée possède 68 dents. Calculer la vitesse de la roue, le pas et l'entraxe.

Exercice 4

Une roue droite à denture droite à 30 dents, un module de 4 mm, un angle de pression de 20° . Déterminer le diamètre primitif, le diamètre de base, la hauteur de la dent, les hauteurs de saillie et de creux.

Exercice 5

Un pignon d'engrenage droit à denture droite de 18 dents, de module 8 mm et d'angle de pression 20° engrène avec une roue de 30 dents. Déterminer le pas primitif, l'entraxe et pour chaque roue : d , d_b , h , h_a , h_f . Faire un dessin à l'échelle montrant une dent de chaque roue.

Exercice 6

Un pignon droit à denture hélicoïdale de 18 dents engrène avec une roue de 36 dents, l'angle d'hélice de la denture est de 30° (hélice à droite), l'angle de pression normal de 20° et le module normal de 4 mm. Déterminer le pas normal, le pas apparent, le pas axial, les diamètres primitifs, l'angle de pression apparent, les hauteurs de saillie et de creux.

Exercice 7

Un engrenage droit à denture hélicoïdale se compose d'un pignon de 18 dents engrénant avec une roue de 54 dents. Le module normal est de 5 mm. Déterminer les valeurs possibles de l'entraxe (a) si l'angle d'inclinaison de la denture (β) varie entre 0 et 40° . Tracer le graphe $a = f(\beta)$.

Exercice 8

Un engrenage droit à denture hélicoïdale se compose d'un pignon de 20 dents engrénant avec une roue de 60 dents. L'angle de pression normal est de 20° , le module normal de 4 mm et l'entraxe de 360 mm. Déterminer l'angle de l'hélice, le pas normal, le pas apparent, le pas axial, le module apparent et l'angle de pression apparent.

Exercice 9

Un engrenage conique à denture droite à un pignon de 18 dents engrénant avec une roue de 54 dents. Le module est de 4 mm, l'angle de pression de 20° et les deux arbres sont perpendiculaires. Déterminer le pas primitif, les angles des deux cônes primitifs, les diamètres primitifs, les longueurs des cônes primitifs.

Exercice 10

Une vis à trois filets a un diamètre primitif de 100 mm, un pas axial de 20 mm. Déterminer l'angle d'inclinaison β .

Exercice 11

Une vis à deux filets a un angle d'inclinaison β de 20° pour un pas de 30 mm. Déterminer le diamètre primitif de la vis.

30

TRAINS D'ENGRENAGES

OBJECTIFS

- Donner des recommandations pour la conception.
- Indiquer la schématisation normalisée.
- Fournir des éléments pour le calcul des trains classiques et des trains épicycloïdaux.
- Proposer des exercices d'application.

Les trains d'engrenages sont utilisés dans une grande quantité de machines et mécanismes divers. Les engrenages cylindriques sont les plus courants, les engrenages coniques réalisent la transmission entre arbres concourants. Les engrenages roue et vis permettent l'irréversibilité et une grande réduction avec un seul couple de roues (leur faible rendement les écarte des grandes puissances).

Les dentures droites sont employées dans les petits appareils et avec les engrenages intérieurs. Elles sont fréquentes avec les trains épicycloïdaux.

Les dentures hélicoïdales, plus silencieuses sont les plus utilisées lorsqu'il s'agit de transmettre de la puissance. Voir aussi FD ISO/TR 13593.

I - Recommandations constructives (cas des transmissions de puissance)

En transmission de puissance les dentures durcies superficiellement par cémentation ou nitruration sont de loin les plus performantes.

Le graissage et les vibrations sont les principaux problèmes posés par les grandes vitesses.

Les carters ou bâtis doivent être aussi rigides que possibles (alliages légers ou fonte grise FGL pour les petites puissances, fonte GS ou acier moulé pour les fortes puissances et construction soudée pour les grandes tailles).

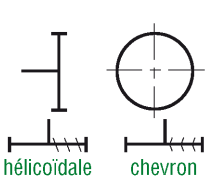
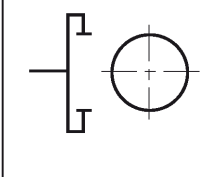
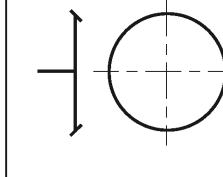
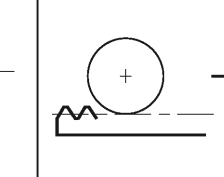
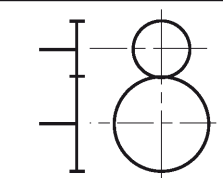
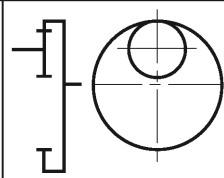
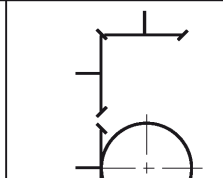
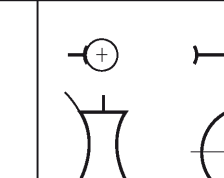
Les paliers sont généralement à roulements.

Afin de réduire l'encombrement et économiser la matière on limite le rapport de transmission d'un même couple de roue ($1/8 \leq Z_1/Z_2 \leq 8$). Au-delà de ces valeurs, il est souvent préférable d'utiliser deux couples de roues ou plus.

Dans la plupart des applications, les trains fonctionnent en réducteur (réduisent la vitesse et augmentent le couple).

II - Schématisations

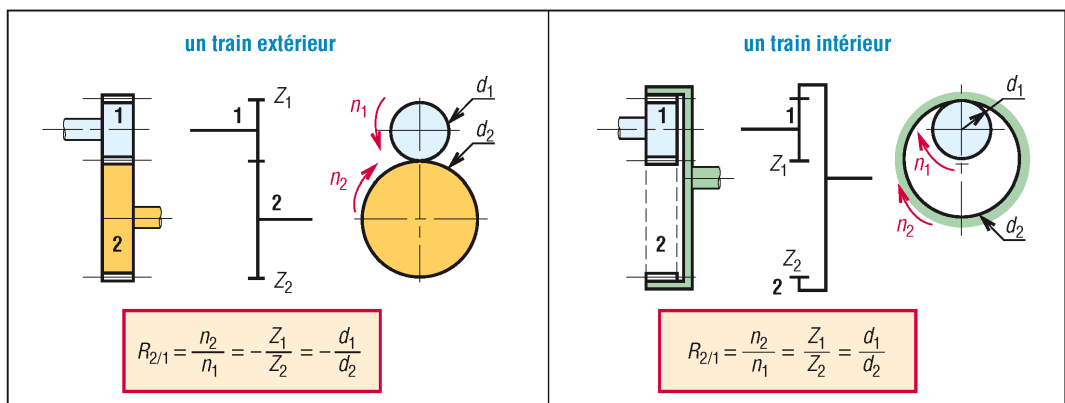
La normalisation indiquée ci-dessous permet de représenter schématiquement les engrenages et les chaînes cinématiques usuelles.

| Schémas cinématiques (normalisation) | | | |
|---|---|---|--|
|  |  |  |  |
| roue extérieure | roue intérieure | roue conique | roue et crémaillère |
|  |  |  |  |
| denture extérieure | denture intérieure | spirale | à vis globique roue creuse vis tangente |
| engrenages droits | | engrenages coniques | roue et vis sans fin |

1. Schémas cinématiques des différents types d'engrenages. Voir également page 576.

III - Étude des trains classiques

1. Trains à un engrenage



2. Train à un engrenage : deux roues extérieures et cas d'une roue intérieure.

Il y a un couple de roues, le rapport de transmission ($R_{2/1}$) est égal au rapport inverse des nombres de dents. Le signe moins (cas de roues extérieures) indique une inversion du sens de rotation entre l'entrée et la sortie.

Exemple 1 : $n_1 = 1\,500$ tr/min, $Z_1 = 15$, $Z_2 = 30$ dents, dentures droites extérieures.

$$R_{2/1} = \frac{n_2}{n_1} = -\frac{Z_1}{Z_2} = -\frac{15}{30} = -0,5$$

$$n_2 = n_1 \cdot R_{2/1} = 1\,500 \cdot (-0,5) \\ = -750 \text{ tr/min}$$

2. Trains à deux engrenages

Il y a deux couples de roues en série. Le rapport de transmission est égal au produit des rapports de transmission de chacun des deux couples de roues.

Exemple 2 : ajoutons en série le couple de roues extérieures $Z_3 = 17$ et $Z_4 = 51$ dents au train de l'exemple 1.

En remarquant que $n_I = n_2 = n_3$:

$$\begin{aligned} R_{4/1} &= \frac{n_4}{n_1} = \frac{n_4}{n_I} \cdot \frac{n_I}{n_1} = \frac{n_4}{n_3} \cdot \frac{n_2}{n_1} \\ &= \left(-\frac{Z_3}{Z_4} \right) \cdot \left(-\frac{Z_1}{Z_2} \right) \\ &= \frac{Z_3 \cdot Z_1}{Z_4 \cdot Z_2} = \frac{17 \times 15}{51 \times 30} \\ &= \frac{1}{3 \times 2} = \frac{1}{6} \end{aligned}$$

$$n_4 = n_1 \cdot R_{4/1} = 1\,500/6 = 250 \text{ tr/min}$$

Remarque : $R_{4/1} = R_{4/3} \cdot R_{2/1} = (-Z_3/Z_4) \cdot (-1/2) = (-1/2) \cdot (-1/3) = 1/6$

3. Trains à deux engrenages plus roue d'inversion

Si on intercale une roue supplémentaire 5, entre 3 et 4, au train du paragraphe précédent, la roue introduite modifie le sens de rotation final sans modifier le rapport global de la transmission.

Le nombre de dents de la roue d'inversion n'a aucune importance.

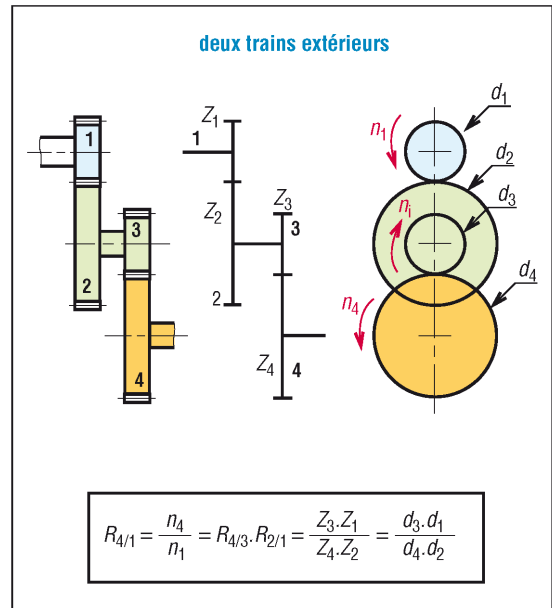
Remarque : cette roue peut aussi être intercalée entre 1 et 2 (même résultat).

Exemple 3 : intercalons une roue 5 de 20 dents dans le train de l'exemple 2.

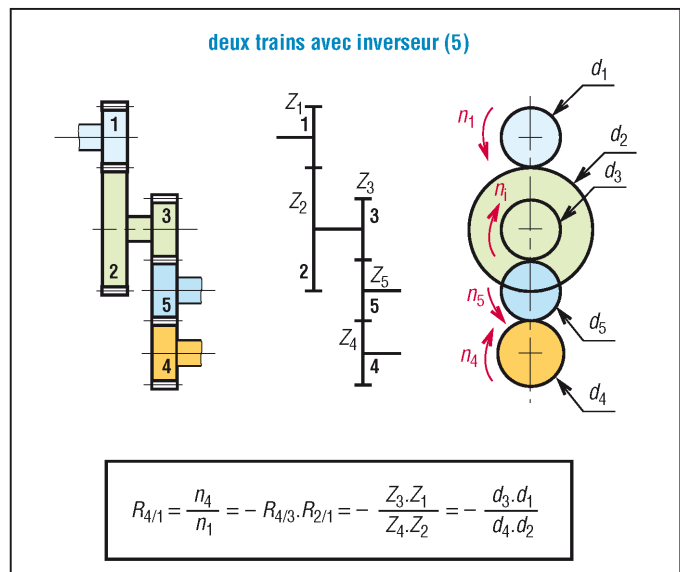
$$\begin{aligned} R_{4/1} &= \frac{n_4}{n_1} = \frac{n_4}{n_5} \cdot \frac{n_5}{n_3} \cdot \frac{n_2}{n_1} \\ &= \left(-\frac{Z_5}{Z_4} \right) \cdot \left(-\frac{Z_3}{Z_5} \right) \cdot \left(-\frac{Z_1}{Z_2} \right) \\ &= (-1)^3 \cdot \frac{Z_5 \cdot Z_3 \cdot Z_1}{Z_4 \cdot Z_5 \cdot Z_2} \\ &= -\frac{Z_3 \cdot Z_1}{Z_4 \cdot Z_2} \\ &= -\frac{1}{6} \end{aligned}$$

Z_5 est éliminé des calculs par simplification et n'intervient pas sur le résultat.

$$n_4 = n_1 \cdot R_{4/1} = -250 \text{ tr/min}$$

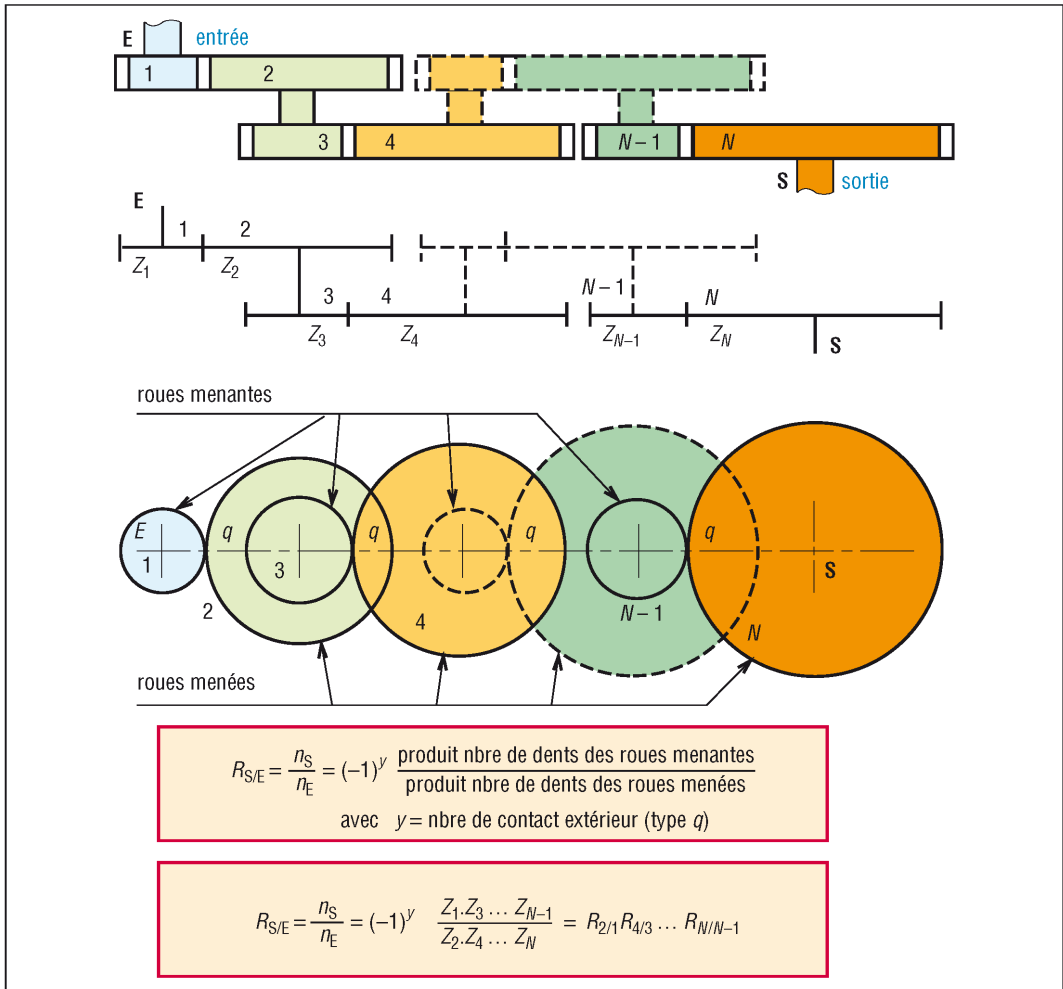


3. Train à deux engrenages.



4. Train à deux engrenages avec roue d'inversion, repère 5.

4. Cas général : trains à N engrenages



5. Train à N roues, formule générale.

Les roues menantes sont les roues motrices de chaque couple de roues. Les roues menées sont les roues réceptrices.

y est le nombre total de contacts (q) entre roues extérieures. $(-1)^y$ permet de savoir s'il y a ou non inversion du sens de rotation entre entrée et sortie.

Exemple 4 : dans le cas d'un train à trois engrenages (roues extérieures) avec $Z_1 = 20$, $Z_2 = 40$, $Z_3 = 17$, $Z_4 = 51$, $Z_5 = 25$, $Z_6 = 125$ quelle est la vitesse de sortie si $n_1 = 1\,500$ tr/min ?

Les roues 1, 3 et 5 sont menantes et les roues 2, 4 et 6 menées. Il y a trois contacts extérieurs de type q ($y = 3$).

$$(-1)^y = (-1)^3 = -1$$

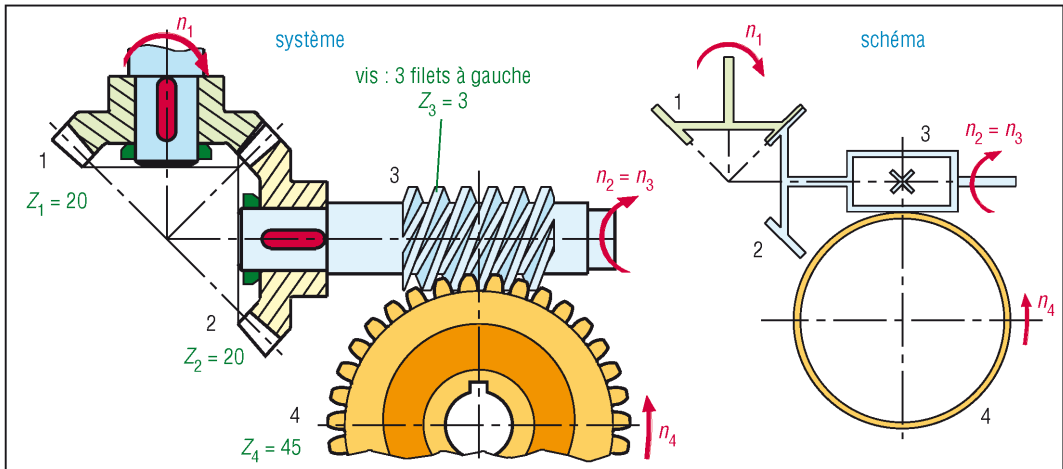
$$R_{6/1} = (-1)^3 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot Z_3 \cdot Z_5}{Z_2 \cdot Z_4 \cdot Z_6} \right) = - \frac{20 \times 17 \times 25}{40 \times 51 \times 125} = - \frac{1}{2 \times 3 \times 5} = - \frac{1}{30}$$

$$n_6 = n_1 \cdot R_{6/1} = 1\,500 \cdot (-1/30) = -50 \text{ tr/min}$$

5. Trains avec engrenages coniques et systèmes roues et vis sans fin

La formule générale précédente est applicable en supprimant $(-1)^y$. On ne peut pas utiliser les rapports entre diamètres primitifs dans le cas d'une roue avec vis sans fin.

Exemple 5 : un réducteur se compose d'un renvoi d'angle $Z_1 = 20$, $Z_2 = 20$ dents et d'un système roue et vis à 3 filets ($Z_3 = 3$), $Z_4 = 45$ dents. Quelle est la valeur de n_4 si $n_1 = 1\ 500$ tr/min.



6. Engrenage conique monté en série avec un système roue et vis sans fin.

En remarquant que $n_2 = n_3$

$$R_{4/1} = \frac{n_4}{n_1} = \frac{n_4}{n_3} \cdot \frac{n_2}{n_1} = \frac{Z_3}{Z_4} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{3}{45} \cdot \frac{20}{20} = \frac{1}{15}$$

$$n_4 = n_1 \cdot R_{4/1} = 1\ 500 \cdot (1/15) = 100 \text{ tr/min}$$

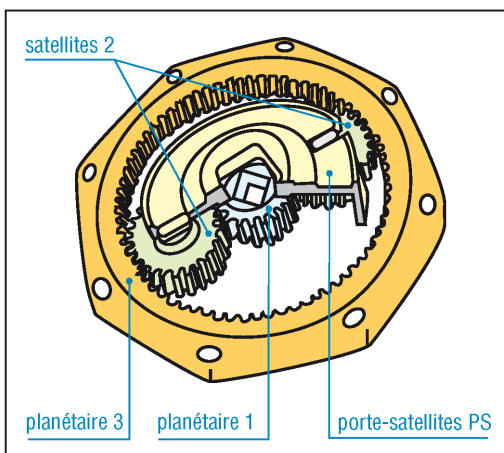
IV - Trains épicycloïdaux ou planétaires

Ils autorisent de grands rapports de réduction sous un faible encombrement et sont régulièrement utilisés dans les boîtes de vitesse automatiques.

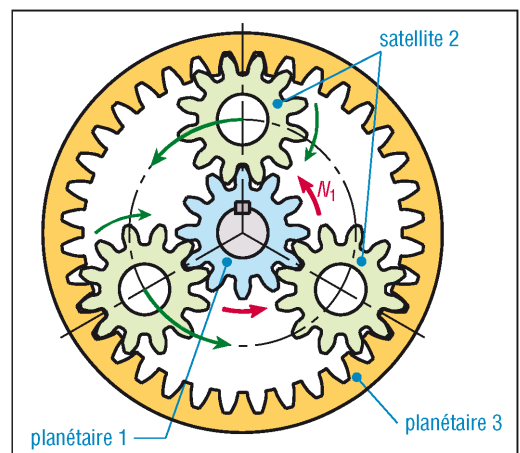
Les puissances transmises sont modérées et les rendements diminuent quand le rapport de réduction augmente. Leur étude est plus complexe que les autres cas.

Une particularité permet de les identifier : les axes de rotation des roues appelées satellites ne sont pas fixes dans le bâti mais tourbillonnent par rapport aux autres roues.

1. Train épicycloïdal simple

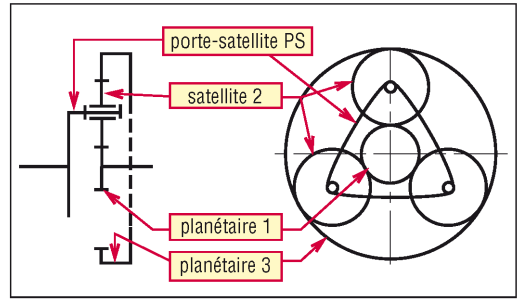


7. Train épicycloïdal simple avec deux satellites.



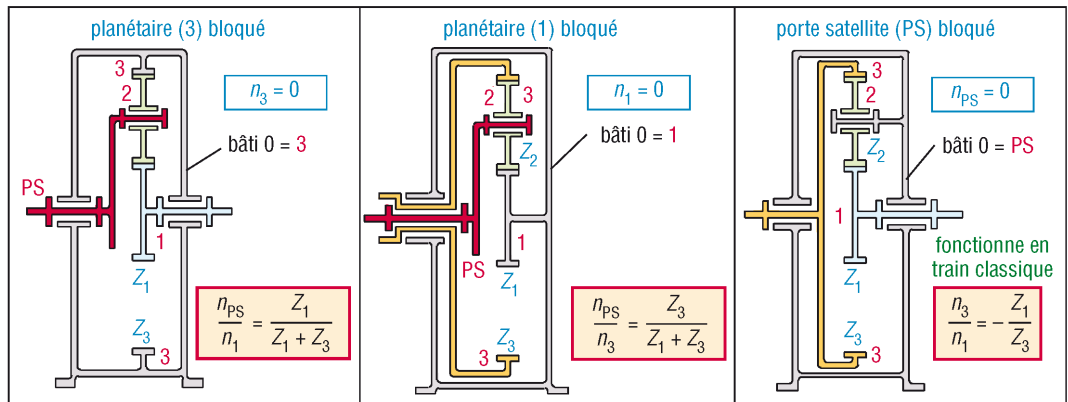
8. Configuration à trois satellites.

Cette configuration est la plus utilisée ; le rendement est bon et l'encombrement axial faible. On peut avoir 2, 3 ou 4 satellites ; leur nombre est sans influence sur le rapport de transmission. Le fonctionnement n'est possible que si l'un des trois éléments principaux, planétaire 1, planétaire 3 ou porte-satellites PS, est bloqué ou entraîné par un autre dispositif.



9. Schéma cinématique général du train épicycloïdal simple.

a) Cas usuels de fonctionnement



10. Différents cas de fonctionnement du train épicycloïdal simple.

La configuration avec planétaire 3, ou couronne bloquée, est de loin la plus utilisée : planétaire 1 en entrée et porte-satellites PS en sortie.

Si le porte-satellites est bloqué, l'ensemble fonctionne comme un train classique à un engrenage intérieur avec roue (satellite) d'inversion.

Exemple : cas d'une configuration avec planétaire 3 bloquée, $Z_1 = 20$, $Z_2 = 30$, $Z_3 = 80$ dents, $n_1 = 1\ 500$ tr/min.

$$\frac{n_{PS}}{n_1} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} = \frac{20}{20 + 80} = \frac{20}{100} = \frac{1}{5} = 0,2$$

$$n_{sortie} = n_{PS} = 1\ 500 \times 0,2 = 300 \text{ tr/min}$$

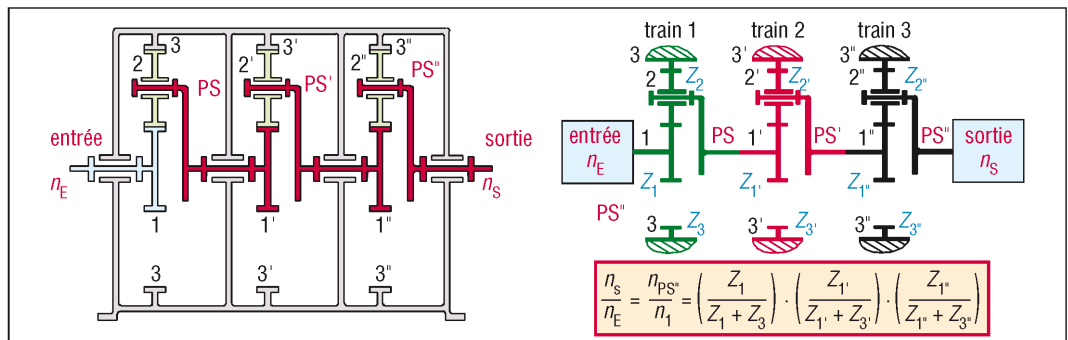
Remarque géométrique utile : $d_3 = d_1 + 2d_2$

autrement dit, $mZ_3 = mZ_1 + 2mZ_2$

soit, $Z_3 = Z_1 + 2Z_2$

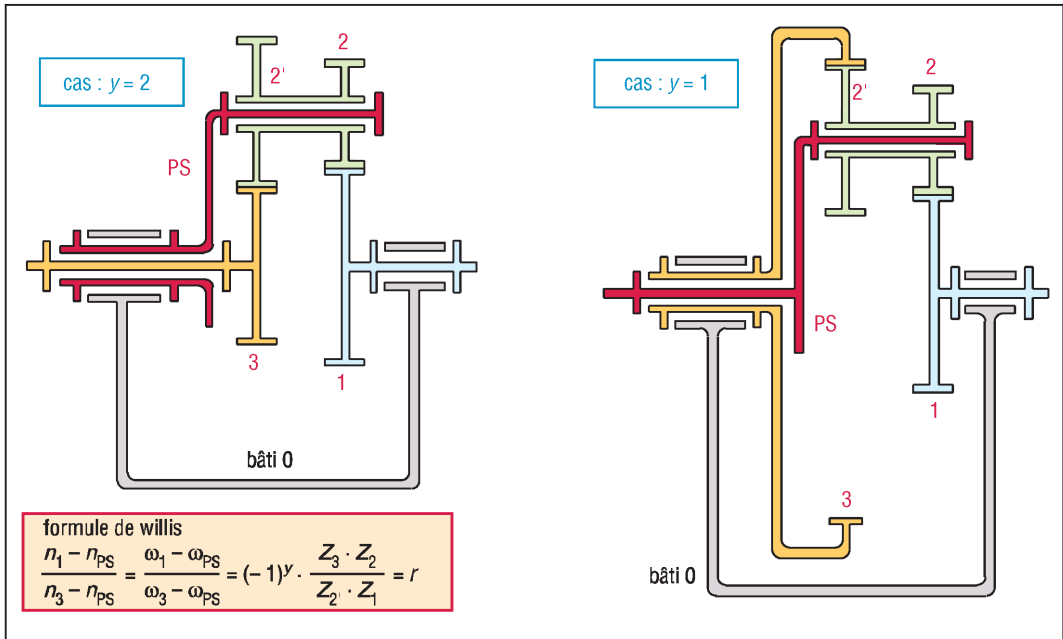
(vérifiée pour l'exemple : $80 = 20 + 2.30$)

b) Configuration avec trains en série



11. Combinaisons de trains épicycloïdaux simples.

2. Trains épicycloïdaux avec satellites à deux roues



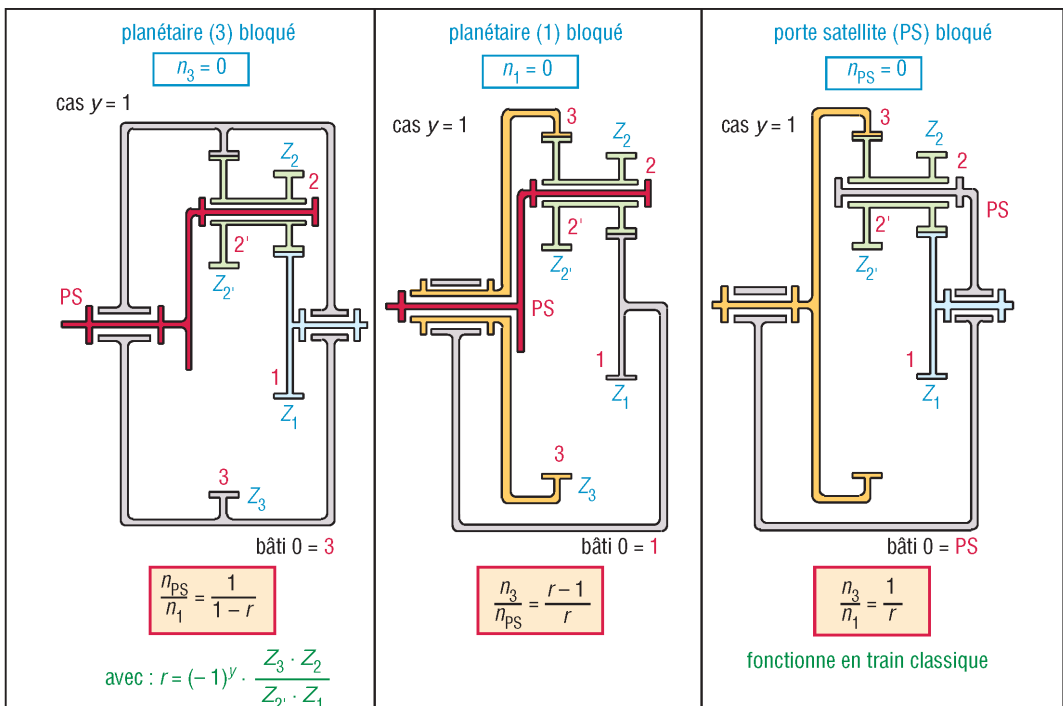
12. Trains épicycloïdaux avec satellite à deux roues. Autre cas : $y = 0$ avec 1 et 3 roues intérieures.

Cette variante du cas précédent permet de plus grands rapports de réduction. Le satellite est réalisé à partir de deux roues dentées 2 et 2' dont les nombres de dents Z_2 et Z_2' sont différents.

Les rapports de transmission se calculent avec la formule de Willis, r est appelé la raison du train de base, y est le nombre de contacts entre roues extérieures.

Comme précédemment, le fonctionnement n'est possible que si l'un des trois éléments de base (1, 3 ou PS) est bloqué ou entraîné par un autre dispositif.

a) Cas usuels de fonctionnement



13. Différents cas de fonctionnement avec satellites à deux roues.

Les configurations avec planétaires 3 ou 1 bloqués sont les plus utilisées (porte-satellites PS en sortie).

Si le porte-satellites est bloqué, l'ensemble fonctionne comme un train classique à deux engrenages.

Exemple : configuration de la figure 13 avec planétaire 3 bloqué, $Z_1 = 20$, $Z_2 = 30$, $Z_3 = 50$, $Z_4 = 100$ dents, $n_1 = 1\ 500$ tr/min. On suppose un même module ($m = 2$) pour les deux engrenages.

On a un couple de roues extérieures et un couple de roues intérieures ce qui donne $y = 1$.

$$r = (-1)^1 \cdot \left(\frac{Z_3 \cdot Z_2}{Z_2 \cdot Z_1} \right) = - \frac{100 \times 30}{50 \times 20} = -3$$

$$\frac{n_{PS}}{n_1} = \frac{1}{1-r} = \frac{1}{1+3} = \frac{1}{4} = 0,25$$

$$n_{PS} = 0,25 \cdot n_1 = 0,25 \times 1\ 500 = 375 \text{ tr/min}$$

Remarque géométrique utile : les deux couples de roues ont même entraxe a

$$\begin{aligned} a &= r_1 + r_2 = r_3 - r_2 \\ &= \frac{1}{2}(d_1 + d_2) = \frac{1}{2}(d_3 - d_2) \\ &= m_1(Z_1 + Z_2) = m_2(Z_3 - Z_2) \end{aligned}$$

si $m_1 = m_2 = m$

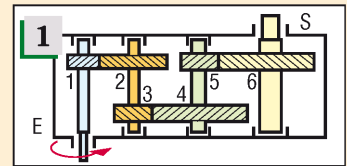
$$Z_1 + Z_2 = Z_3 - Z_2$$

(vérifié pour l'exemple : $20 + 30 = 100 - 50 = 50$)

V - Exercices

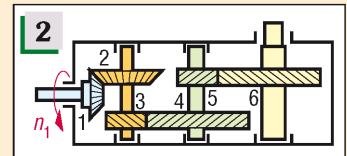
Exercice 1

Le réducteur représenté schématiquement se compose de trois trains d'engrenages à roues hélicoïdales ($Z_1 = 32$, $Z_2 = 64$, $Z_3 = 25$, $Z_4 = 80$, $Z_5 = 18$, $Z_6 = 50$ dents). Si $n_1 = 1\ 500$ tr/min, déterminer la vitesse de sortie n_6 et le sens de rotation.



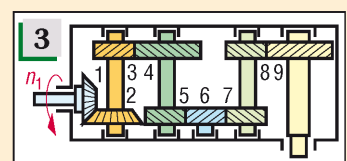
Exercice 2

Le réducteur spiroconique à trois trains proposés a les caractéristiques suivantes : $Z_1 = 26$, $Z_2 = 52$, $Z_3 = 26$, $Z_4 = 82$, $Z_5 = 18$, $Z_6 = 48$ dents. Si $n_1 = 1\ 500$ tr/min, déterminer la vitesse de sortie n_6 et le sens de rotation.



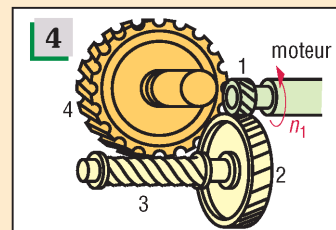
Exercice 3

Le réducteur spiroconique proposé a les caractéristiques suivantes : $Z_1 = 32$, $Z_2 = 40$, $Z_3 = 18$, $Z_4 = 72$, $Z_5 = 22$, $Z_6 = 24$, $Z_7 = 30$, $Z_8 = 17$ et $Z_9 = 34$ dents. Si $n_1 = 1\ 500$ tr/min, déterminer la vitesse de sortie n_9 et le sens de rotation.

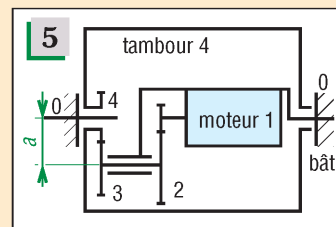


Exercice 4

Le réducteur à axes orthogonaux se compose de deux roues hélicoïdales ($Z_1 = 24$, $Z_2 = 84$ dents) et d'un système roue et vis sans fin (vis 3 à 4 filets, $Z_4 = 36$ dents). Indiquer, d'après la figure, le sens des hélices de toutes les roues et vis. Calculer le rapport global de réduction et la vitesse de sortie n_4 si $n_1 = 1\,500$ tr/min.

**Exercice 5**

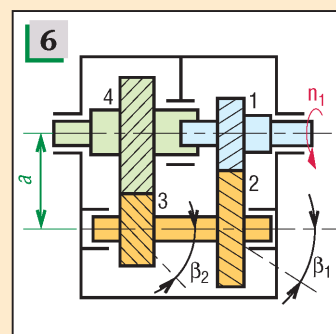
Le tambour moteur de tapis roulant proposé schématiquement a les caractéristiques suivantes : $n_1 = 1\,500$ tr/min, deux trains à dentures droites, $Z_4 = 40$, $Z_2 = 67$, rapport de réduction [$n_4/n_1 = 0,1\,015$], entraxe commun $a = 42$ mm et module du couple de roues (3-4) $m_2 = 1,5$ mm. Déterminer Z_3 , Z_1 et le module m_1 du couple de roue (1,2).

**Exercice 6**

Le réducteur à deux trains d'engrenages hélicoïdaux proposé présente la particularité d'avoir l'arbre d'entrée coaxial à l'arbre de sortie. Engrenage (1,2) : $Z_1 = 30$, $Z_2 = 60$, angle d'inclinaison de l'hélice $\beta_1 = 30^\circ$, module normal $m_n = 5$ mm. Engrenage (3,4) : $Z_3 = 22$, $Z_4 = 35$, module normal 8 mm.

Si l'entraxe est le même pour les deux engrenages, déterminer l'angle de l'hélice β_2 du deuxième train. Calculer le rapport de la transmission et la valeur de n_4 si $n_1 = 1\,500$ tr/min.

Préciser le sens de rotation.

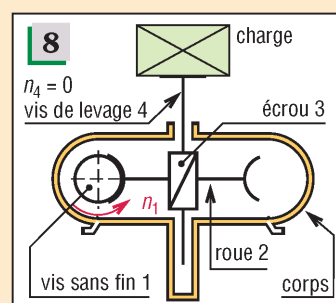
**Exercice 7**

Si la puissance transmise est de 40 kW, déterminer les efforts axiaux F_A exercés sur les quatre roues du réducteur de l'exercice 6. Faire le bilan des efforts axiaux sur l'arbre intermédiaire (2-3). Y a-t-il compensation ?

Exercice 8

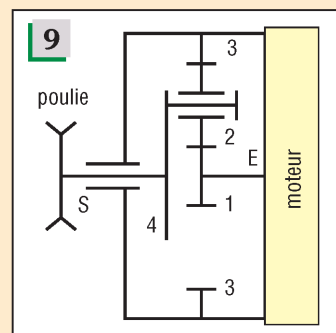
Le vérin à vis proposé schématiquement est utilisé pour lever une charge : engrenage roue et vis couplé avec un système vis-écrou. La vis de levage 4 (pas 8 mm, filet à droite, ne peut pas tourner : $n_4 = 0$) est entraînée en translation verticale à la vitesse V par l'écrou 3 solidaire de la roue 2 (25 dents). Le mouvement moteur est fourni par la vis sans fin 1 (un filet à gauche).

Si $n_1 = 1\,500$ tr/min, déterminer la vitesse V (en m/s) de sortie de la vis 4. La charge monte-t-elle ou descend-elle ?

**Exercice 9**

Le train épicycloïdal simple proposé à son entrée (E) sur la roue 1 ($n_1 = 1\,330$ tr/min, $Z_1 = 18$, $Z_2 = 60$, $Z_3 = 138$) et sa sortie S sur une poulie liée au porte-satellite 4.

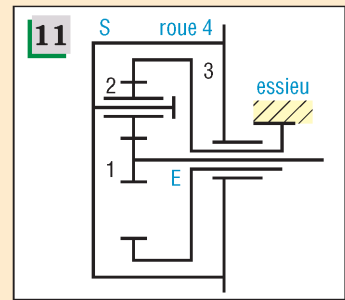
Calculer la vitesse de sortie $n_S = n_4$.

**Exercice 10**

Reprendre l'énoncé de l'exercice 9 avec les valeurs $Z_1 = 20$, $Z_2 = 50$, Z_3 inconnue, $n_1 = 1\,500$ tr/min.

Exercice 11

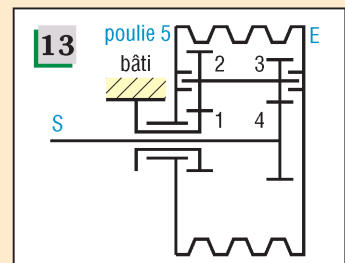
Le réducteur de roue proposé est utilisé sur les camions, pour diminuer le diamètre des arbres de transmission successifs. Les caractéristiques sont : $Z_1 = 36$, $Z_2 = 36$, $Z_3 = 108$, entrée E ($n_E = n_1 = 1\ 000$ tr/min) et sortie S sur le porte-satellites 4 (moyeu) lié à la roue. Déterminer la vitesse de sortie $n_4 = n_S$.

**Exercice 12**

Reprendre l'énoncé de l'exercice 11 avec $Z_1 = 32$, $Z_2 = 40$, Z_3 inconnue, $n_1 = 1\ 000$ tr/min.

Exercice 13

La poulie réductrice proposée reçoit la puissance sur la poulie 5 (entrée E) par plusieurs courroies trapézoïdales. Un train épicycloïdal réduit le mouvement et le transmet à l'arbre 4 (sortie S). Les caractéristiques sont : $Z_1 = 37$, $Z_2 = 26$, $Z_3 = 23$, $Z_4 = 35$. Calculer la vitesse de sortie $n_4 = n_S$ si $n_E = n_5 = 500$ tr/min.

**Exercice 14**

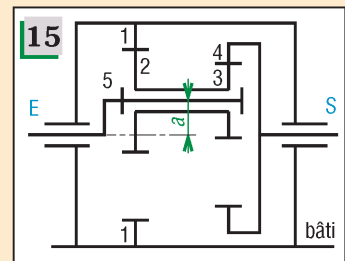
Reprendre l'énoncé de l'exercice 13. Afin d'élargir sa gamme de poulies réductrices le fabricant propose avec l'engrenage $Z_3 = 23$ et $Z_4 = 35$ les couples interchangeable suivants :

| | | | | | |
|-------|----|----|----|----|----|
| Z_1 | 37 | 36 | 38 | 40 | 36 |
| Z_2 | 26 | 25 | 26 | 24 | 32 |

Calculer la vitesse de sortie n_4 pour chaque cas.

Exercice 15

Le réducteur à train épicycloïdal proposé a les caractéristiques suivantes : $Z_1 = 169$, $Z_2 = 163$, $Z_4 = 170$, $Z_3 = 164$, entrée en E ($n_E = n_1 = 1\ 500$ tr/min). Calculer la vitesse de sortie $n_S = n_4$.

**Exercice 16**

Reprendre l'énoncé de l'exercice 15 avec $Z_1 = A$, $Z_2 = B$, $Z_4 = 170$, $Z_3 = 164$ (toutes les roues ont même module $m = 1$) et vitesse d'entrée $n_E = n_5 = 1\ 000$ tr/min. Le couple A/B est interchangeable et le nombre de dents peut être choisi.

a) Déterminer le rapport n_S/n_E en fonction de A et B.

b) Écrire une relation entre A et B (propriété géométrique).

c) Calculer n_S lorsque A a les valeurs suivantes : 50, 80, 120, 140, 160, 162, 164, 166, 168, 169. Comparer.

Exercice 17

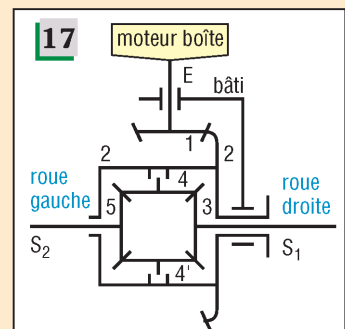
Toutes les automobiles et tous les camions sont munis d'un différentiel. Ce dispositif permet de transmettre l'énergie motrice aux deux roues même si celles-ci ne tournent pas à la même vitesse, dans le cas d'un virage. La plupart des différentiels utilisent un train épicycloïdal sphérique, avec des roues coniques, dont le principe est indiqué figure ci-contre. Exemple de caractéristiques : $Z_1 = 17$, $Z_2 = 54$,

$$Z_3 = Z_5 = 11, Z_4 = Z_4' = 16.$$

a) $n_1 = n_E = 2\ 000$ tr/min, déterminer la vitesse des deux roues si celles-ci sont supposées tourner à la même vitesse ($n_{S1} = n_{S2}$).

b) Refaire la question si, la voiture étant à l'arrêt, la roue gauche patine sur le verglas alors que la roue droite reste bloquée ($n_{S1} = 0$).

c) Que se passe-t-il dans les virages ? Comment réagit le différentiel ?



31

ENGRENAGES EFFORTS SUR LES DENTURES

OBJECTIFS

- Décrire et définir les efforts s'exerçant entre les dentures des principaux types d'engrenages.
- Fournir des éléments et une méthode de calcul de ces efforts.
- Donner des indications sur le calcul de la résistance de la dent.

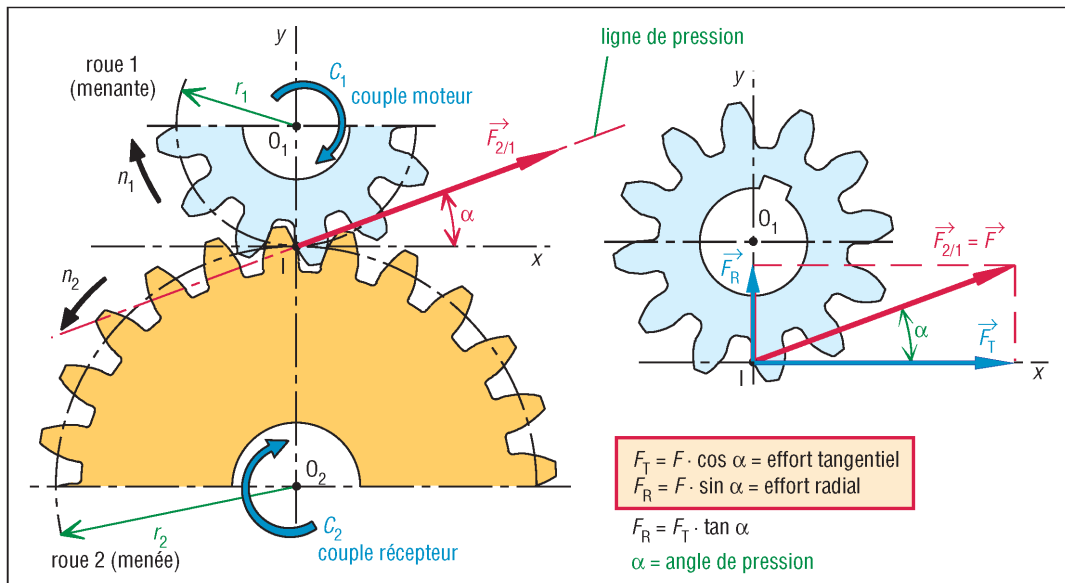
I - Cas des engrenages droits à denture droite

La roue 1 est supposée menante (motrice) et la roue 2 menée (réceptrice), r_1 et r_2 sont les rayons primitifs.

C_1 est le couple moteur sur la roue 1 et C_2 le couple récepteur sur la roue 2.

P_1 est la puissance motrice de la roue 1 et P_2 la puissance réceptrice de la roue 2. Si le rendement est égal à 1 : $P_2 = P_1$.

| | | | |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| $P = C \cdot \omega$ | $P_1 = C_1 \cdot \omega_1$ | $P_2 = C_2 \cdot \omega_2$ | avec P en watts, C en Nm et ω en rad/s. |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|--|



1. Efforts sur une denture droite.

1. Efforts de contact

a) Action de contact $F_{2/1}$

Elle schématise l'action exercée par la roue 2 sur la roue 1. Elle est toujours portée par la ligne de pression (inclinée de l'angle de pression α et passant par I , point de contact entre cercles primitifs).

b) Effort tangentiel F_T

Il est obtenu en projetant $F_{2/1}$ sur la tangente en I aux cercles primitifs. F_T est à l'origine du couple transmis.

$$F_T = F_{2/1} \cdot \cos \alpha \quad C_1 = F_T \cdot r_1 \quad C_2 = F_T \cdot r_2$$

c) Effort radial F_R : perpendiculaire à F_T , il est obtenu en projetant $F_{2/1}$ sur O_1O_2 .

Parfois appelé effort de séparation, il ne participe pas à la transmission du couple ; son action a tendance à séparer les deux roues et se traduit par un fléchissement des arbres.

$$F_R = F_{2/1} \cdot \sin \alpha$$

2. Calcul de $F_{2/1}$, F_T et F_R

L'organigramme proposé indique la procédure à suivre, connaissant la puissance d'entrée, la vitesse de rotation et l'angle de pression (la détermination de F_T à partir du couple C est nécessaire pour obtenir F_R et $F_{2/1}$).

Exemple 1 :

Une puissance de 100 kW à 1 500 tr/min est transmise d'une roue 1 ($Z_1 = 20$) à une roue 2 ($Z_2 = 40$). Le module est de 8 mm et l'angle de pression de 20° .

Déterminons l'ensemble des actions exercées (cas d'un rendement égal à 1).

$$r_1 = 0,5 \cdot m Z_1 = 0,5 \cdot 8 \cdot 20 = 80 \text{ mm}$$

$$r_2 = 2r_1 = 160 \text{ mm}$$

$$C_1 = 30P/\pi n = 30 \cdot 100\,000/\pi \cdot 1\,500 = 636,62 \text{ Nm}$$

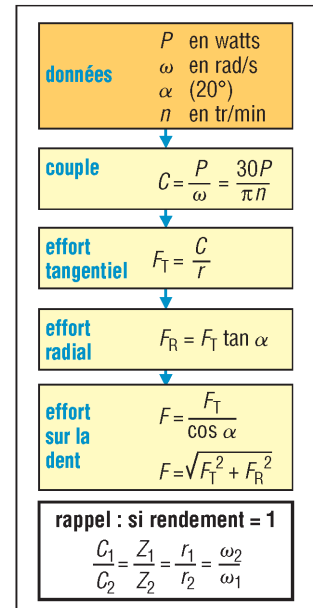
$$C_2 = 2C_1 = 1273,24 \text{ Nm}$$

$$F_T = F_{T1} = C_1/r_1 = F_{T2} = 636,6/0,080 = 7\,958 \text{ N}$$

$$F_R = F_{R1} = F_T \tan \alpha = F_{R2} = 7\,958 \cdot \tan 20^\circ = 2\,896 \text{ N}$$

$$F = F_{2/1} = F_{1/2} = F_T/\cos \alpha = 7\,958/\cos 20^\circ = 8\,468 \text{ N}$$

$$\text{Vérification } F = [F_T^2 + F_R^2]^{0,5} = [7\,958^2 + 2\,896^2]^{0,5} = 8\,468$$

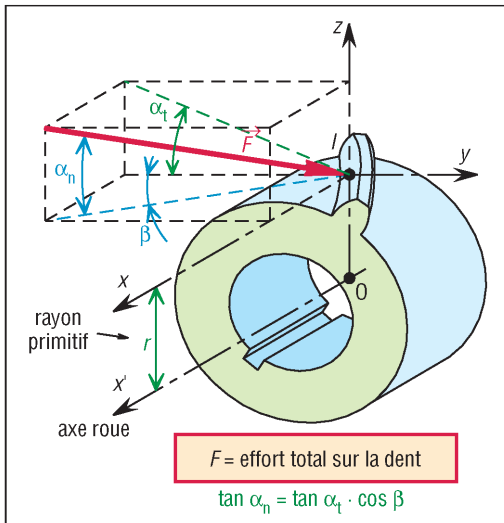


2. Organigramme de calcul.

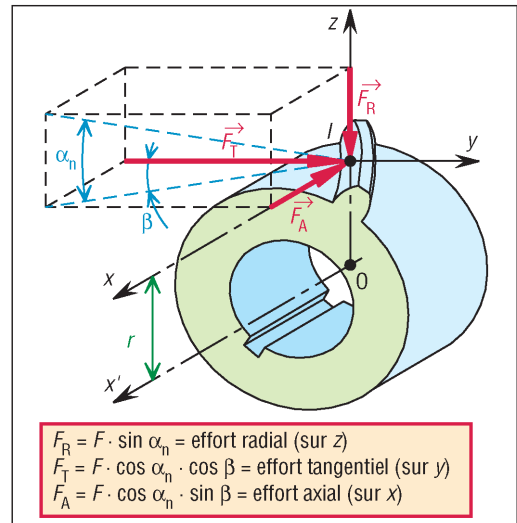
II - Cas des engrenages droits à denture hélicoïdale

L'action F ($F_{2/1}$ ou $F_{1/2}$) exercée entre les dents en contact présente, par rapport au cas précédent, une composante axiale F_A supplémentaire due à l'inclinaison β de la denture. F_A est parallèle à l'axe de la roue et se transmet aux paliers par l'intermédiaire des arbres.

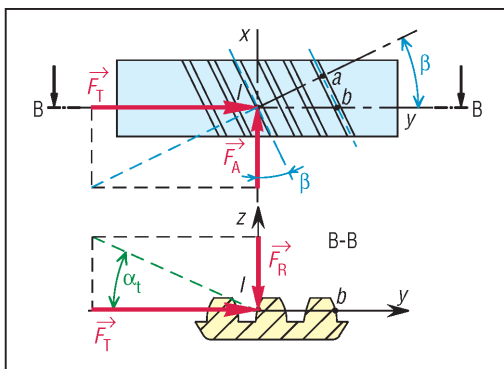
F_R , effort radial passant par le centre de la roue, et F_T , effort tangentiel transmettant le couple et la puissance, sont analogues au cas précédent des dentures droites. Ni F_R , ni F_A ne participent à la transmission du couple.



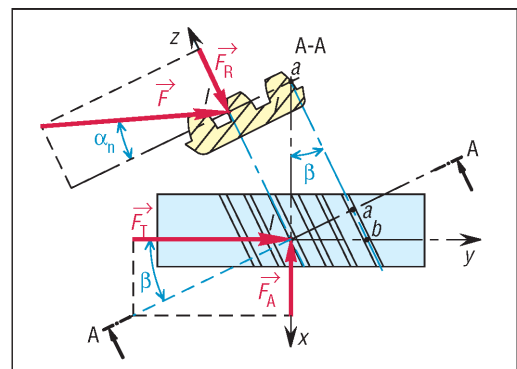
3. Action F résultante sur une dent hélicoïdale.



4. Composantes F_T, F_A, F_R de F .



5. Vues de F_A et F_T dans le plan (l, x, y) .



6. Mise en évidence de F et F_R dans le plan AA.

1. Calcul de F_T, F_R, F_A et F

L'organigramme proposé indique la procédure à suivre, connaissant la puissance d'entrée, la vitesse de rotation, l'angle de pression normal α_n ($\alpha_t =$ angle de pression apparent) et l'angle d'inclinaison β .

Exemple 2 :

Reprenons les données de l'exemple 1 (100 kW à 1 500 tr/min, $Z_1 = 20$ et $Z_2 = 40$, module normal 8 mm) avec un angle de pression normal : $\alpha_n = 20^\circ$. Déterminons les actions si l'angle d'inclinaison de la denture est de 30° .

$$m_t = m_n / \cos \beta = 8 / \cos 30^\circ = 9,24 \text{ mm}$$

$$r_1 = 1/2 \cdot m_t \cdot Z_1 = 1/2 \cdot 9,24 \cdot 20 = 92,4 \text{ mm}$$

$$r_2 = 2r_1 = 184,8 \text{ mm}$$

$$C_1 = 30P / \pi n = 30 \cdot 100\,000 / \pi \cdot 1\,500 = 636,62 \text{ Nm}$$

$$C_2 = 2C_1 = 1\,273,24 \text{ Nm}$$

$$F_T = F_{T1} = C_1 / r_1 = F_{T2} = 636,62 / 0,0924 = 6\,890 \text{ N}$$

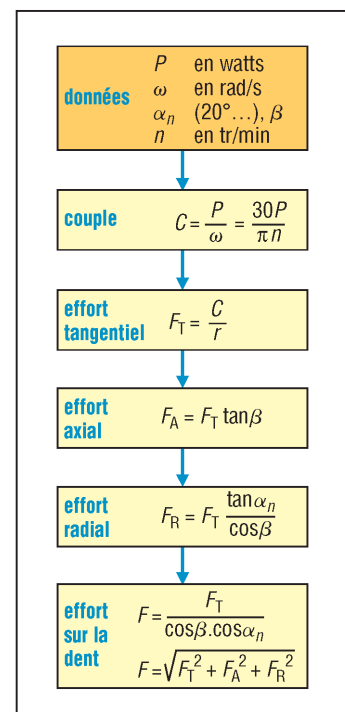
$$F_A = F_{A1} = F_T \tan \beta = F_{A2} = 6\,890 \cdot \tan 30 = 3\,978 \text{ N}$$

$$F_R = F_{R1} = F_T \cdot \tan \alpha_n / \cos \beta = F_{R2} = 6\,890 \cdot \tan 20 / \cos 30 = 2\,896 \text{ N}$$

$$F = F_{2/1} = F_T / (\cos \beta \cdot \cos \alpha_n) = F_{1/2}$$

$$= 6\,890 / (\cos 30 \cdot \cos 20) = 8\,466 \text{ N}$$

Vérification : $F = \sqrt{F_T^2 + F_A^2 + F_R^2}^{1/2}$
 $= \sqrt{6\,890^2 + 3\,978^2 + 2\,896^2}^{1/2} = 8\,466 \text{ N}$

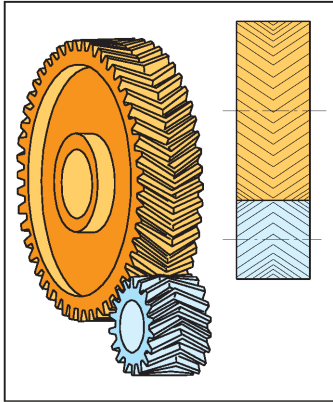


7. Organigramme de calcul.

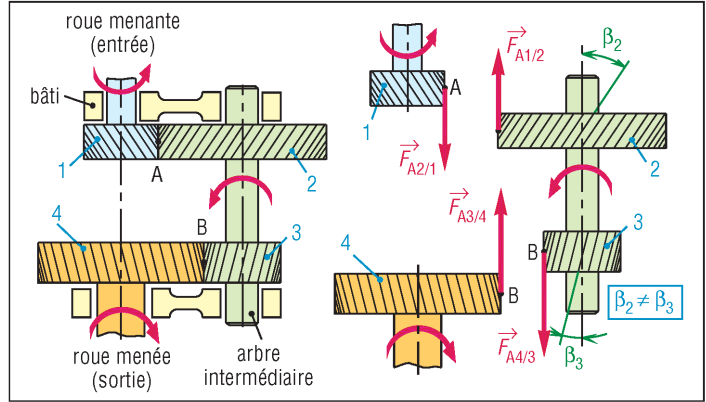
2. Compensation des efforts axiaux F_A

Les dentures chevrons éliminent les effets de l'effort axial sur les paliers. Pour un même arbre comportant deux roues, l'utilisation de sens d'hélices judicieusement choisis compense les efforts axiaux respectifs.

Pour l'exemple proposé, $F_{A1/2}$ en A est compensé par $F_{A4/3}$ en B ce qui donne un effort axial total sur les paliers de l'arbre intermédiaire : $F_A = F_{A1/2} - F_{A4/3}$.

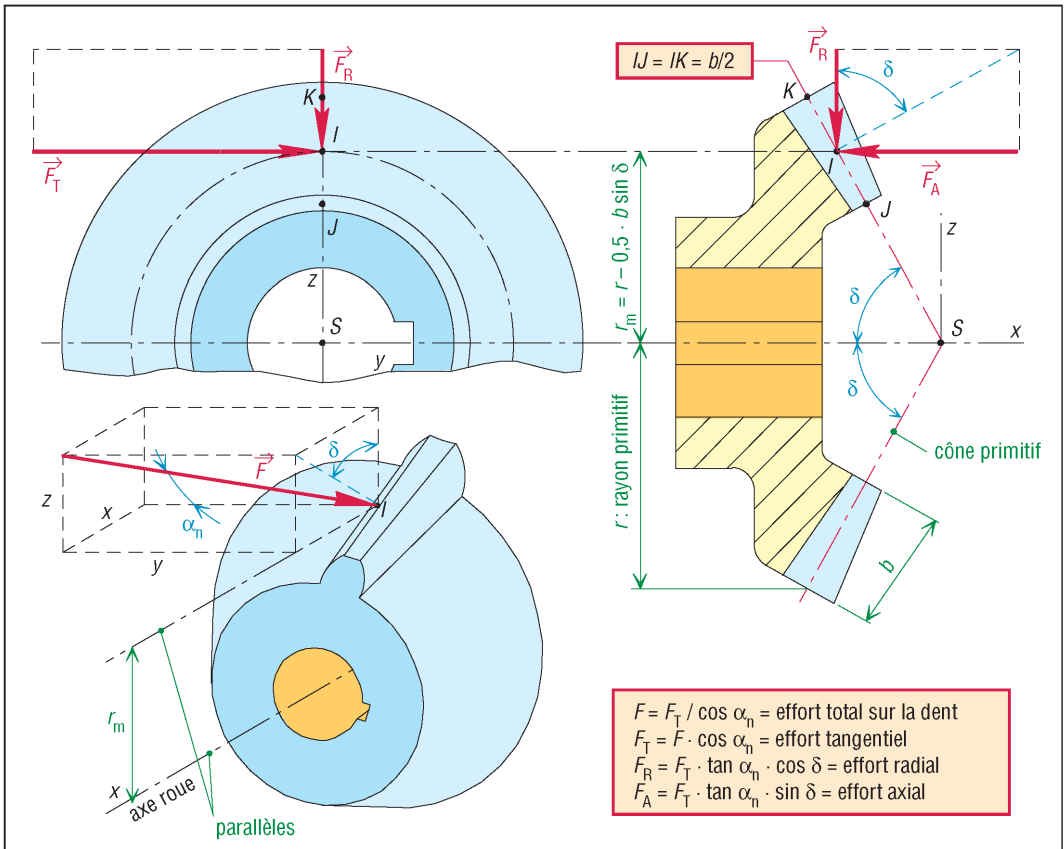


8. Denture chevron.



9. Exemple de compensations des efforts axiaux de l'arbre intermédiaire des roues 2 et 3.

III - Cas des engrenages coniques à dentures droites



10. Efforts sur une denture conique.

La forme conique des roues engendre des efforts axiaux F_A .

Le point d'application I de l'effort F ($F_{2/1}$) porté par KJ sur la dent est supposé situé au milieu de la denture ($b/2$ de chaque côté) et sur le cône primitif.

L'effort tangentiel F_T dépend du rayon moyen r_m et non pas du rayon primitif. L'effort radial F_R comme l'effort axial F_A dépendent de l'angle δ du cône primitif.

Calcul des efforts

La procédure de détermination des efforts connaissant la puissance, la vitesse et les angles α_n et δ est indiquée par l'organigramme proposé. F_R et F_A ne participent pas à la transmission du couple C .

Si les axes des deux roues sont perpendiculaires, l'effort axial sur la roue 1 devient l'effort radial sur la roue 2 et inversement ($F_{A1} = F_{R2}$ et $F_{R1} = F_{A2}$).

Exemple 3 : reprenons les données de l'exemple 1 (100 kW, 1 500 tr/min, $Z_1 = 20$, $Z_2 = 40$ et module 8 mm). Les axes des roues sont supposés perpendiculaires, $\alpha_n = 20^\circ$ et $b = 50$ mm.

Déterminons les efforts sur la dent.

$$r_1 = 0,5 \cdot m \cdot Z_1 = 0,5 \cdot 8 \cdot 20 = 80 \text{ mm}$$

$$r_2 = 2r_1 = 160 \text{ mm}$$

$$C_1 = 30P/\pi \cdot n_1 = 636,62 \text{ Nm}$$

$$C_2 = 2C_1 = 1\,273,24 \text{ Nm}$$

$$\tan \delta_1 = r_1/r_2 = 80/160$$

$$\delta_1 = 26,56^\circ$$

$$\delta_1 + \delta_2 = 90^\circ \text{ (axes perpendiculaires)}$$

$$\delta_2 = 90^\circ - 26,56^\circ = 63,44^\circ$$

$$\text{Rayon moyen : } r_{m1} = r_1 - 0,5 \cdot b \cdot \sin \delta_1$$

$$= 80 - 25 \cdot \sin 26,56 = 68,82 \text{ mm}$$

$$F_T = F_{T1} = C_1/r_{m1} = F_{T2} = 636,62/0,06882 = 9\,250 \text{ N}$$

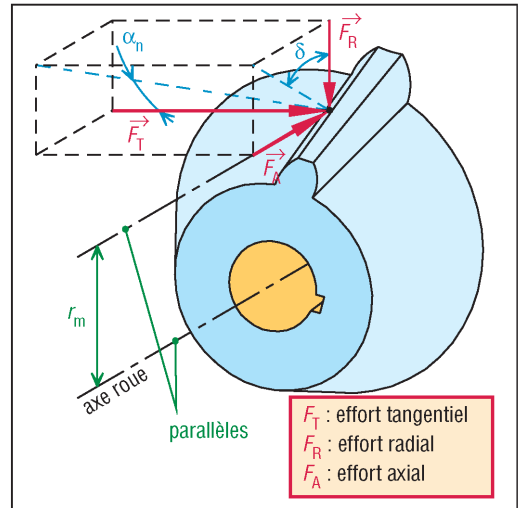
$$F_{A1} = F_{R2} = F_T \cdot \tan \alpha_n \cdot \sin \delta_1 = 9\,250 \cdot \tan 20^\circ \cdot \sin 26,56^\circ = 1\,505 \text{ N}$$

$$F_{R1} = F_{A2} = F_T \cdot \tan \alpha_n \cdot \cos \delta_1 = 9\,250 \cdot \tan 20^\circ \cdot \cos 26,56^\circ = 3\,011 \text{ N}$$

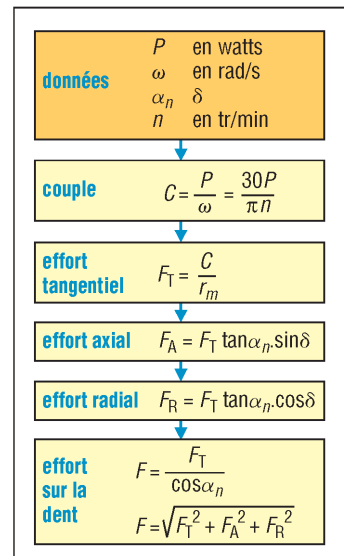
$$F = F_T/\cos \alpha_n = 9\,250/\cos 20^\circ = 9\,844 \text{ N}$$

$$\text{Vérification : } F = [F_T^2 + F_A^2 + F_R^2]^{1/2}$$

$$= [9\,250^2 + 1\,505^2 + 3\,011^2]^{1/2} = 9\,844 \text{ N}$$



11. Vue spatiale des efforts exercés.



12. Organigramme de calcul.

IV – Cas des engrenages à roue et vis sans fin

Le sens des actions F_{Tr} et F_{Tv} est indiqué pour un filet à droite (vis et roue).

Dans le cas d'un filet à gauche, ce sens doit être inversé.

F_{Tv} est l'effort tangentiel sur la vis et F_{Tr} l'effort tangentiel sur la roue.

Si la vis est motrice ou menante, cas général, F_{Tv} créé par le couple moteur Cv est à l'origine, de tous les autres efforts.

$$F_{Tv} = F_{Ar} = \text{effort axial sur la roue}$$

$$F_{Tr} = F_{Av} = \text{l'effort axial sur la vis}$$

La procédure de détermination des efforts est indiquée par l'organigramme proposé. Les formules indiquées ne tiennent pas compte du frottement.

Cas du frottement

Si f est le coefficient de frottement entre les roues

$$F_{TV} = F (\cos \alpha_n \cdot \sin \beta + f \cdot \cos \beta)$$

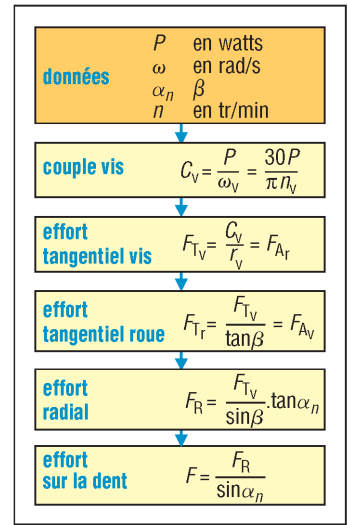
$$F_{Tr} = F (\cos \alpha_n \cdot \cos \beta - f \cdot \sin \beta)$$

$$F_R = F \cdot \sin \alpha_n \text{ (inchangé)}$$

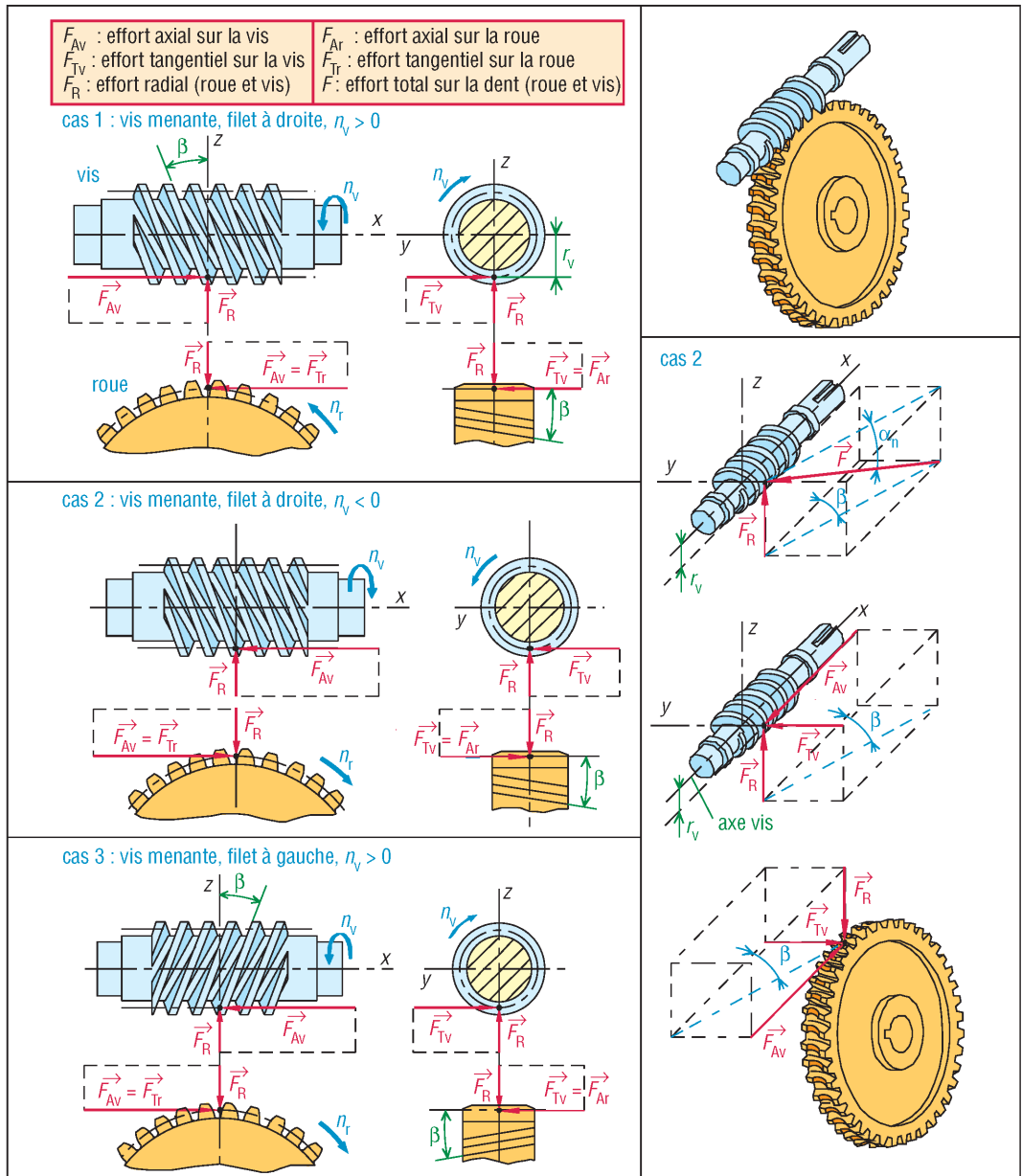
$$\eta = \frac{\text{puissance sortie}}{\text{puissance entrée}}$$

$$= \frac{\cos \alpha_n - f \cdot \tan \beta}{\cos \alpha_n + f \cdot \cot \beta}$$

| Variation du rendement η lorsque $f = 0,05$ et $\alpha_n = 20^\circ$ | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| β (deg) | 1 | 2 | 3 | 5 | 8 | 15 | 25 | 30 | 40 |
| η | 0,25 | 0,40 | 0,49 | 0,62 | 0,72 | 0,82 | 0,88 | 0,89 | 0,90 |



13. Organigramme de calcul.



14. Efforts exercés dans le cas d'un système roue et vis.

V – Calcul de la résistance de la dent

La conception d'un engrenage passe par la détermination de l'épaisseur de la dent, du module à partir de l'effort F ($F_{2/1}$) exercé entre les roues et des conditions de service.

Cette détermination conduit à deux types de calculs :

- Un calcul de contrainte au pied de la dent (zone fragile).
- Un calcul de résistance (usure, fatigue...) dans la zone de contact entre dents.

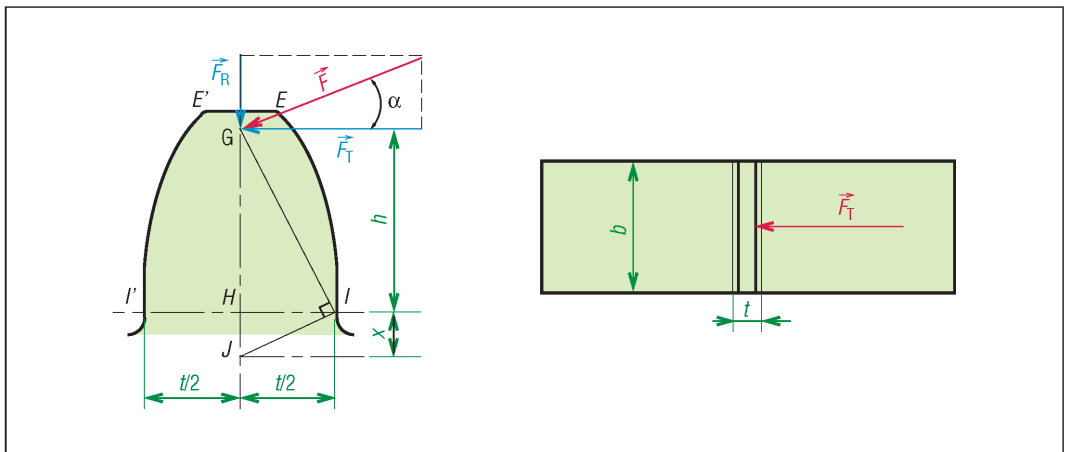
Remarques

- L'application des méthodes de calcul normalisées (ISO, AGMA...) est en général un parcours difficile semé de tâtonnements, choix, essais, erreurs et jugements qui exigent de l'expérience (voir ouvrages spécialisés et normes NF ISO 6336-1 à 6 ; FD ISO/TR 14521...).
- Les méthodes abordées dans ce paragraphe, limitées au calcul des contraintes, sont des méthodes approchées permettant une approximation ou une étude simplifiée ; elles ne peuvent pas être utilisées pour des applications importantes.

1. Méthode de Lewis : cas d'un engrenage droit à denture droite

Cette méthode est à l'origine des autres méthodes. Sa formule a été établie en 1892. Elle est encore utilisée aujourd'hui pour des approximations et des études simplifiées.

Inconvénients : méthode majorante, supposant une seule dent en prise ; ne tient pas compte du phénomène de concentration de contraintes au pied de la dent (rayon r_f) et néglige les conditions de service (chocs, fatigue...).



15. Efforts exercés sur une dent.

a) Principe : la dent est calculée en flexion comme une poutre encastée soumise à l'effort F supposé situé à son extrémité E (ou E').

F peut être remplacé par ses composantes F_T et F_R . Les effets de F_R beaucoup plus faibles sont négligés.

La résistance des matériaux (cours de flexion) montre que la contrainte de flexion est maximale en I (ou I' , racine de la dent) et qu'en ce point :

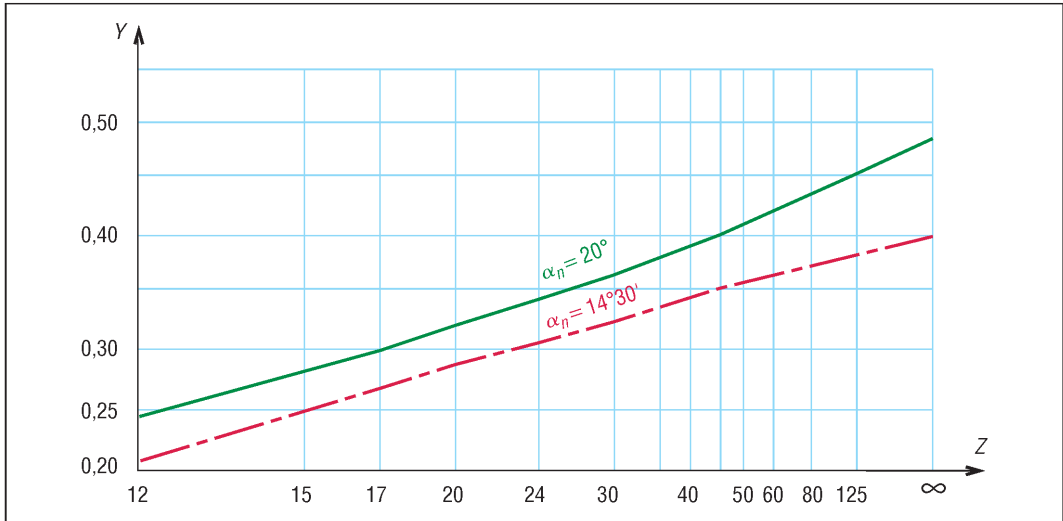
$$\sigma_{\max i} = \frac{F_T}{b \cdot m \cdot Y} = \frac{F_T}{k \cdot m^2 \cdot Y} \leq R_{pe}$$

$b = k \cdot m$: largeur de la dent

m : module

R_{pe} : contrainte admissible par le matériau (traction)

La valeur de Y dépend de l'angle de pression α et du nombre de dents Z (voir figure 16).



16. Valeur du coefficient Y.

Au besoin, un coefficient correcteur (K_v) permet de tenir compte des effets de la vitesse circonférentielle au diamètre primitif ($V = \pi n r / 30$) :

$$\sigma_{\max i} = \frac{F_T}{b \cdot m \cdot Y \cdot K_v} \leq R_{pe} \quad \text{avec} \quad K_v = \frac{6}{6 + V} \quad (V \text{ en m/s})$$

| Valeurs indicatives des contraintes admissibles | |
|---|-------------------------------|
| métaux | R_{pe} (N/mm ²) |
| aciers trempés et revenus ou cémentés | 110 à 370 |
| fontes FGL | 50 à 80 |
| bronze | 80 à 120 |
| nylon PA6.6 | ≈ 30 |

b) Exemple : Déterminons la charge tangentielle admissible d'une roue de caractéristiques : $Z = 16$, $m = 3$, $\alpha = 20^\circ$, $n = 1\,200$ tr/min, $k = 12$ si l'on impose une contrainte admissible de 210 N/mm^2 pour le matériau (acier cémenté).

$$r = mZ/2 = 3 \cdot 16/2 = 24 \text{ mm}$$

$$V = \pi n r / 30 = \pi \cdot 1\,200 \cdot 24 / 30 = 3\,016 \text{ mm/s} \approx 3 \text{ m/s}$$

$$b = k \cdot m = 12 \cdot 3 = 36 \text{ mm}$$

$$K_v = 6 / (6 + V) = 6 / (6 + 3) = 0,666$$

par lecture du graphe des Y ($Z = 16$), on obtient : $Y \approx 0,30$

$$F_T \leq R_{pe} \cdot b \cdot m \cdot Y \cdot K_v = 210 \cdot 36 \cdot 3 \cdot 0,30 \cdot 0,666 = 4\,530 \text{ N}$$

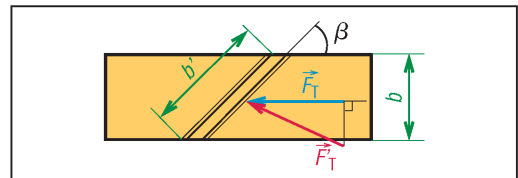
2. Méthode de Lewis :

cas d'un engrenage droit à denture hélicoïdale

En remarquant que :

$$[F'_T / b'] = (F_T / \cos \beta) / (b / \cos \beta) = F_T / b,$$

la formule précédente est conservée en remplaçant le module m par le module réel m_n et en remplaçant Z par le nombre de dent équivalent Z_e (voir chapitre 29 : étude générale des engrenages, paragraphe 3, page 347).



17. Cas d'une denture hélicoïdale.

$$\sigma_{\max i} = \frac{F_T}{b \cdot m_n \cdot Y \cdot K_v} \leq R_{pe} \quad \text{avec} \quad Z_e = \frac{Z}{\cos^3 \beta}$$

32

TRANSMISSIONS PAR COURROIES ET PAR CHÂÎNES

OBJECTIFS

- Donner des éléments de comparaison entre courroies, chaînes et engrenages.
- Décrire et étudier les principales familles de courroies et de chaînes.
- Fournir les éléments pour le calcul des transmissions.

Utilisées en manutention ou en transmission de puissance, ces transmissions sont assez faciles à concevoir et souples d'emploi ; elles donnent une grande liberté pour positionner les organes moteur et récepteur. Économiques, elles remplacent de plus en plus souvent les engrenages, les arbres, les paliers et diverses transmissions rigides.

De plus, dans la mesure où ces éléments présentent une certaine élasticité, elles réduisent et amortissent les vibrations, atténuent les chocs et les à-coups de transmission, ce qui augmente la durée de vie des machines. La durée de vie de ces éléments étant limitée, il est nécessaire de prévoir un plan d'entretien périodique pour surveiller l'usure, le vieillissement, la perte d'élasticité et prévoir les remplacements aux premiers signes de dégradation. Leur calcul, à l'aide de tables, coefficients correcteurs, graphes et abaques, est très typique de ce qui se fait en technologie, sorte de modèle du genre.

| Comparaison des principaux systèmes de transmission de puissance | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|---|
| | transmissions par engrenages | transmissions par roues et chaînes | transmissions poulies courroies | | | |
| | | | courroies crantées (synchrone) | courroies striées (poly-V) | courroies trapézoïdales (en V) | courroies plates |
| couples transmissibles | très élevés | élevés | assez élevés | modérés | moyens | faibles |
| puissances transmissibles | très élevées | élevées | assez élevées | modérées | élevées | faibles |
| vitesse limites (m/s) | 80 à 100 | 13 à 20 | 60 | 60 à 80 | 40 | 80 à 100 |
| rapport limite (ND/Nd) de la transmission | $< \frac{1}{8}$ | $< \frac{1}{9}$ | $< \frac{1}{10}$ | $< \frac{1}{40}$ | $< \frac{1}{15}$ | $< \frac{1}{20}$ |
| position des arbres | tous cas possibles* | parallèles | parallèles | parallèles et autres | parallèles | parallèles et autres |
| rendement (%) | ≈ 98 | ≤ 97 | ≤ 98 | ≤ 98 | 70 à 96 | ≈ 98 |
| tension initiale | inutile | faible | faible | assez élevée | peu élevée | élevée |
| durée de vie | élevée | assez élevée | limitée | limitée | limitée | limitée |
| lubrification | nécessaire | nécessaire | inutile | inutile | inutile | inutile |
| INCONVÉNIENTS | – entraxe précis – lubrification | – bruyantes – lubrification | – synchronisme non parfait | – moins économique | – rendement | – faibles couples |
| AVANTAGES | – synchronisme – précision – grands couples et grandes puissances – position des arbres | – assez bon synchronisme – supportent des tensions élevées et des basses vitesses | – entretien réduit – vitesses angulaires constantes | – flexibilité – silencieuses – diamètres d'enroulement faibles | – économique – encombrement réduit, permet les groupements en parallèle | – grandes vitesses – rendement – silencieuses – rapports de transmission |

*arbres parallèles, perpendiculaires, orthogonaux et même de position quelconque

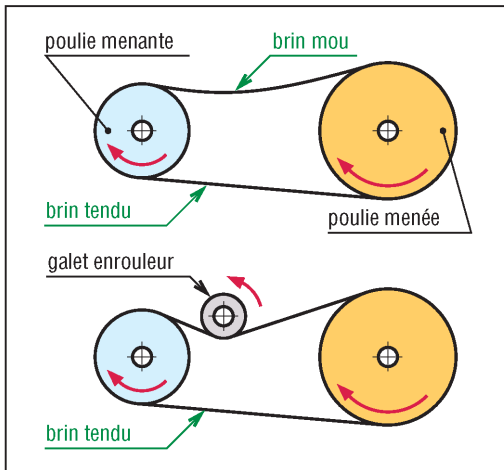
I - Transmissions par poulies et courroies

Silencieuses, elles sont surtout utilisées aux vitesses élevées avec de grands entraxes possibles entre poulies.

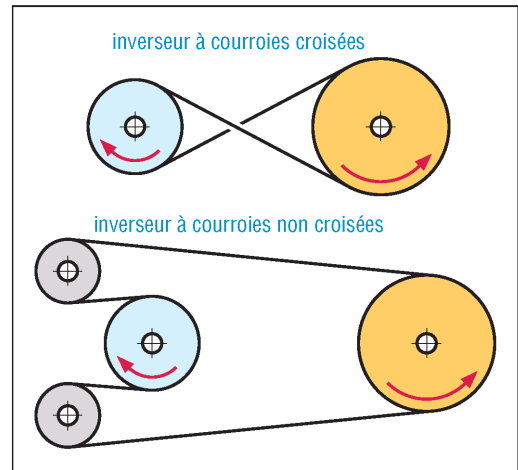
La tension initiale des courroies est indispensable pour garantir l'adhérence et assurer la transmission du mouvement.

Un système à entraxe réglable ou un dispositif annexe de tension (galet enrouleur, etc.) est souvent nécessaire pour régler la tension initiale et compenser l'allongement des courroies au cours du temps.

À l'exception des courroies crantées, en fonctionnement normal, il existe un léger glissement de la courroie sur les poulies amenant une imprécision du rapport de transmission ; celui-ci n'est pas exactement égal au rapport des diamètres des deux poulies.

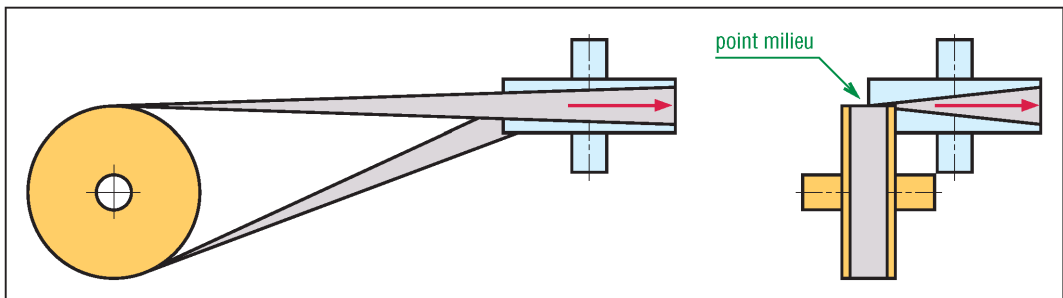


1. Principe d'une transmission par poulie courroie.



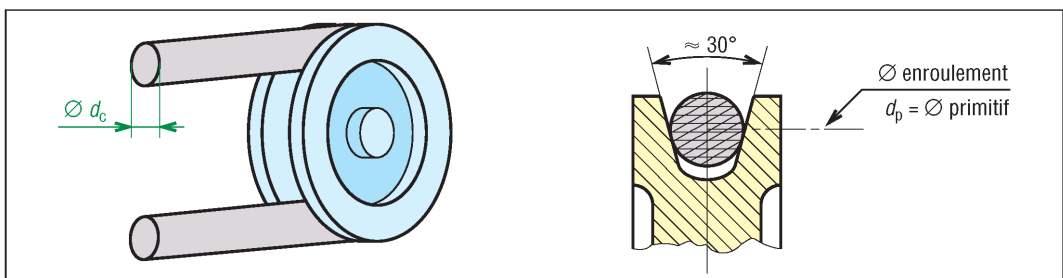
2. Inverseurs.

Règle : quand une courroie quitte une poulie elle doit se trouver dans le plan médian de la poulie réceptrice.



3. Cas d'arbres perpendiculaires.

Courroies rondes : elles sont surtout utilisées dans les petits mécanismes.



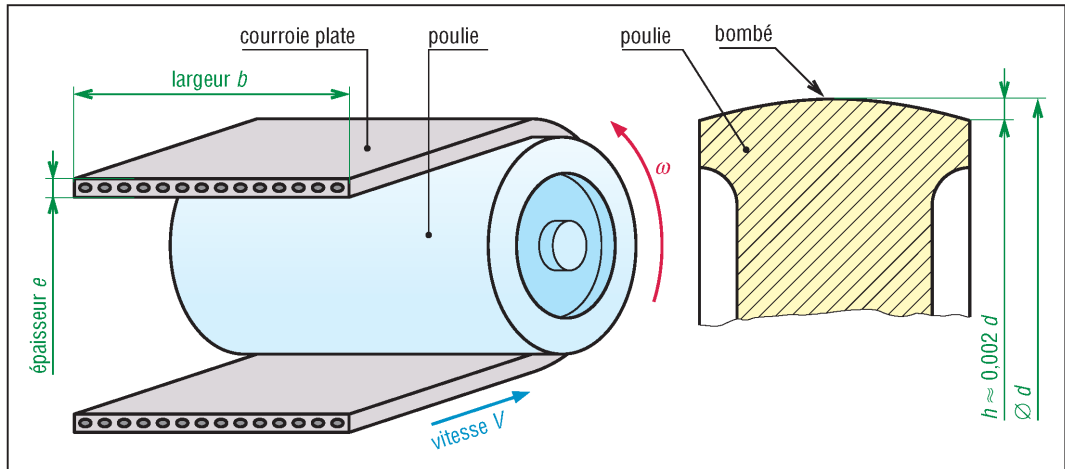
4. Courroies rondes : exemple de configuration.

1. Courroies plates

Très silencieuses, elles permettent de grands rapports de réduction et sont surtout utilisées aux grandes vitesses (80 à 100 m/s) sous de faibles couples.

Elles absorbent bien les vibrations torsionnelles, ce qui autorise les grands entraxes et les grandes longueurs. Elles ont un très bon rendement ($\approx 98\%$, comparable aux engrenages).

Le bombé des poulies permet un meilleur guidage et une meilleure stabilité de la courroie et compense dans une certaine mesure un désalignement initial.



5. Courroie plate. Matériaux : polyuréthane (< 25 m/s), polyester, aramide revêtu silicone (< 80 m/s)...

a) Rapport de transmission

$$\frac{N_D}{N_d} = \frac{\omega_D}{\omega_d} = \frac{d}{D} = \frac{C_d}{C_D}$$

N_d : vitesse de la petite poulie en tr/min

N_D : vitesse de la grande poulie en tr/min

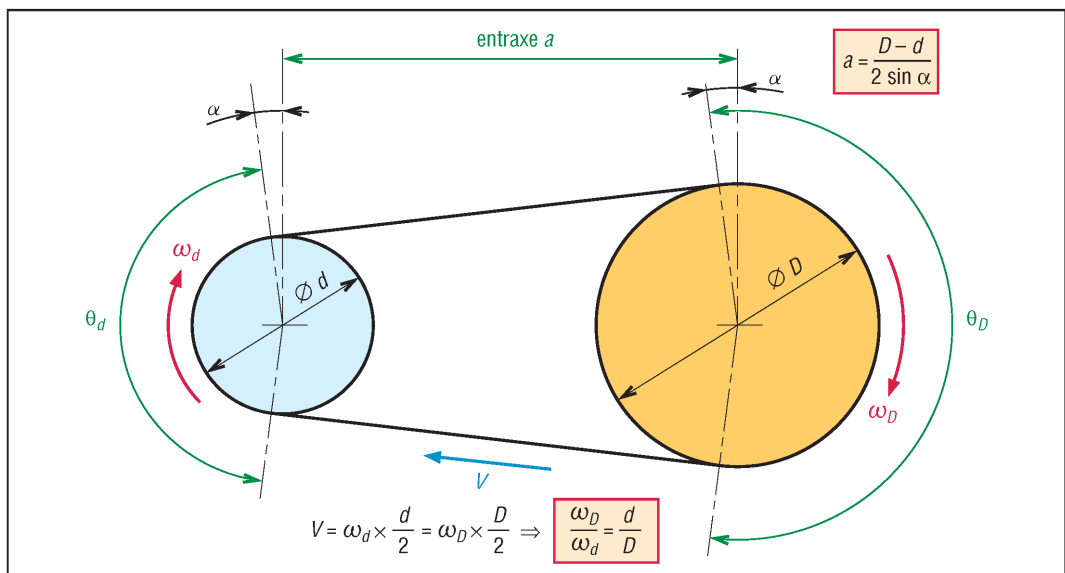
ω_d et ω_D : vitesses en rad/s

d : diamètre d'enroulement petite poulie

D : diamètre d'enroulement grande poulie

C_d : couple sur la petite poulie en N.m

C_D : couple sur la grande poulie en N.m



6. Cinématique.

| Longueurs des courroies et angles d'enroulement (notation $\sin^{-1} = \arcsin$) | | |
|---|---|--|
| courroies non croisées | | courroies croisées |
| angles d'enroulement | longueurs des courroies | |
| $\theta_d = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left[\frac{D-d}{2a} \right]$ | $L = [4.a^2 - (D-d)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} (\theta_D . D + \theta_d . d)$ | $\theta_D = \theta_d = \theta = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left[\frac{D-d}{2a} \right]$ |
| $\theta_D = 180^\circ + 2 \sin^{-1} \left[\frac{D-d}{2a} \right]$ | si α est petit : $L \approx 2a + \pi \left[\frac{D+d}{2} \right] + \frac{(D-d)^2}{4a}$ | $L = [4a^2 - (D+d)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \theta(D+d)$ $L \approx 2a + \pi \left[\frac{D+d}{2} \right] + \frac{(D+d)^2}{4a}$ |

b) Étude dynamique

Cette étude peut être généralisée aux autres courroies.

Données :

T : tension du brin tendu (en N)

t : tension du brin mou « $t < T$ » (en N)

T_0 : tension initiale de la courroie (en N)

f : coefficient de frottement entre poulie et courroie

P : puissance transmissible (en W)

V : vitesse (linéaire) de la courroie (en m/s)

m : masse de 1 m de courroie (kg/m)

$\theta = \theta_d$: arc d'enroulement sur la petite poulie (en rad)

Hypothèse : les forces de frottement entre poulie et courroie sont supposées uniformes sur toute la longueur de l'arc d'enroulement.

Rapport entre les tensions T et t

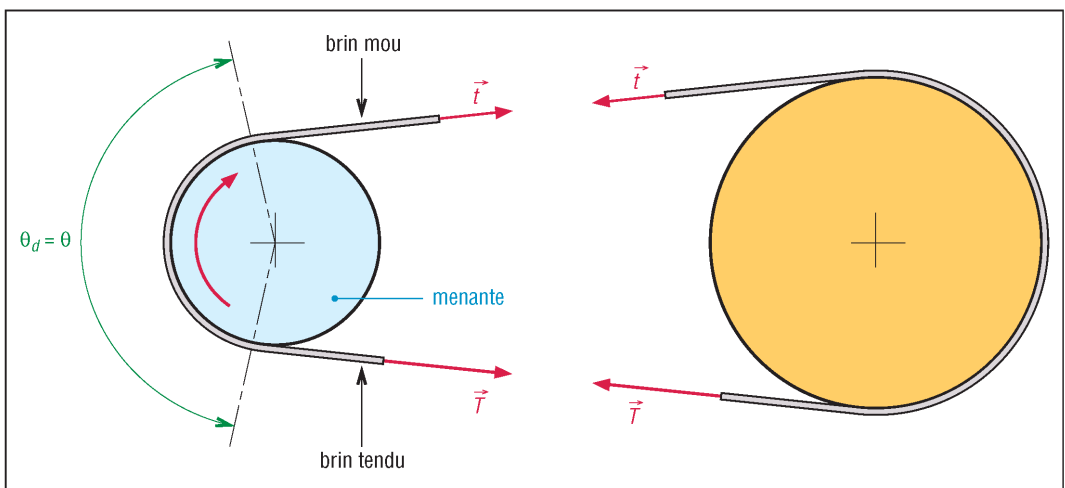
Cas 1 : effets de la force centrifuge sur la courroie négligés

Après une étude statique on obtient :

$$\frac{T}{t} = e^{f \cdot \theta} \text{ (avec } \theta \text{ en rad)}$$

Cas 2, en tenant compte de la force centrifuge (F_c) sur la courroie

$$\frac{T - F_c}{t - F_c} = e^{f \cdot \theta} \text{ (avec } F_c = m \cdot V^2)$$



7. Efforts de tension.

Couples transmis

Sur la grande poulie :
 $C_D = (T - t) \cdot D/2$

Sur la petite poulie :
 $C_d = (T - t) \cdot d/2$

Tension t maximale admissible (T_{maxi})

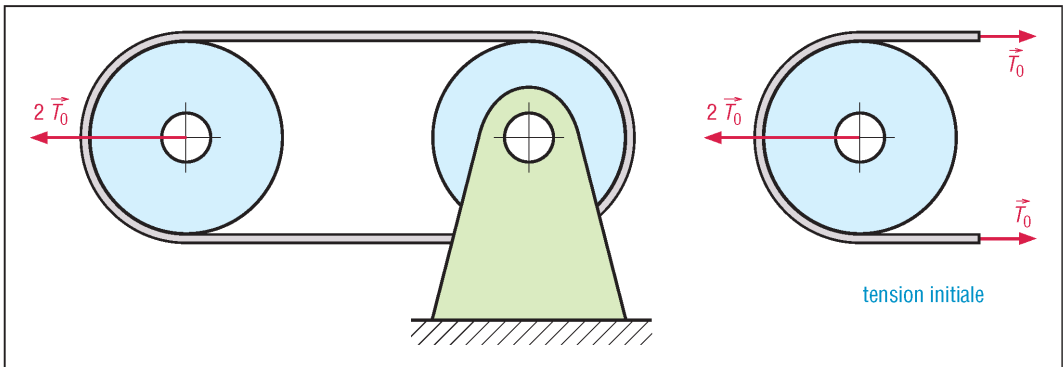
Si T_0 est la tension initiale (appliquée au moment de l'installation) lorsque la courroie tourne à vide ($T \approx t \approx T_0$), en fonctionnement sous charge on a :

$T = T_0 + \delta_F$ (pour le brin tendu)

$t = T_0 - \delta_F$ (pour le brin mou)

Après addition des deux : $T_0 = \frac{1}{2} (T + t)$

T est maximale lorsque t est minimale ($t = 0$) : $T_{maxi} = 2T_0$



8. Tension initiale d'une courroie.

Puissances transmissibles

$P = (T - t) \cdot V$

En fonctionnement normal :

Puissance maximale transmissible (cas où $T_{maxi} = 2T_0$) :

$P = (T_{maxi} - t_{mini}) \cdot V = (2T_0 - 0) \cdot V = 2T_0 \cdot V$

En pratique on pose :

$P = \frac{2 \cdot K_p \cdot K_v \cdot T_0 \cdot V}{K_s}$

P en watts
 T_0 en N
 V en m/s

K_p : coefficient correcteur fonction du diamètre de la poulie

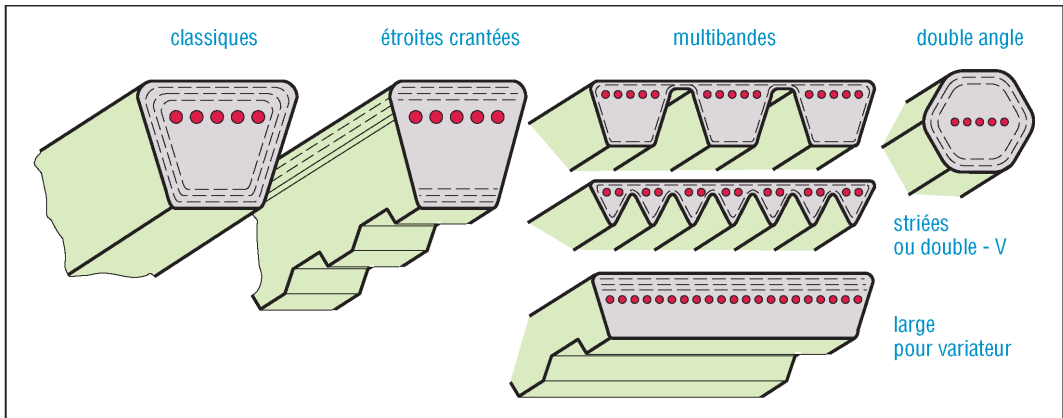
K_v : coefficient correcteur fonction de la vitesse (V) de la courroie

K_s : coefficient correcteur fonction des conditions de service (tableau p. 382)

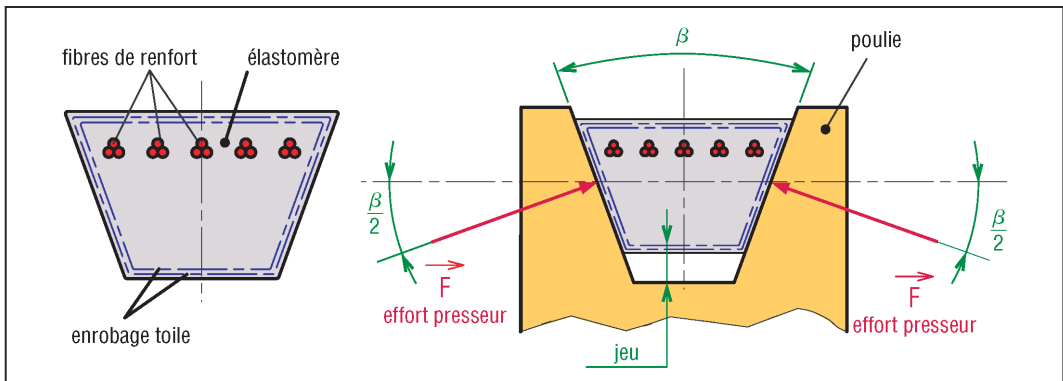
On peut poser $P_b = 2 \cdot K_p \cdot K_v \cdot T_0 \cdot V =$ puissance de base de la courroie avec la condition [$P \cdot K_s \leq P_b$].

| Courroies plates : extrait de dimensions (NF ISO 22) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|-----------------------------|-------|-------|-------|--|
| largeur courroie | 16 | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 63 | 71 | 80 | 90 | diamètres poulies (ISO) d | | | | |
| largeur poulie correspondante | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 63 | 71 | 80 | 90 | 100 | 40 | 50 | 63 | 80 | |
| longueurs préférentielles | 1000 | 1120 | 1250 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 | 2240 | 2500 | | 180 | 200 | 250 | 315 | |
| | 2800 | 3150 | 3550 | 4000 | 4500 | 5000 | | | | | 400 | 500 | 630 | 800 | |
| | | | | | | | | | | | 1 000 | 1 250 | 1 600 | 2 000 | |
| matériaux | Caractéristiques indicatives des courroies plates et rondes | | | | | | | | | | | | | | |
| polyamide (frottement $f = 0,5$ à $0,8$) | épaisseur courroie (mm) | 0,8 | | 1,3 | | 1,8 | | 2,8 | | 3,3 | | 5 | | 6,3 | |
| | diamètre d'enroulement mini sur la poulie (mm) | 15 | | 25 | | 60 | | 60 | | 110 | | 240 | | 340 | |
| élastomère (uréthane... $f = 0,7$) | épaisseur courroie (mm) | 0,9 | | 1,6 | | 2 | | 2,3 | | | | | | | |
| | diamètre d'enroulement mini sur la poulie (mm) | 8 | | 10 à 13 | | 13 à 19 | | 13 à 19 | | | | | | | |
| U : aramide/uréthane C : aramide/chloropr. S : aramide/silicone | épaisseur courroie (mm) | 0,9 (C) | | 1 (U) | | 1,1 (S) | | 1,9 (C) | | 2 (S-U) | | 3 (C) | | | |
| | diamètre d'enroulement mini sur la poulie (mm) | 12 | | 15 | | 15 | | 25 | | 25 | | 50 | | | |
| courroies rondes (polyuréthane polyester $f \approx 0,7$) | diamètre courroie (mm) | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 18 | | |
| | diamètre mini poulie (mm) | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 120 | 150 | 180 | | |

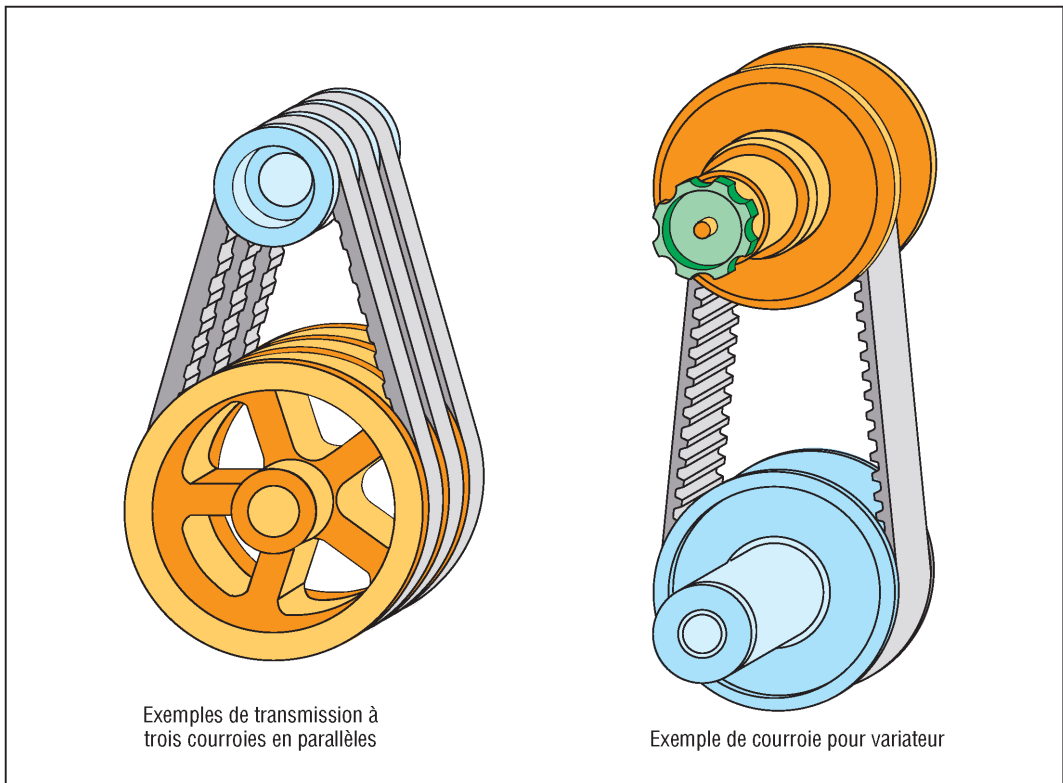
2. Courroies trapézoïdales



9. Principales familles de courroies trapézoïdales.



10. Efforts presseurs exercées par la gorge d'une poulie sur une courroie trapézoïdale.



11. Exemples d'application des courroies trapézoïdales.

Les courroies trapézoïdales sont les plus utilisées ; à tension égale elles transmettent une puissance plus élevée que les courroies plates (conséquence de la forme en V augmentant la pression de contact et par là l'effort transmissible). Vocabulaire NF ISO 1081.

Si une puissance élevée doit être transmise on peut utiliser plusieurs courroies en parallèles sur la même poulie (avec 1, 2, 3..., 10 gorges).

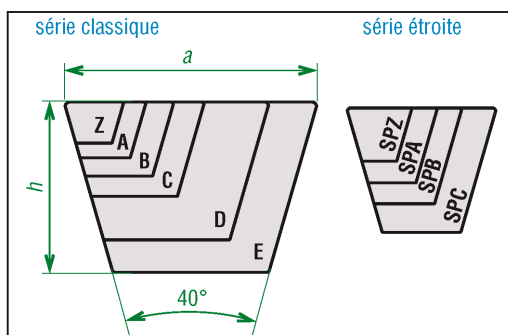
Le montage nécessite un bon alignement des poulies et un réglage de l'entraxe pour le montage et le démontage.

Remarques :

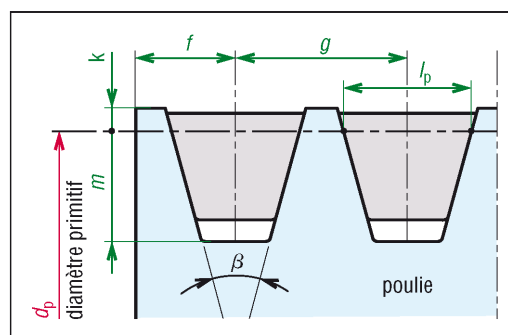
– Pour obtenir de bons résultats et une bonne transmission, la courroie doit aller suffisamment vite (environ 20 m/s).

Les problèmes apparaissent au-dessus de 25 m/s et en dessous de 5 m/s (schématiquement 4 000 tr/min est une bonne vitesse ; des problèmes au-dessus de 5 000 tr/min et au-dessous de 1 000 tr/min).

– Contrairement aux courroies plates, les grands entraxes sont à éviter car les vibrations excessives du brin mou diminue la durée de vie et la précision de la transmission [indications : $a < 3(D+d)$].



12. Séries classiques et étroites.



13. Montage sur une poulie ($\beta = 32^\circ, 34^\circ, 36^\circ, 38^\circ$).

| principales dimensions (en mm) | Principales dimensions trapézoïdales (ISO 4183) | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|-------------|----------------|----------------|
| | série classique | | | | | | série étroite | | | |
| | Z | A | B | C | D | E | SPZ | SPA | SPB | SPC |
| a | 10 | 13 | 17 | 22 | 32 | 38 | 10 | 13 | 16 | 22 |
| h | 6 | 8 | 11 | 14 | 19 | 25 | 8 | 10 | 13 | 18 |
| l_p | 8,5 | 11 | 14 | 19 | 27 | 32 | 8,5 | 11 | 14 | 19 |
| f | 7 | 9 | 11,5 | 16 | 23 | 28 | 7 | 9 | 11,5 | 16 |
| g | 12 | 15 | 19 | 25,5 | 37 | 44,5 | 12 | 15 | 19 | 25,5 |
| k (mini) | 2 | 2,75 | 3,5 | 4,8 | 8,1 | 9,6 | 2 | 2,75 | 3,5 | 4,8 |
| m (mini) | 7 | 8,7 | 10,8 | 14,3 | 19,9 | 23,4 | 9 | 11 | 14 | 19 |
| d_p (usuel) | 50 à 630 | 75 à 800 | 125 à 1 120 | 200 à 2 000 | 355 à 2 000 | 500 à 2 500 | 63 à 630 | 90 à 800 | 140 à 1 120 | 224 à 2 000 |

l_p : longueur primitive ou de référence ; d_p : diamètre primitif ou de référence.
Exemple de désignation : Z1420 (pour courroie classique de longueur 1 420 mm).

La série étroite (SPZ, SPA...) permet des transmissions plus compactes que la série classique (Z, A, B...); les courroies sont plus flexibles et les calculs identiques. Un crantage intérieur augmente la flexibilité et la capacité à dissiper la chaleur aux hautes vitesses.

Les courroies striées ont une action coinçante moins marquée et leur fonctionnement se rapproche plus de celui des courroies plates.

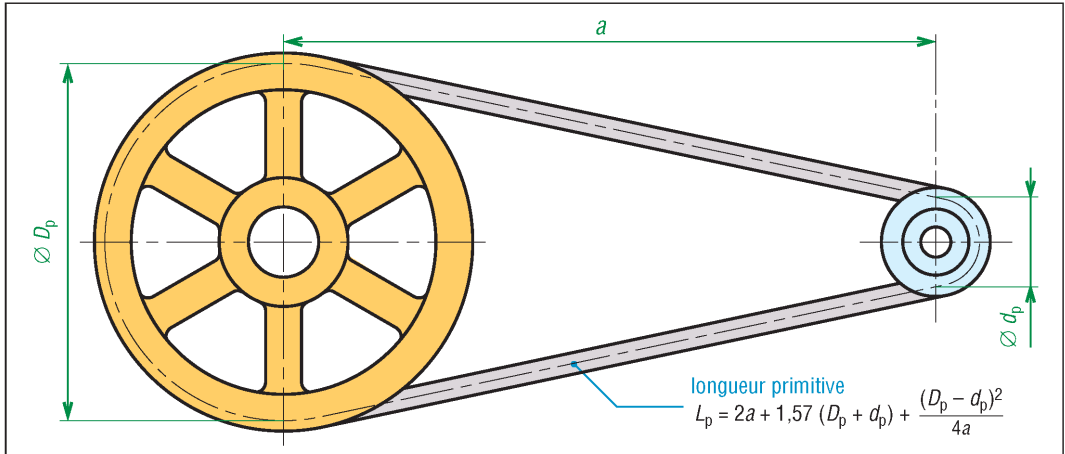
a) Étude générale

Elle est identique à celle des courroies plates sauf que d et D sont remplacés par d_p et D_p , diamètres primitifs des poulies, et que β intervient.

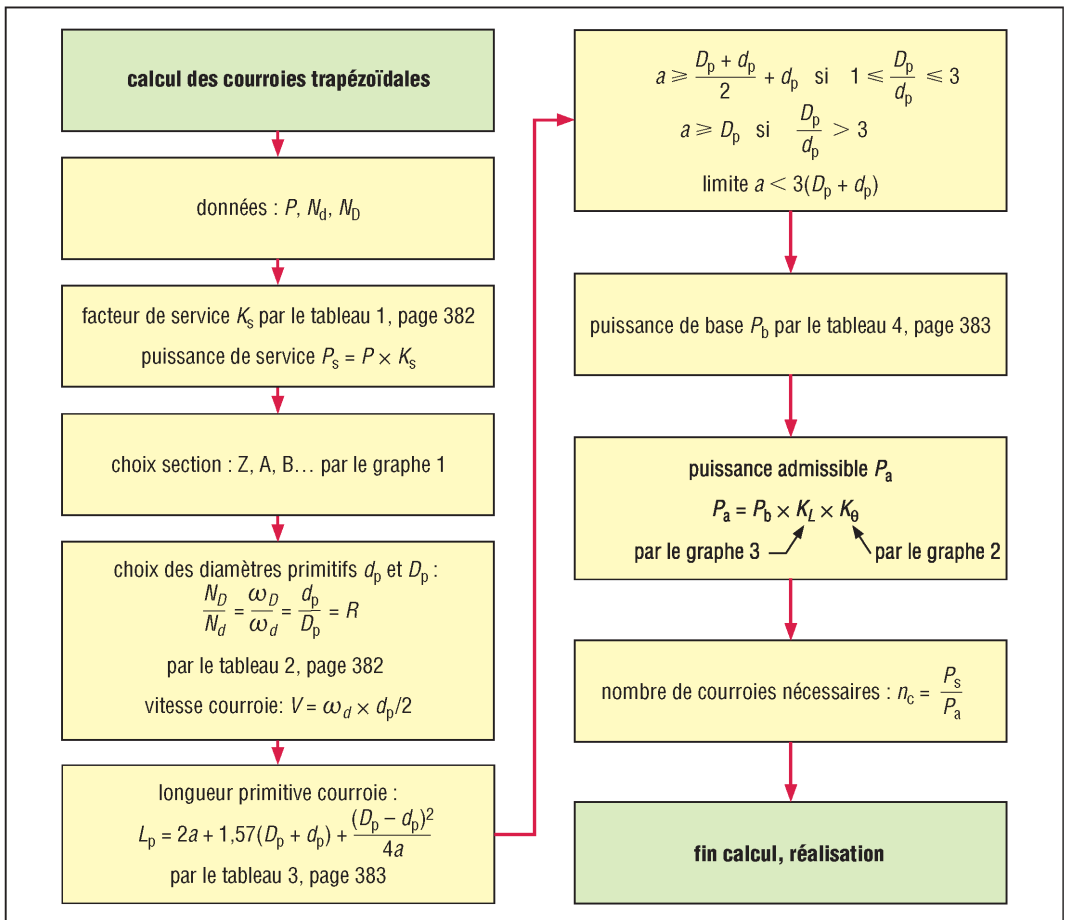
$$\frac{T - F_c}{t - F_c} = e^{f \cdot \theta / \sin(\beta/2)} \quad (\text{avec } F_c = m \cdot V^2)$$

Indication : $3 \leq T/t \leq 5$ et le plus souvent $T \approx 5t$

b) Calcul des courroies trapézoïdales

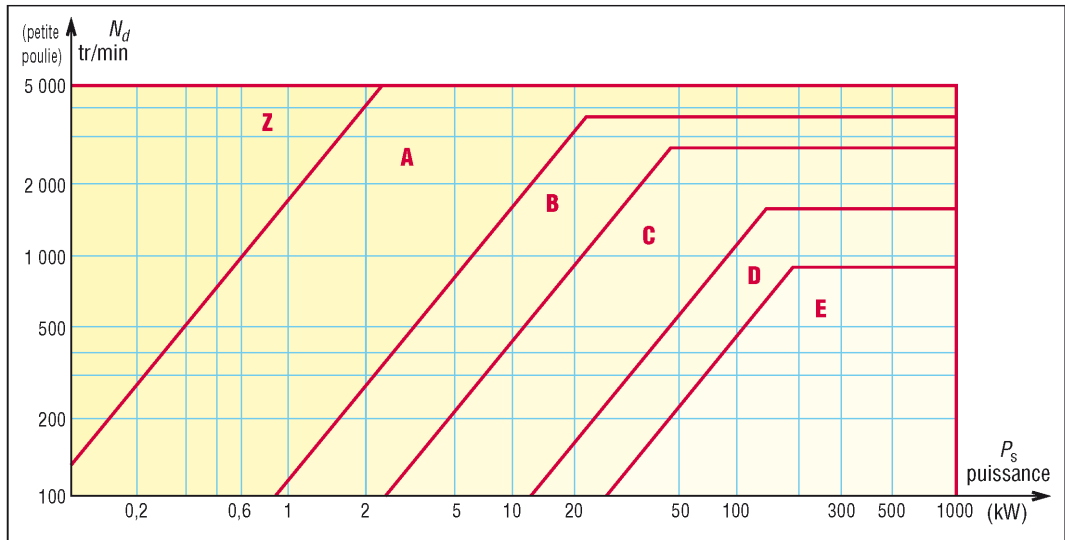


14. Ligne primitive d'une courroie trapézoïdale.



15. Principe de calcul des courroies trapézoïdales.

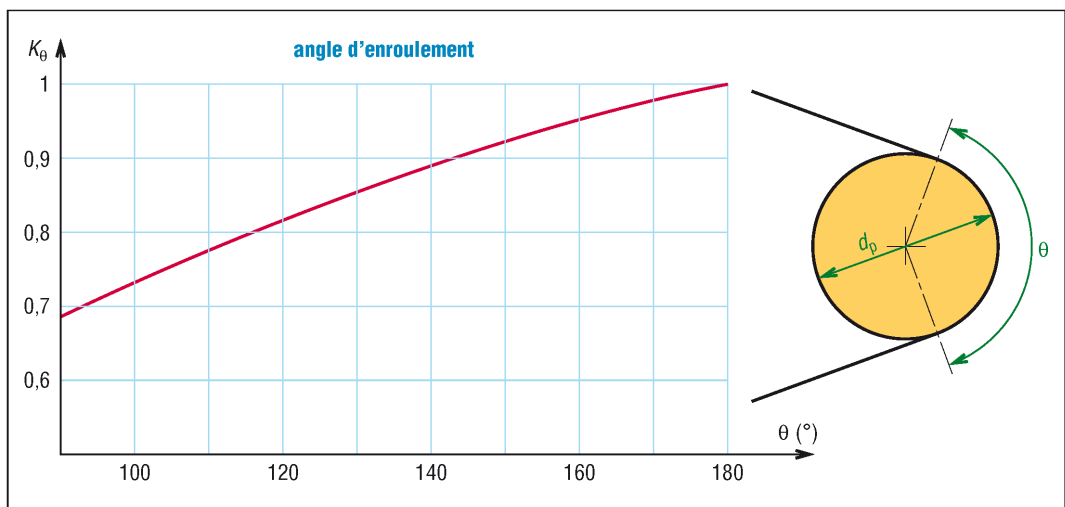
Le principe est résumé par l'organigramme de la figure 15.



16. Graphe 1 : gamme des puissances transmissibles par type de courroie.

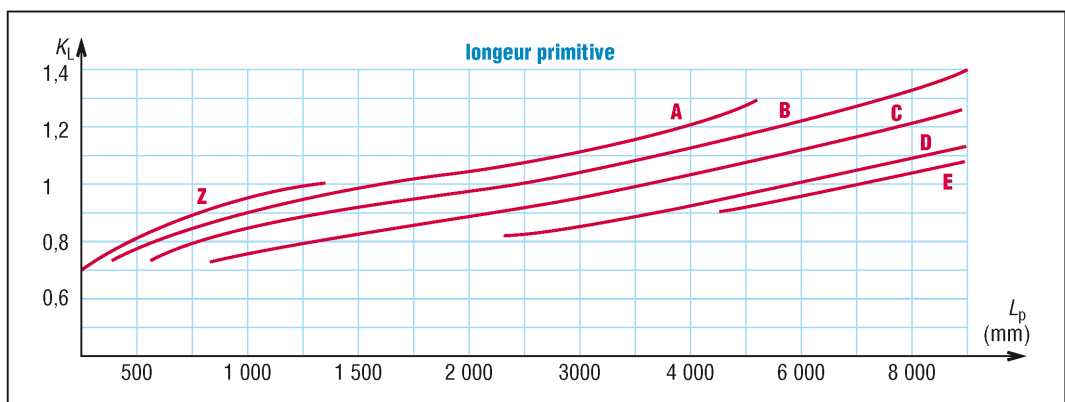
Remarques :

– Plus le diamètre des poulies est grand, plus la durée de vie est grande. Les puissances de base (P_b) indiquées tableau 4, p. 383, en tiennent compte et sont déterminées pour un angle d'enroulement de 180° . Le coefficient K_θ permet de faire les corrections pour des angles d'enroulement différents.



17. Graphe 2.

– Plus la longueur de la courroie est grande, plus la durée de vie est élevée (chaque tronçon de courroie travaillant moins) ; le coefficient K_L permet de faire les corrections.



18. Graphe 3.

Données :
 N_d : vitesse de la petite poulie (tr/min)

 N_D : vitesse de la grande poulie (tr/min)

 d_p : diamètre primitif de la petite poulie

 D_p : diamètre primitif de la grande poulie

 L_p : longueur primitive de la courroie

 l_p : largeur primitive de la section de la courroie

 V : vitesse linéaire de la courroie (m/s)

 P : puissance réelle à transmettre (W)

 P_s : puissance de service ou puissance corrigée

 P_b : puissance de base de la courroie

 P_a : puissance admissible par la courroie

 K_L : coefficient correcteur fonction de la longueur primitive L_p
 K_s : coefficient correcteur lié aux conditions de service de la transmission

 K_θ : coefficient correcteur fonction de l'angle d'enroulement θ
 $\theta = \theta_d$: angle d'enroulement sur la petite poulie

| Poulies : relation entre angle de gorge β et dp | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|-------|-------------|
| Profil | Z SPZ | A SPA | B SPB | C SPC | D | E |
| dp pour $\beta =$ | 38° | > 80 | > 118 | > 190 | > 315 | > 475 > 600 |
| | 36° | – | – | – | – | ≤ 475 ≤ 600 |
| | 34° | ≤ 80 | ≤ 118 | ≤ 190 | ≤ 315 | – |
| | 32° | – | – | – | – | – |

| 1. Valeur du coefficient de service K_s | | | | |
|--|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | service léger 0 à 6 h/jour | service normal 6 à 16 h/jour | service dur 16 à 24 h/jour | service très dur en continu |
| transmission uniforme sans à-coups | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 |
| transmission avec légers à-coups et chocs modérés | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,8 |
| transmission avec à-coups et chocs élevés * | 1,2 | 1,4 | 1,7 | 2,1 |

* avec des inversions de sens, des démarrages fréquents sous forts couples

| 2. Diamètres primitifs d_p et D_p recommandés (mm) pour les poulies trapézoïdales ISO 4183 | |
|--|--|
| Z SPZ | 50*, 56*, 63, 71, 75, 80, 90, 100, 112, 125, 132, 140, 150, 160, 180, 200, 220, 224, 250, 280, 315, 355, 400, 500, 630 |
| A SPA | 75*, 80*, 85*, 90, 95, 100, 106, 112, 121, 125, 132, 140, 150, 160, 180, 200, 224, 250, 280, 300, 315, 355, 400, 450, 500, 630, 710, 800 |
| B SPB | 125*, 132*, 140, 150, 160, 170, 180, 200, 224, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 600, 630, 710, 750, 800, 900, 1 000, 1 120 |
| C SPC | 200* 212*, 224, 236, 250, 265, 280, 300, 315, 335, 355, 400, 450, 500, 560, 600, 630, 710, 750, 800, 900, 1 000, 1 120, 1 250, 1 400, 1 600, 2 000 |
| D | 355, 375, 400, 425, 450, 475, 500, 560, 600, 630, 710, 750, 800, 900, 1 000, 1 060, 1 120, 1 250, 1 400, 1 500, 1 600, 1 800, 2 000 |
| E | 500, 530, 560, 600, 630, 670, 710, 800, 900, 1 000, 1 120, 1 250, 1 400, 1 500, 1 600, 1 800, 1 900, 2 000, 2 240, 2 500 |

* : uniquement courroies classiques Z, A, B et C

| 3. Longueurs primitives ou de référence L _p (en mm des courroies trapézoïdales) | | | | | |
|--|---|-------------|---------------|----------------|--|
| (L* : longueur NF ISO 4184 – les autres longueurs varient sensiblement d'un fabricant à l'autre) | | | | | |
| Z | 270, 295, 340, 380, 405*, 435, 465, 475*, 485, 505, 530*, 545, 570, 610, 625*, 635, 675, 700*, 710, 750, 780*, 790, 840, 895, 920*, 940, 1 000, 1 055, 1 080*, 1 095, 1 145, 1 205, 1 250, 1 330*, 1 420*, 1 540*... | | | | |
| A | 415, 490, 541, 585, 620, 630*, 670, 700*, 719, 770, 790*, 820, 871, 890*, 933, 983, 990*, 1 049, 1 100*, 1 153, 1 201, 1 250*, 1 303, 1 353, 1 405, 1 430*, 1 455, 1 508, 1 550*, 1 608, 1 640*, 1 709, 1 750*, 1 858, 1 913, 1 940*, 2 013, 2 050*, 2 133, 2 200*, 2 273, 2 300*, 2 393, 2 480*, 2 533, 2 700*, 2 833, 3 183... | | | | |
| B | 613, 655, 680, 729, 780, 830, 881, 930*, 980, 1 000*, 1 033, 1 083, 1 100*, 1 133, 1 185, 1 210*, 1 243, 1 318, 1 370*, 1 393, 1 465, 1 560*, 1 668, 1 760*, 1 872, 1 950*, 2 075, 2 180*, 2 283, 2 300*, 2 380, 2 480, 2 500*, 2 659, 2 700*, 2 870*, 3 200*, 3 393, 3 600*, 3 793, 4 060*, 4 430*, 4 820*, 5 043, 5 370*, 5 620, 6 070*, 6 585... | | | | |
| C | 920, 1 075, 1 152, 1 312, 1 462, 1 505*, 1 662, 1 760*, 1 840, 1 950*, 2 094, 2 195*, 2 348, 2 420*, 2 500, 2 715*, 2 907, 2 880*, 3 080*, 3 312, 3 520*, 3 720, 3 964, 4 060*, 4 177, 4 278, 4 600*, 5 015, 5 380*, 5 662, 6 100*, 6 362, 6 815*, 7 035, 7 600*, 8 038, 8 444, 9 100*, 10 062, 10 700*... | | | | |
| D | 2 576, 2 740*, 2 876, 3 100*, 3 226, 3 330*, 3 530, 3 730*, 4 080*, 4 386, 4 620*, 5 029, 5 400*, 5 676, 6 100*, 6 370, 6 840*, 7 126, 7 620*, 8 000, 8 405, 9 140*, 10 700*, 11 276, 12 200*, 13 700*, 15 200*... | | | | |
| E | 4 660*, 5 040*, 5 105, 5 420*, 5 765, 6 100*, 6 505, 6 850*, 7 265, 7 650*, 8 055, 8 410, 8 790, 9 150*, 10 035, 11 230, 12 230*, 13 750*, 15 280*, 16 800*... | | | | |
| Séries étroites | SPZ | SPA | SPB | SPC | L _p (ISO 4184) : 650, 710, 800, 900, 1 000, 1 120, 1 250, 1 400, 1 600, 1 800, 2 000, 2 240, 2 500, 2 800, 3 150, 3 500, 4 000, 4 500, 5 000, 5 600, 6 300, 7 100, 8 000, 9 000, 10 000, 11 200, 12 500 |
| | 630 à 3 550 | 800 à 4 500 | 1 250 à 8 000 | 2 000 à 12 500 | |

| 4. Puissance de base P _b en kW des courroies trapézoïdales classiques | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|---|------|------|------|------|---------------|-------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| type courroie | diamètre primitif | vitesse linéaire V de la courroie (m/s) | | | | | type courroie | diamètre primitif | vitesse linéaire V de la courroie (m/s) | | | | |
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Z | 50 | 0,45 | 0,72 | 0,85 | – | – | C | 180 | 3,92 | 6,10 | 7,33 | 8,32 | – |
| | 60 | 0,62 | 1,05 | 1,35 | – | – | | 210 | 4,59 | 7,38 | 9,40 | 10,86 | 11,76 |
| | 70 | 0,73 | 1,29 | 1,70 | 1,94 | – | | 240 | 4,99 | 8,31 | 10,82 | 12,75 | 14,14 |
| | 80 | 0,83 | 1,48 | 1,97 | 2,30 | 2,41 | | 280 | 5,50 | 9,27 | 12,26 | 14,70 | 16,50 |
| | 90 | 0,90 | 1,61 | 2,18 | 2,58 | 2,76 | | 320 | 5,83 | 9,96 | 13,34 | 16,10 | 18,29 |
| | 100 | 0,95 | 1,72 | 2,37 | 2,80 | 3,04 | | 360 | 6,14 | 10,56 | 14,16 | 17,19 | 19,69 |
| | 110 | 1,00 | 1,82 | 2,48 | 2,99 | 3,27 | | 430 | 6,55 | 11,25 | 15,32 | 18,68 | 21,43 |
| A | 85 | 1,25 | 2,04 | 2,66 | 3,01 | – | D | 290 | 8,92 | 13,44 | 15,95 | 16,80 | – |
| | 100 | 1,42 | 2,37 | 3,12 | 3,99 | 4,10 | | 320 | 9,84 | 15,41 | 18,90 | 20,74 | 20,92 |
| | 115 | 1,55 | 2,64 | 3,52 | 4,21 | 4,73 | | 360 | 10,94 | 17,50 | 22,07 | 24,96 | 26,19 |
| | 130 | 1,65 | 2,85 | 4,04 | 4,60 | 5,22 | | 400 | 11,80 | 19,20 | 24,61 | 28,33 | 30,42 |
| | 150 | 1,75 | 3,03 | 4,10 | 4,80 | 5,72 | | 460 | 12,78 | 21,18 | 27,55 | 32,29 | 34,37 |
| | 170 | 1,82 | 3,19 | 4,33 | 5,00 | 6,10 | | 520 | 13,58 | 22,71 | 29,85 | 35,35 | 39,20 |
| | 190 | 1,87 | 3,30 | 4,54 | 5,55 | 6,39 | | 580 | 14,16 | 23,96 | 31,64 | 37,76 | 42,80 |
| B | 120 | 2,11 | 3,23 | 4,23 | 4,80 | – | E | 440 | 10,97 | 18,85 | 24,69 | 28,33 | 29,44 |
| | 140 | 2,35 | 3,95 | 5,02 | 5,83 | 6,37 | | 480 | 11,89 | 20,65 | 27,39 | 31,92 | 33,91 |
| | 160 | 2,57 | 4,03 | 5,61 | 6,63 | 7,37 | | 520 | 12,62 | 22,15 | 29,63 | 34,95 | 37,68 |
| | 180 | 2,72 | 4,39 | 6,09 | 7,24 | 8,14 | | 600 | 13,84 | 24,57 | 33,28 | 39,86 | 43,75 |
| | 200 | 2,81 | 4,81 | 6,42 | 7,71 | 8,75 | | 700 | 14,94 | 27,26 | 36,66 | 44,28 | 49,35 |
| | 220 | 2,92 | 4,89 | 6,73 | 8,13 | 9,24 | | 800 | 15,77 | 28,50 | 39,18 | 47,60 | 53,56 |
| | 250 | 3,01 | 5,06 | 6,89 | 8,64 | 8,85 | | 950 | 16,82 | 30,40 | 42,00 | 51,40 | 59,13 |

Les puissances P_b indiquées sont des moyennes et peuvent varier sensiblement d'un fabricant à l'autre (consulter leurs catalogues pour des renseignements plus détaillés)

c) Exemple de calcul

Soit à déterminer les courroies transmettant une puissance de 10 kW entre un moteur électrique (1 500 tr/min) et une machine de production (600 tr/min) travaillant de 6 à 15 h/jour.

Résolution

On adopte un K_s de 1,3 pour l'installation.

$$P_s = P \cdot K_s = 10 \cdot 1,3 = 13 \text{ kW}$$

Le graphe 1 (fig. 16) permet de sélectionner les courroies de type B.

Diamètres primitifs

$d_p = 140 \text{ mm}$ est imposé pour la petite poulie.

Pour la grande poulie :

$$\frac{N_D}{N_d} = \frac{d_p}{D_p} = \frac{600}{1\,500} = 0,4 \quad \text{d'où} \quad D_p = \frac{d_p}{0,4} = 350 \text{ mm}$$

Vitesse linéaire de la courroie

$$V = \frac{\pi \cdot N_d \cdot d}{30 \cdot 2} = \frac{\pi \times 1\,500 \cdot 140}{30 \cdot 2} = 10\,995 \text{ mm/s} \approx 11 \text{ m/s}$$

Entraxe a

avec $D_p/d_p = 2,5$ on prend $a \geq \frac{1}{2}(D_p + d_p) + d_p = 385 \text{ mm} = a_{\text{mini}}$

limite supérieure : $a < 3(D_p + d_p) = 1\,470 = a_{\text{maxi}}$

Pour des raisons d'encombrement et compte tenu du tableau 3, p. 383, on retient $a = 437 \text{ mm}$

Longueur primitive courroie :

$$L_p = 2 \times 437 + 1,57(350 + 140) + (350 - 140)^2 / (4 \cdot 437) = 1\,668 \text{ mm}$$

Puissance de base de la courroie (tableau 4, p. 383, avec $d_p = 140$ et $V = 11 \text{ m/s}$) :

$P_b = 4,16 \text{ kW}$ (obtenue par interpolation entre 3,95 et 5,02)

Puissance admissible de la courroie choisie : $P_a = P_b \cdot K_L \cdot K_\theta$

$K_L \approx 0,94$ (graphe 3 avec $L_p = 1668$) ; $K_\theta \approx 0,93$ (graphe 2 avec $\theta = 152,19^\circ$)

$$\theta = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left[\frac{D_p - d_p}{2a} \right] = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left[\frac{350 - 140}{2 \times 437} \right] = 152,19^\circ$$

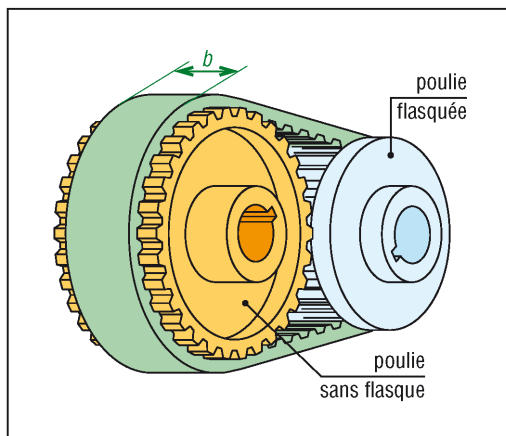
$$P_a = 4,16 \cdot 0,94 \cdot 0,93 = 3,64 \text{ kW}$$

Nombre nécessaire de courroies : $n_c = 13/3,64 = 3,57$ (soit 4 courroies)

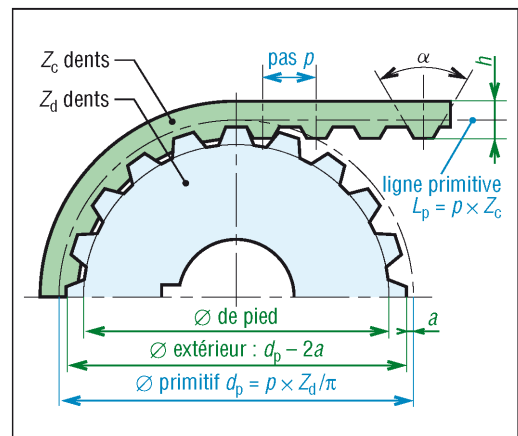
3. Courroies crantées (ou synchrones)

On peut les considérer comme des courroies plates avec des dents. Elles fonctionnent par engrènement, sans glissement, comme le ferait une chaîne mais avec plus de souplesse.

Contrairement aux autres courroies, elles supportent bien les basses vitesses et exigent une tension initiale plus faible. Elles existent en double denture (types A et B).



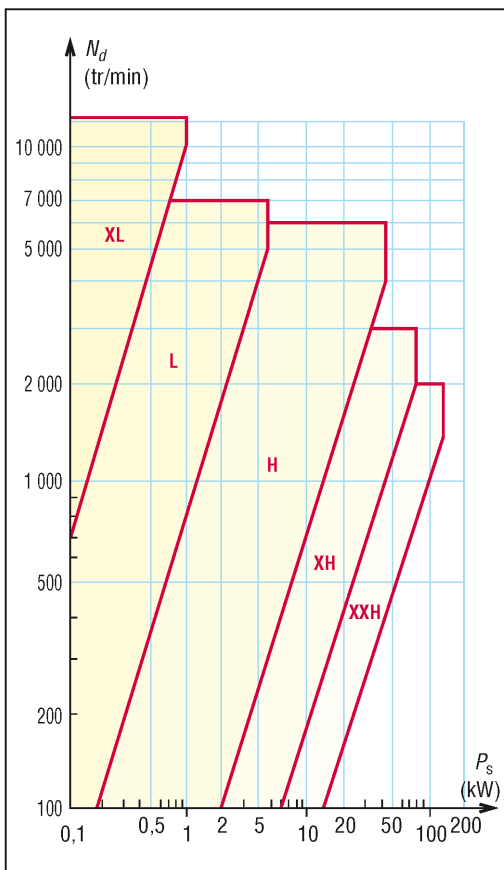
19. Exemple de transmission par courroie crantée.



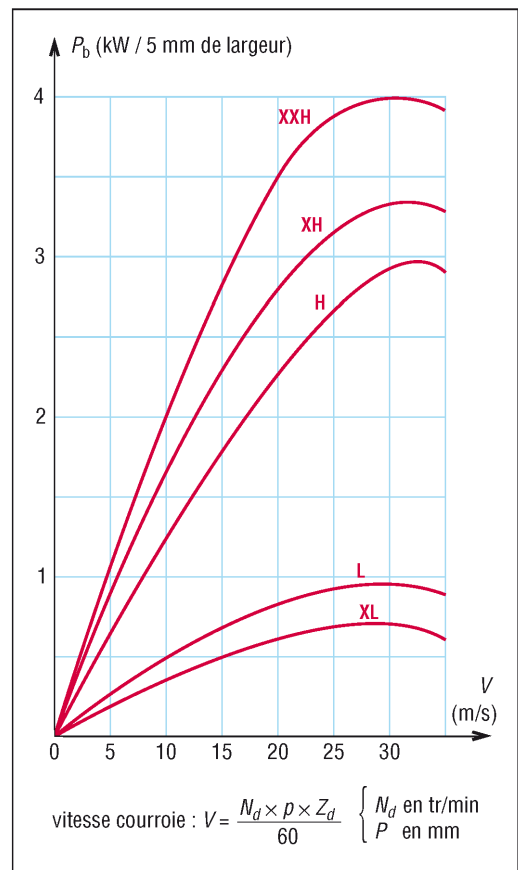
20. Caractéristiques des courroies crantées.

| Dimensions des principales courroies crantées (NF ISO 5294 et 5296) | | | | | | | |
|---|---------|------------|---------|------------------|----------------------------------|--|----------|
| type | pas p | | h mm | α deg. | largeur courroie mm | nombre de dents Z_c longueur primitive courroie $L_p = p \cdot Z_c$ | 2a mm |
| | mm | pouces (") | | | | | |
| MXL | 2,032 | 0,080 " | 1,14 | 40 | 3,2 - 4,8 - 6,4 | 45, 50, 55, 60, 70, 75, 80, 90, 100, 110, 125, 140, 155, 175, 200, 225, 250 | 0,508 |
| XXL | 3,175 | 1/8 " | 1,52 | 50 | 3,2 - 4,8 - 6,4 | 40, 48, 56, 64, 72, 80, 88, 96, 104, 112, 120, 128, 144, 160, 176 | 0,508 |
| XL (extra légère) | 5,08 | 1/5 " | 2,3 | 50 | 6,4 - 7,9 - 9,5 | 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130 | 0,508 |
| L (légère) | 9,525 | 3/8 " | 3,6 | 40 | 12,7 - 19,1 - 25,4 | 33, 40, 50, 56, 60, 64, 68, 72, 76, 80, 86, 92, 98, 104, 112, 120, 128, 136, 144, 160 | 0,762 |
| H lourde | 12,70 | 1/2 " | 4,3 | 40 | 19,1 - 25,4 - 38,1 - 50,8 - 76,2 | 48, 54, 60, 66, 72, 78, 84, 90, 96, 102, 108, 114, 120, 126, 132, 140, 150, 160, 170, 180, 200, 220, 250, 280, 340 | 1,372 |
| XH (extra lourde) | 22,23 | 7/8 " | 11,2 | 40 | 50,8 - 76,2 - 101,6 | 58, 64, 72, 80, 88, 96, 112, 128, 144, 160, 176, 200 | 2,794 |
| XXH (renforcée) | 31,75 | 1" 1/4 | 15,7 | 40 | 50,8 - 76,2 - 101,6 - 127 | 56, 64, 72, 80, 96, 112, 128, 144 | 3,048 |

| Poulies pour courroies synchrones – NF ISO 5294 | | | |
|---|----------------------------------|--|---|
| diamètre primitif poulie ($p = \text{pas}$) : $d_p = p \cdot Z_d / \pi$ | | diamètre extérieur poulie : $d_o = d_p + 2a$ | |
| type | largeurs nominales poulie (mm) | 2a (mm) | Z_d nombre de dents pour chaque largeur |
| MXL et XXL | 3,2 - 4,8 - 6,4 | 0,508 | 10 - 11 - 12 - 13 - 14 - 15 - 17 - 18 - 19 - 20 - (21) - 22 - (23) - |
| XL | 6,4 - 7,9 - 9,5 | 0,508 | (24) - 25 - (26) - (27) - 28 - (30) - 32 - 36 - 40 - 48 - 60 - 72 |
| L | 12,7 - 19,1 - 25,4 | 0,762 | idem ci-dessus avec 84 - 96 - 120 |
| H | 19,1 - 25,4 - 38,1 - 50,8 - 76,2 | 1,372 | idem L avec 156 et sauf 10 - 11 - 12 - 13 |
| XH | 50,8 - 76,2 - 101,6 | 2,794 | 18 - 19 - 20 - (21) - 22 - (23) - (24) - 25 - (26) - (27) - 28 - (30) - |
| XXH | 50,8 - 76,2 - 101,6 - 127 | 3,048 | 32 - 36 - 40 - 48 - 60 - 72 - 84 - 96 - 120 |



21. Graphe 4 : (gamme) puissances transmissibles des courroies crantées.



22. Graphe 5 : puissance de base des courroies crantées.

Calcul des courroies crantées

Il est analogue à celui des autres courroies. Vocabulaire NF ISO 5288.

Rapport de transmission

$$\frac{N_D}{N_d} = \frac{d_p}{D_p} = \frac{Z_d}{Z_D} = \frac{C_d}{C_D}$$

Z_d : nombre de dents de la petite poulie

Z_D : nombre de dents de la grande poulie

Puissance de service : $P_s = P \cdot K_s$ (K_s par tableau 1, p. 382)

Détermination du pas, ou du type de la courroie par l'intermédiaire du graphe 4 (à partir de P_s et N_d la vitesse de la petite poulie).

Vitesse linéaire V de la courroie : $V = N_d \cdot p \cdot Z_d / 60$

Remarque : $\pi \cdot d_p = p \cdot Z_d =$ circonférence primitive de la petite poulie

Puissance de base (P_b) de la courroie choisie par l'intermédiaire du graphe 5 ; les P_b indiquées le sont pour une largeur de référence de 5 mm.

Choix de la largeur de la courroie sachant que $P_b \cdot K_b \geq P_s$

K_b coefficient correcteur fonction de la largeur des courroies (tableau ci-dessous)

| Coefficient correcteur K_b fonction de la largeur des courroies crantées | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|--------|--------|------|--------------|--------------|--------------|-------|
| K_b | 0,84 | 1,10 | 1,45 | 2,20 | 3,6 | 5,1 | 7,9 | 10,9 | 17,1 | 24,2 | 31,2 |
| b (mm) | 6,4 | 7,9 | 9,5 | 12,7 | 19,1 | 25,4 | 38,1 | 50,8 | 76,2 | 101,6 | 127,0 |
| type de courroie | XL | XL | XL | L | L et H | L et H | H | H, XH et XXH | H, XH et XXH | H, XH et XXH | XXH |
| Coefficient correcteur K_z | | | | | | | | | | | |
| nombre de dents en prise (Z_{pr}) | 6 | | 5 | | 4 | | 3 | | 2 | | |
| K_z | 1,0 | | 0,8 | | 0,6 | | 0,4 | | 0,2 | | |
| $Z_{pr} = Z_d \cdot \left(0,5 - \frac{\rho(Z_D - Z_d)}{2\pi^2 a} \right)$ avec Z_D : nombre de dents grande roue Z_d : nombre de dents petite roue a : entraxe et ρ : pas | | | | | | | | | | | |

Remarque : si l'on a moins de 6 dents en prise ($Z_{pr} < 6$) sur la petite poulie, il faut utiliser le coefficient correcteur supplémentaire K_z ($P_b \cdot K_b \cdot K_z \geq P_s$)

II – Transmissions par roues et chaînes

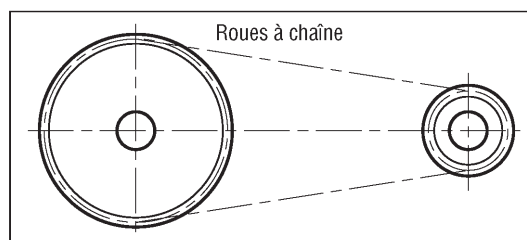
Les chaînes sont utilisées en transmission de puissance mais aussi en manutention et convoyage et dans de nombreuses réalisations. Principales familles et vocabulaires : NF ISO 13203. Fabricant : Sedis...

1. Principales caractéristiques

- Rapport de transmission constant (pas de glissement).
- Longues durées de vie.
- Aptitude à entraîner plusieurs arbres récepteurs en même temps à partir d'une même source.
- Sont essentiellement utilisées aux « basses » vitesses (moins de 13 m/s pour les chaînes à rouleaux, moins de 20 m/s pour les chaînes silencieuses).
- Montage et entretien plus simples que celui des engrenages et prix de revient moins élevé.

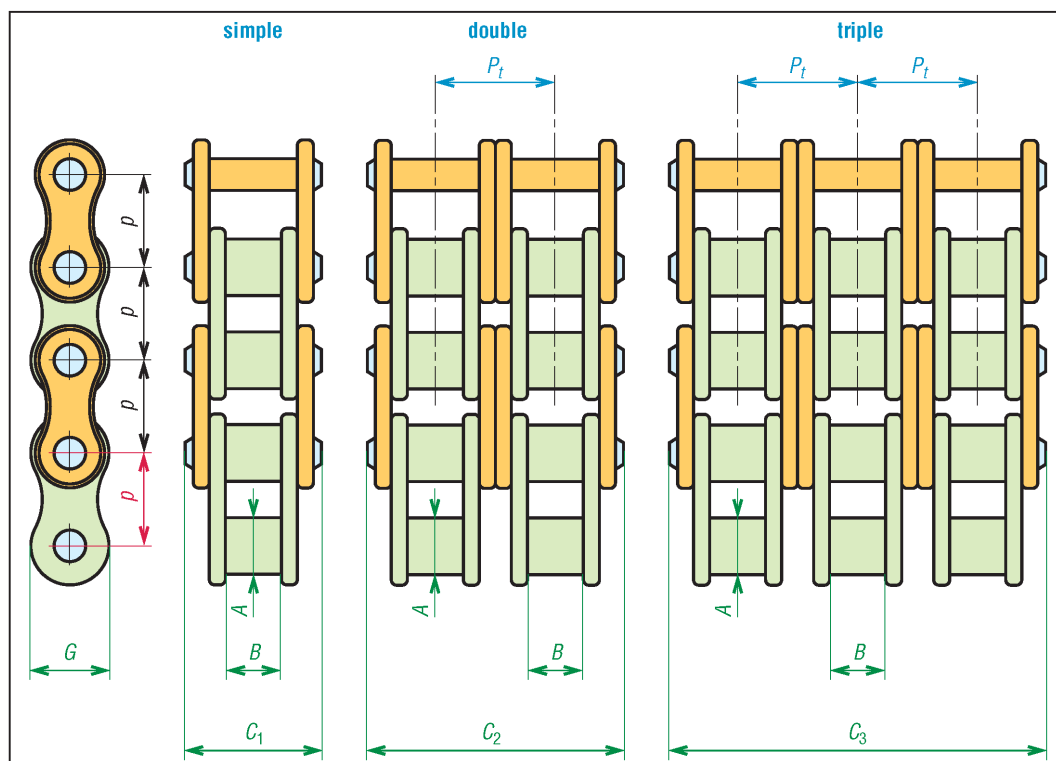
2. Comparaison avec les courroies

- Sont plus bruyantes.
- Présentent des durées de vie plus élevées.
- Supportent des forces de tension plus élevées.
- « Tournent » moins vite.
- Supportent des conditions de travail plus rudes (températures plus élevées...).
- Nécessitent une lubrification.



23a. Dessin normalisé NF EN ISO 2203.

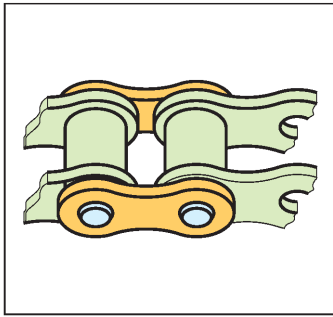
3. Chaînes à rouleaux



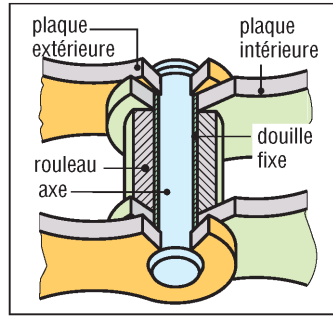
23b. Dimensions des chaînes à rouleaux (NF ISO 606). Désignation : 16B-1 (simple) ; 16B-2 (chaîne double).

| Caractéristiques des principales chaînes à rouleaux (NF ISO 606) | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|---------|---------|-------------|---------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|--------|--------|
| symbole | pas p mm | A mm | B mm | P_t mm | G mm | C_1 mm | C_2 mm | C_3 mm | rupture en traction (daN) | | |
| | | | | | | | | | simple | double | triple |
| 05B | 8 | 5,00 | 3,00 | 5,64 | 7,11 | 8,6 | 14,3 | 19,9 | 440 | 785 | 1 110 |
| 06B | 9,52 | 6,35 | 5,72 | 10,24 | 8,26 | 13,5 | 23,8 | 34,0 | 895 | 1 690 | 2 490 |
| 08B | 12,7 | 8,51 | 7,75 | 13,92 | 11,81 | 17,0 | 31,0 | 44,9 | 1 780 | 3 110 | 4 450 |
| 10B | 15,875 | 10,16 | 9,65 | 16,59 | 14,73 | 19,6 | 36,2 | 52,8 | 2 220 | 4 450 | 6 670 |
| 12B | 19,05 | 12,07 | 11,68 | 19,46 | 16,13 | 22,7 | 42,2 | 61,7 | 2 890 | 5 780 | 8 670 |
| 16B | 25,40 | 15,88 | 17,02 | 31,88 | 21,08 | 36,1 | 68,0 | 99,9 | 6 000 | 10 600 | 16 000 |
| 20B | 31,75 | 19,05 | 19,56 | 36,45 | 26,42 | 43,2 | 79,7 | 116,1 | 9 500 | 17 000 | 25 000 |
| N° 40 ou 08A | 12,7 | 7,92 | 7,85 | 14,38 | 12,07 | 17,8 | 32,3 | 46,7 | 1 390 | 2 780 | 4 170 |
| N° 50 ou 10A | 15,875 | 10,16 | 9,40 | 18,11 | 15,09 | 21,8 | 39,9 | 57,9 | 2 180 | 4 360 | 6 540 |
| N° 60 ou 12A | 19,05 | 11,91 | 12,57 | 22,78 | 18,10 | 26,9 | 49,8 | 72,6 | 3 130 | 6 260 | 9 390 |
| N° 80 ou 16A | 25,4 | 15,88 | 15,75 | 29,29 | 24,13 | 33,5 | 62,7 | 91,9 | 5 560 | 11 120 | 16 680 |
| N°100 ou 20A | 31,75 | 19,05 | 18,90 | 35,76 | 30,7 | 41,1 | 77,0 | 113,0 | 8 700 | 17 400 | 26 100 |
| N°120 ou 24A | 38,1 | 22,23 | 25,22 | 45,44 | 36,2 | 50,8 | 96,3 | 141,7 | 12 500 | 25 000 | 37 500 |

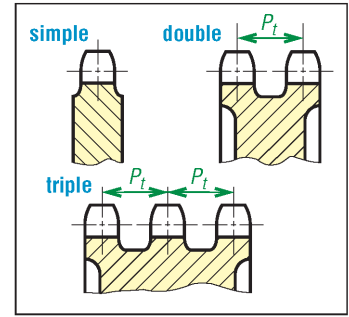
Les chaînes à rouleaux sont les plus utilisées en transmission de puissance ; elles ont des vitesses limites de 12 à 15 m/s ; leurs rapports limites de transmission vont de 6 à 9. Configuration usuelle : chaîne et roues dans un même plan vertical (dans un plan horizontal la chaîne « saute »). La série A(08A...) est d'origine USA, la B européenne.



24. Chaîne à rouleaux.

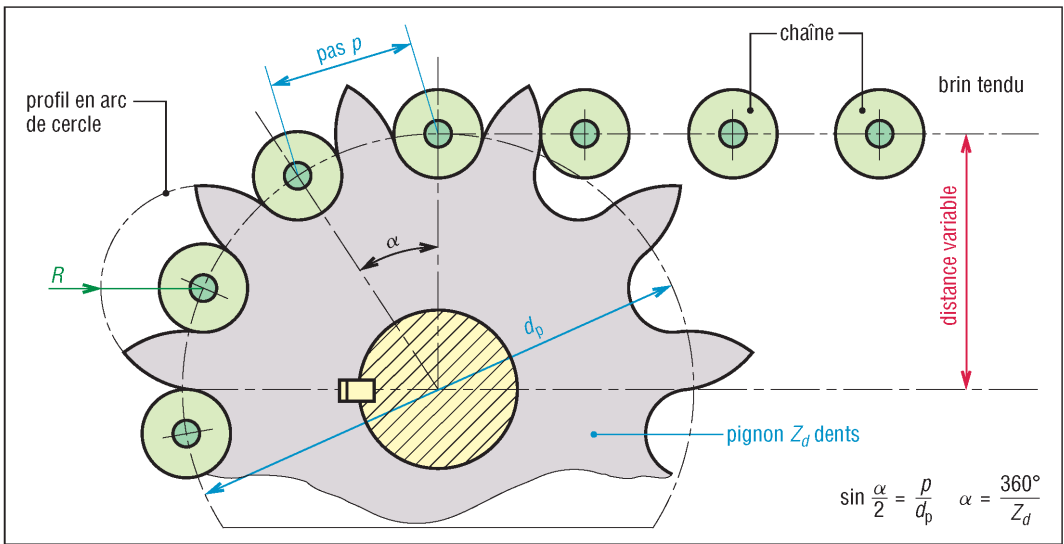


25. Principaux constituants.

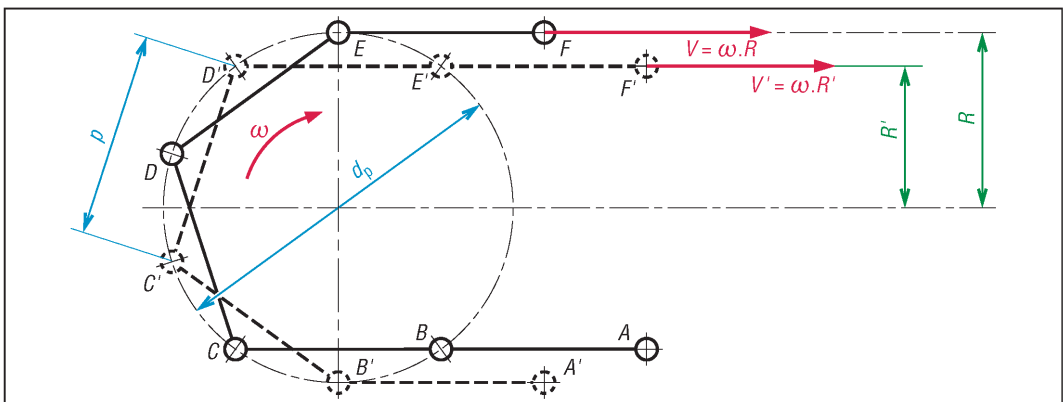


26. Principales dimensions.

a) Inconvénient, l'effet de corde : il se fait sentir aux vitesses élevées avec des roues ayant un faible nombre de dents. Suivant l'angle de rotation, la distance entre la chaîne et le centre de la roue varie, ce qui provoque des irrégularités de transmission et des vibrations.
Compromis : à partir et au-dessus de 17, 19 ou 21 dents les résultats (durée de vie, bruit...) sont convenables (fig. 27, 28, 29, 30) et utilisation d'un coefficient K_r pour les calculs.



27. Engrenement entre chaîne et pignon.



28. Principe de l'effet de corde.

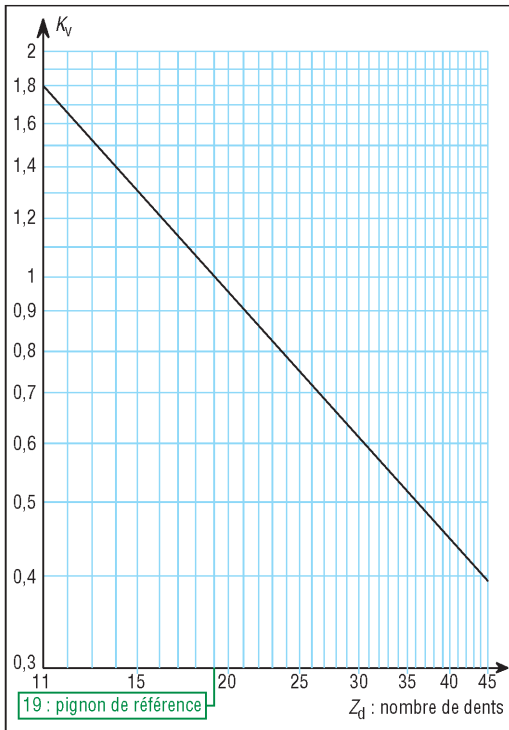
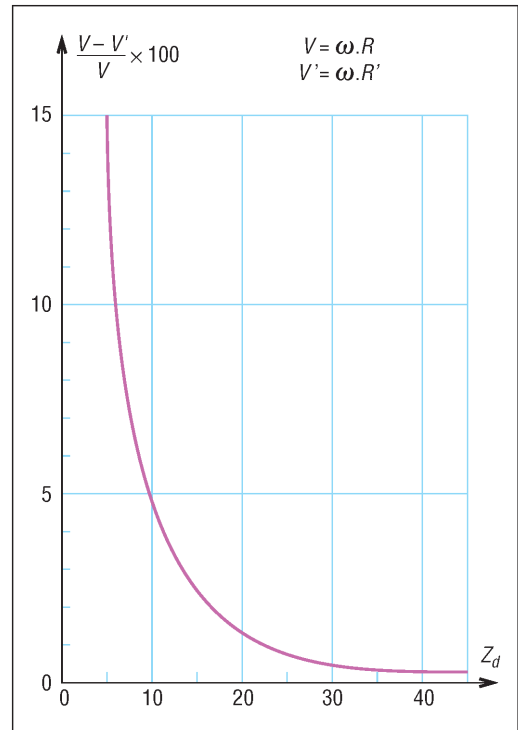
b) Calcul des chaînes à rouleaux

Il est analogue à celui des courroies crantées (principe retenu par la norme NF ISO 10823).

– Rapport de transmission

$$\frac{N_D}{N_d} = \frac{d_p}{D_p} = \frac{Z_d}{Z_D} = \frac{C_d}{C_D}$$

$$\frac{1}{3} \leq \text{rapports usuels normaux} \leq 3$$

29. Coefficient correcteur K_v en fonction de Z_d .30. Fluctuation de la vitesse V due à l'effet de corde.

Z_d : nombre de dents de la petite roue (pignon)
 Z_D : nombre de dents de la grande roue (≤ 114)
 – Diamètre primitif d'une roue de Z dents :

$$d_p = \frac{p}{\sin(\alpha/2)} = \frac{p}{\sin(180^\circ/Z)}$$

– Angle d'enroulement :

$$\theta = \theta_d = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left[\frac{D_p - d_p}{2a} \right] \geq 120^\circ$$

– Puissance de service ou puissance corrigée : $P_s = P \cdot K_s$ (K_s par tableau 1, p. 382)

– Vitesse linéaire de la chaîne :

$$V = \frac{N_d \cdot p \cdot Z_d}{60\,000} \quad \text{avec } V \text{ en m/s et } p \text{ en mm}$$

Remarque : $\pi \cdot d_p = p \cdot Z_d =$ circonférence primitive de la petite roue.

– Détermination de la puissance corrigée : $P_c = P_s \cdot K_v \cdot K_R \leq P_b$.

K_v : coefficient correcteur fonction du nombre de dents Z_d (fig. 29).

K_R coefficient correcteur tenant compte du nombre de rangées (tableau p. 390)

P_b tient compte du type de lubrification, et la puissance de base des chaînes (fig. 32 et 33).

Détermination du pas ou du type de la chaîne par l'intermédiaire des graphes 6 (fig. 32) et 7 (fig. 33) à partir de P_b et N_d la vitesse de la roue menante (petite roue).

longueur primitive
de la chaîne (a : entraxe)

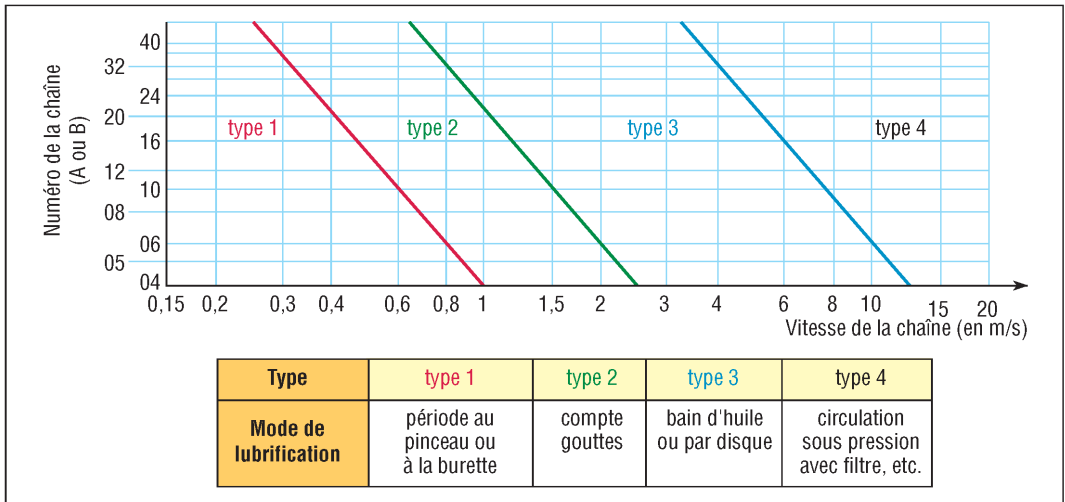
$$L_p = 2a + \frac{p(Z_d + Z_D)}{2} + \frac{p^2}{a} \left[\frac{Z_D - Z_d}{2\pi} \right]^2$$

longueur primitive exprimée
en nombre de maillons

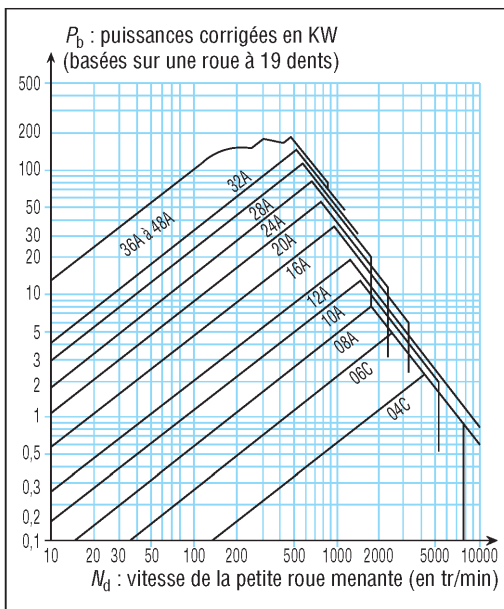
$$X_o = \frac{L_p}{p} = \frac{2a}{p} + \frac{Z_d + Z_D}{2} + \frac{(Z_D - Z_d)^2}{4\pi^2 (a/p)}$$

| Applications normales | Grandes vitesses, surcharges... |
|---|---------------------------------|
| $Z_d \geq 17$ | $Z_d \geq 25$ |
| entraxes recommandés : $30p \leq a \leq 50p$ | |

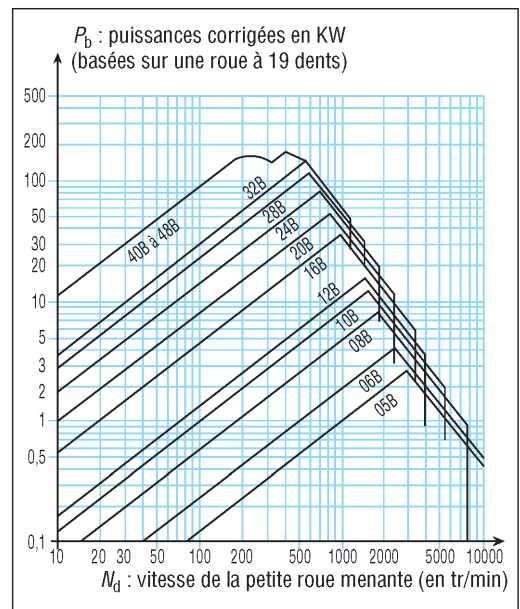
| Coefficient correcteur K_R | | | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|-----------|-----------|----------|
| type de la chaîne | simple | double | triple | quadruple | quintuple | sextuple |
| nombre de rangées | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| K_R | 1 | 0,57 | 0,4 | 0,32 | 0,27 | 0,23 |



31. Choix du mode de lubrification



32. Graphe 6 : puissance de base des chaînes A.



33. Graphe 7 : puissance de base des chaînes B.

Exemple : moteur électrique de 380 W entraînant un pignon de 25 dents à 50 tr/min ; rapport transmission 0,431 ; chargement irrégulier ; entraxe 590 mm environ ; choix d'une chaîne double pour limiter le pas et l'encombrement.

Résolution : $P_s = P \cdot K_s = 380 \cdot 1,4 = 532 \text{ W}$.

Deux rangées : $K_R = 0,57$; 25 dents : $K_V = 0,75$; $P_C = 532 \times 0,57 \times 0,75 = 227,4 \text{ W}$.

Graphe 7 donne chaîne 08B, pas 12,7 mm, largeur 31 mm.

$Z_D = 25/0,431 = 58$ dents

$$L_p = 2 \times 590 + \frac{12,7(25 + 58)}{2} + \frac{12,7^2}{590} \left(\frac{58 - 25}{2\pi} \right)^2 = 1\,714,6 \text{ mm} ; X_a = 135.$$

33

ACCOUPEMENTS EMBRAYAGES FREINS

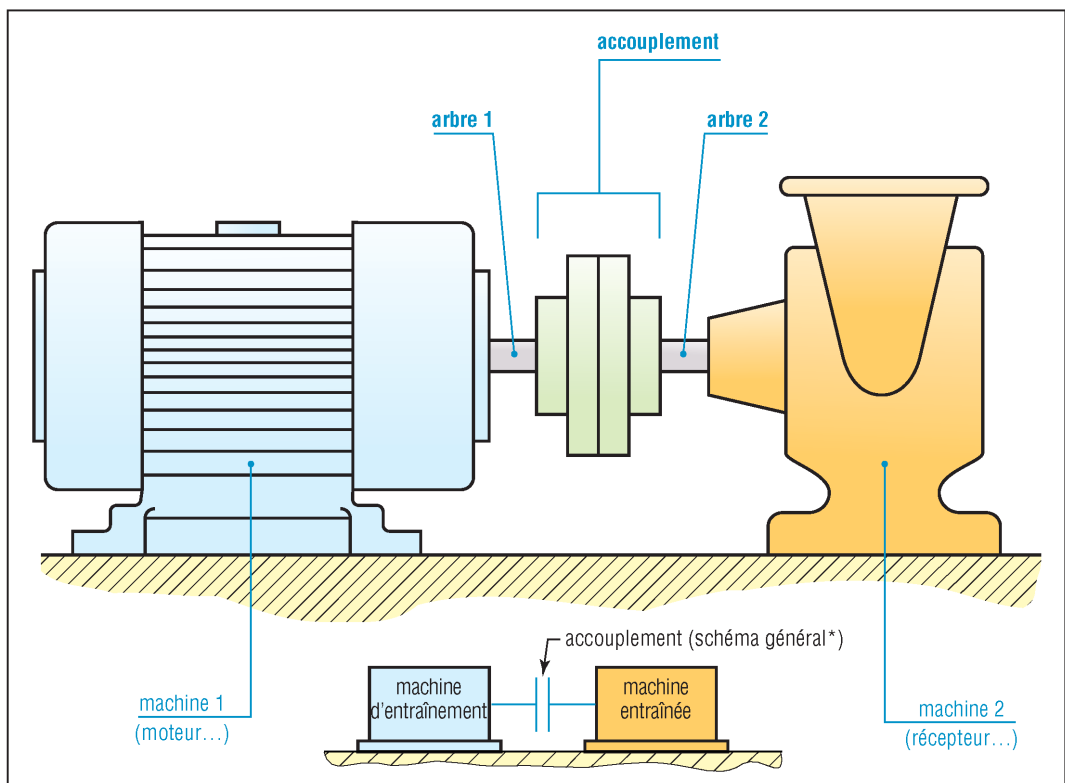
OBJECTIFS

- Indiquer les défauts d'alignement typiques.
- Présenter et décrire les principales familles d'accouplements.
- Donner des éléments pour les choisir et les calculer.
- Démontrer les formules les plus fondamentales.

Les accouplements sont utilisés pour transmettre la vitesse et le couple, ou la puissance, entre deux arbres de transmission en prolongement l'un de l'autre comportant éventuellement des défauts d'alignement.

Il existe une étonnante diversité de solutions aux possibilités complémentaires pouvant répondre à une multitude de cas posés. À eux seuls ils occupent toute une industrie.

La plupart des accouplements décrits dans ce chapitre sont disponibles commercialement.



1. Principe d'accouplement des arbres de transmission (* Schémas NF EN ISO 3952-3 et NF E 22-610).

I – Généralités et définitions

1. Puissance et couple transmissibles par les accouplements

Ils sont liés par la formule :

$$P = C \cdot \omega = \frac{C \cdot \pi \cdot N}{30}$$

P : puissance transmise en watts

C : couple transmis en N.m

ω : vitesse de rotation en rad/s

N : vitesse de rotation en tr/min

Exemple : quelle est la valeur du couple si la puissance transmise est de 10 kW à 500 tr/min ?

$$P = C \cdot \omega = \frac{C \cdot \pi \cdot N}{30} \text{ donne } C = \frac{P}{\omega} = \frac{30P}{\pi N} = \frac{30 \times 10\,000}{\pi \times 500} \approx 191 \text{ Nm.}$$

À couple constant, si la vitesse augmente, la puissance transmise augmente dans les mêmes proportions.

2. Définitions

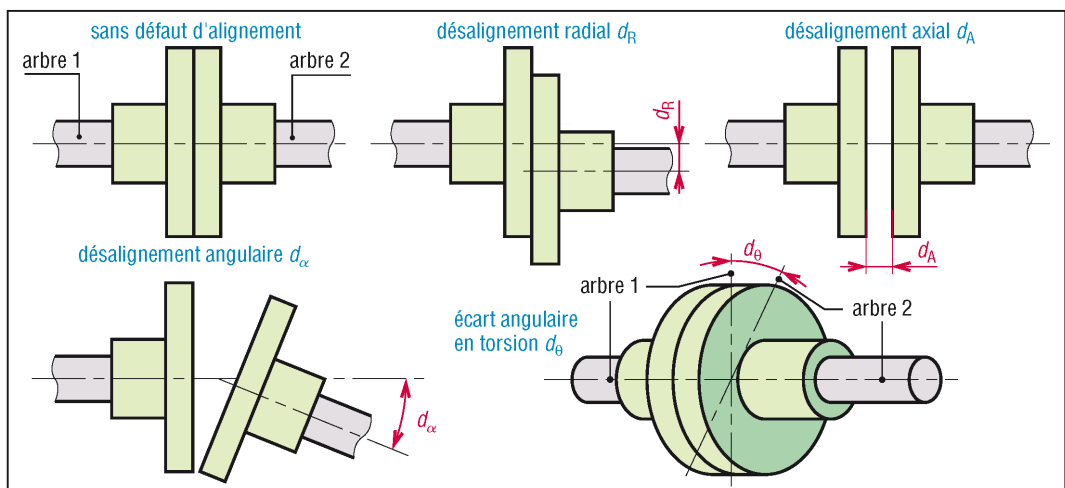
Accouplement permanent : il est dit permanent lorsque l'accouplement des deux arbres est permanent dans le temps. Le désaccouplement n'est possible que par démontage du dispositif.

Accouplement temporaire : il est dit temporaire lorsque l'accouplement ou le désaccouplement peuvent être obtenus à n'importe quel moment, sans démontage du dispositif, suite à une commande extérieure (intervention humaine ou commande automatisée).

Accouplement ou joint homocinétique : un accouplement est dit homocinétique lorsque la vitesse de rotation de l'arbre d'entrée (N_1) est rigoureusement identique à celle de l'arbre de sortie (N_2). $N_2 = N_1$ à tout instant.

3. Défauts d'alignements des accouplements

Le choix d'un type d'accouplement dépend d'abord des défauts d'alignement pouvant exister entre les deux arbres : désalignements radial, axial, angulaire et écart en torsion.



2. Principaux défauts d'alignements.

| Principaux types d'accouplements et symboles normalisés | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|---|
| accouplements permanents | | | | accouplements temporaires | | |
| accouplements rigides | accouplements flexibles | accouplements élastiques | cardans et assimilés | embrayages | freins | divers |
| aucun désalignement possible – à plateaux – à manchon goupillé – à douille biconique... | non flexibles en torsion – joint d'Oldham – à denture bombée – à soufflet... | flexibles en torsion – à ressort – à blocs en caoutchouc – à membrane souple... | – joints de cardans – joints tripodes – joints à quatre billes | – à disques – centrifuges – coniques... | – à disques – à tambour – à bande... | – limiteurs de couple – roues libres – convertisseurs – coupleurs... |
| $dR = 0 ; dA = 0$ $d\alpha = 0$ et $d\theta = 0$ | désalignements : dR, dA et $d\alpha$ | désalignements : $dR, dA, d\alpha$ et $d\theta$ | désalignement angulaire $d\alpha$ | pas de désalignement | pas de désalignement | pas de désalignement |
| | | | | | | symboles page 608 |

* NF E 22 610, non retenu par NF EN ISO 3952-3 page 608

II – Accouplements permanents

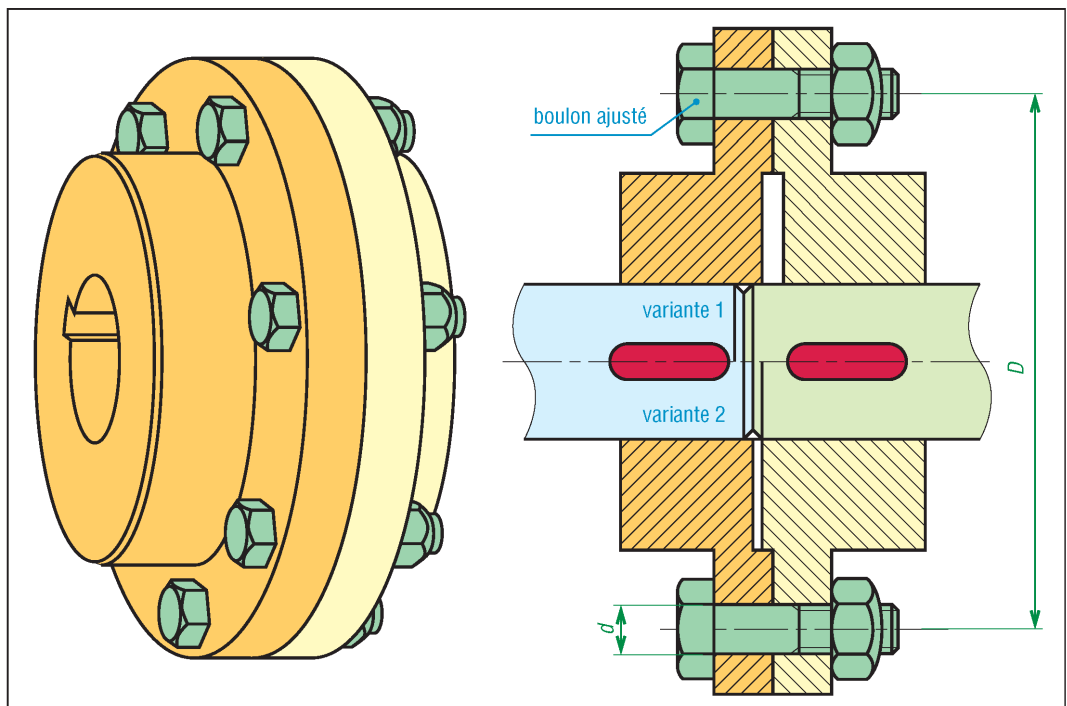
1. Accouplements rigides

Ils doivent être utilisés lorsque les arbres sont correctement alignés (ou parfaitement coaxiaux). Leur emploi exige des précautions et une étude rigoureuse de l'ensemble monté, car un mauvais alignement des arbres amène un écrasement des portées, des ruptures par fatigue et des destructions prématurées du système de fixation.

a) Accouplements à plateaux

Très utilisés, précis, résistants, assez légers, encombrants radialement, ils sont souvent frettés ou montés à la presse.

La transmission du couple est en général obtenue par une série de boulons ajustés. En cas de surcharge, le cisaillement des boulons offre une certaine sécurité.



3. Accouplement rigide à plateaux.

Calcul des boulons au cisaillement

Données :

 C : couple à transmettre (N.mm) n_b : nombre de boulons (valeur empirique : $n_b \approx 0,02d + 3$) d : diamètre du boulon (mm) D : diamètre de répartition des boulons (mm) F_c : force de cisaillement des boulons (N) S_c : aire cisailée des boulons (mm²) R_{pg} : résistance pratique au cisaillement du matériau des boulons (N/mm²) $(R_{pg} \approx R_e/2$ avec R_e limite élastique du matériau)

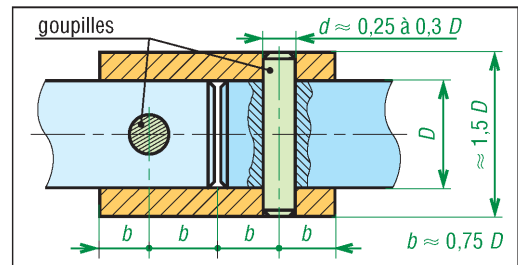
$$F_c = \frac{2.C}{D} \quad R_{pg} \geq \frac{F_c}{S_c} = \frac{4.F_c}{n_b.\pi.d^2}$$

$$d \geq \left[\frac{8.C}{n_b.D.\pi.R_{pg}} \right]^{1/2}$$

b) Manchons à goupilles

Dans le cas des petits accouplements, c'est le plus simple. Les deux goupilles travaillent au cisaillement et offrent une certaine sécurité en cas de surcharge. Le principe de calcul est le même que précédemment.

Variantes : goupilles remplacées par des clavettes ou des cannelures. L'arrêt en translation du manchon peut être réalisé par une vis de pression agissant sur la clavette, par une goupille passant entre les deux extrémités des deux arbres, par un circlips...

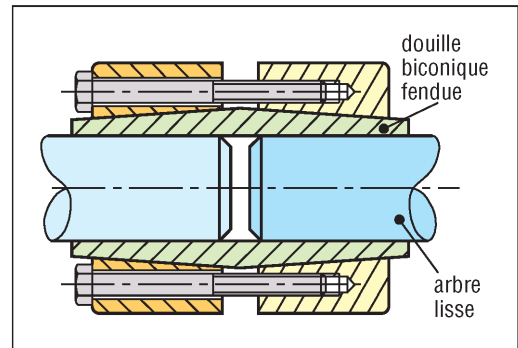


4. Manchon à goupilles.

c) Manchons à douille biconique

Ce sont les plus récents. Ils présentent une grande facilité de montage et de démontage et permettent l'utilisation d'arbres lisses sans rainure de clavette. La transmission du couple est obtenue par adhérence après serrage des vis.

Nombreuses variantes ; des arbres de diamètres différents sont possibles. Voir p. 250.



5. Manchon à douille biconique.

2. Accouplements élastiques ou flexibles

Souvent utilisés, ils tolèrent plus ou moins, suivant le type de construction, des défauts d'alignement limités entre les deux arbres.

Exemples de calcul : NF EN ISO 10441 et 14691.

Cette flexibilité fait que le mouvement des différents composants de l'accouplement s'effectue sans résistance et sans efforts antagonistes significatifs.

Défauts d'alignement typiques : $d_\alpha = \pm 3^\circ$; $d_R < 1$ mm ; $d_A \geq 1$ mm

a) Accouplements non flexibles en torsion

Composés de pièces rigides, ils peuvent corriger un ou plusieurs défauts d'alignement particuliers, mais transmettent le couple intégralement sans amortissement des irrégularités et des chocs de transmission (ni écart ni jeu en torsion : $d_\theta = 0$).

Les couples transmis peuvent être très élevés.

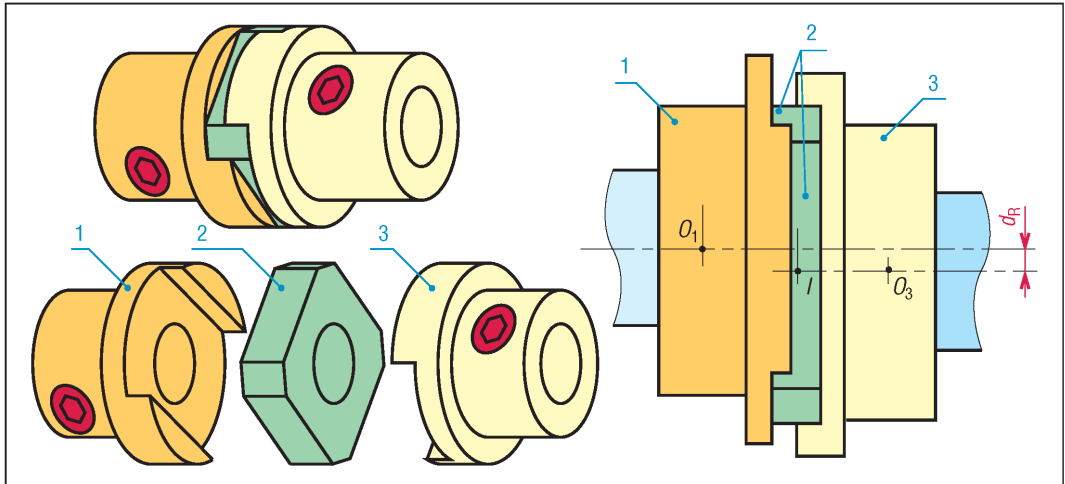
Principaux cas

Joint d'Oldham : il supporte uniquement des désalignements radiaux (d_R) et permet la transmission entre deux arbres parallèles présentant un léger décalage.

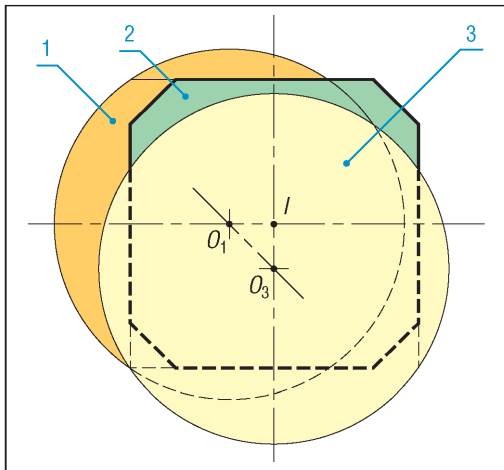
Le joint est construit autour de deux glissières à 90° ; plusieurs variantes sont possibles.

Au cours de la rotation, le centre I du plateau intermédiaire (2) décrit un cercle de diamètre O_1O_3 (l'angle $\widehat{O_1IO_3}$ étant constamment égal à 90°).

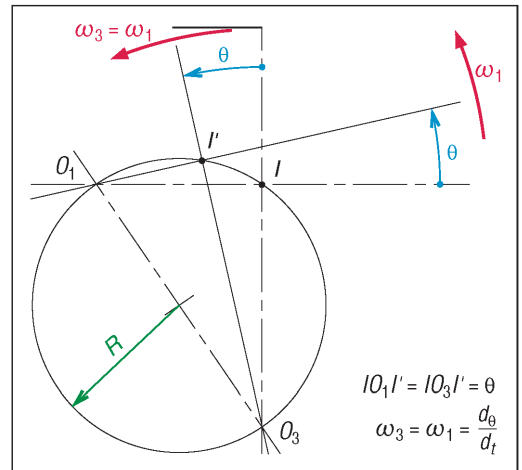
Le joint est parfaitement homocinétique : les angles de rotation $\widehat{IO_1I'}$ et $\widehat{IO_3I'}$ sont constamment identiques (interceptent tous deux l'arc $I'I'$).



6. Joint d'Oldham.

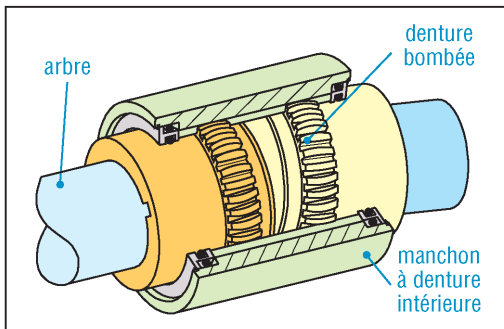


7. Le point I se déplace sur le cercle de diamètre O_1O_3 .

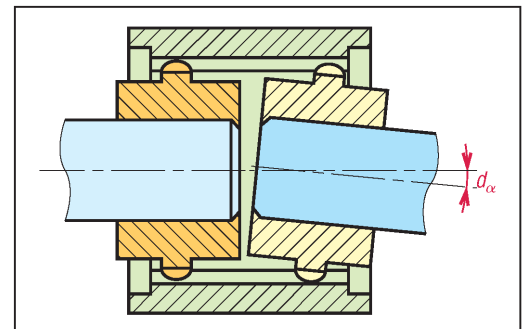


8. Homocinétisme du joint d'Oldham.

Accouplements à denture bombée : il supporte uniquement des désalignements angulaires (d_α) modérés (obtenu grâce à la forme bombée de la denture), plusieurs variantes.



9. Exemple de réalisation.



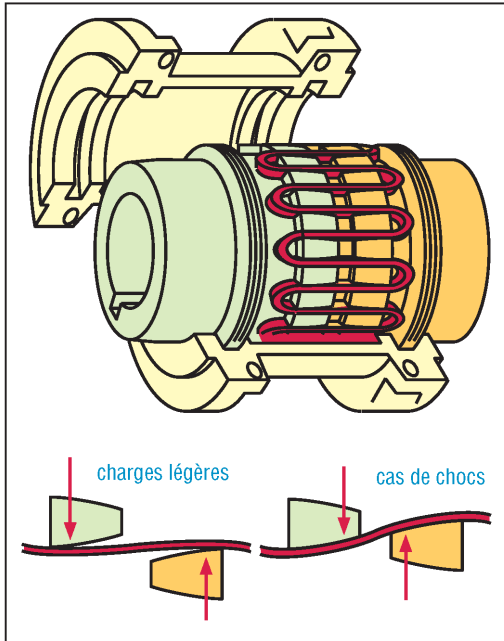
10. Mise en évidence du désalignement d_α .

b) Accouplements élastiques en torsion

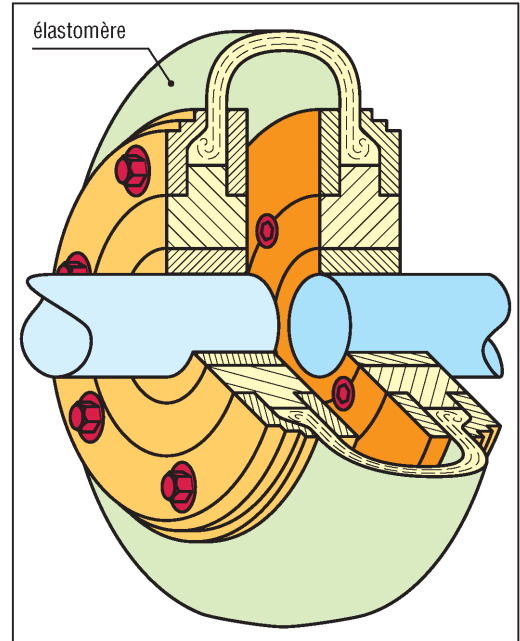
En plus de pièces rigides, ils se composent de parties totalement élastiques, ressorts ou blocs élastomères, permettant la flexibilité en torsion.

Ils sont conçus pour transmettre le couple en douceur (réduisent et amortissent les chocs et les irrégularités de transmission) tout en corrigeant plus ou moins les différents défauts d'alignement. Les réalisations utilisant des éléments en élastomère (membrane, blocs...) supportent en même temps et à des degrés divers tous les types de désalignements.

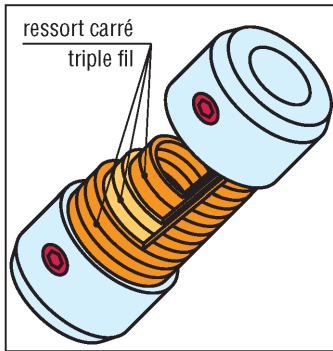
Il existe de nombreuses réalisations plus ou moins concurrentes, quelques cas typiques seulement sont proposés. Seuls les désalignements permis les plus significatifs sont indiqués sur les figures.



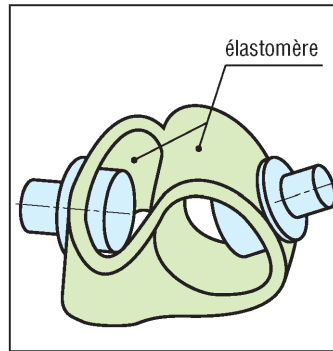
11. Élastique en torsion d_θ .



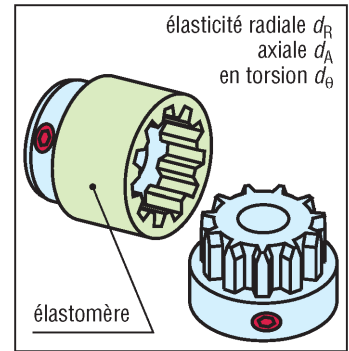
12. Élasticité en flexion d_α et en torsion d_θ .



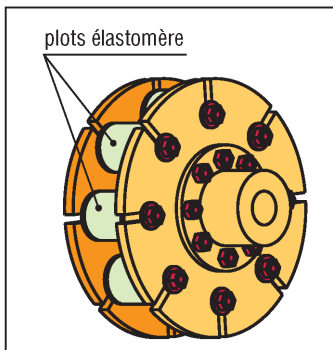
13. Ressort carré triple fil (d_α, d_θ).



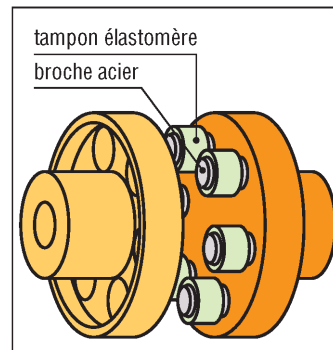
14. Grand angle d_α , axial d_A et d_θ .



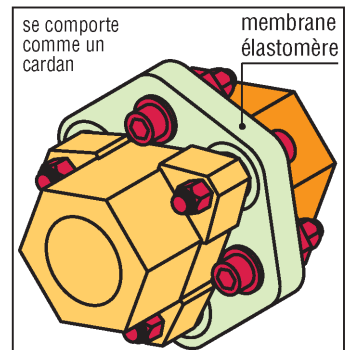
15. Élasticités d_R, d_A, d_θ .



16. Désalignement d_θ et d_R .



17. Désalignements d_A et d_θ .



18. Désalignements d_α et d_θ .

3. Joints de cardan et assimilés

Ils assurent la transmission entre des arbres concourants.

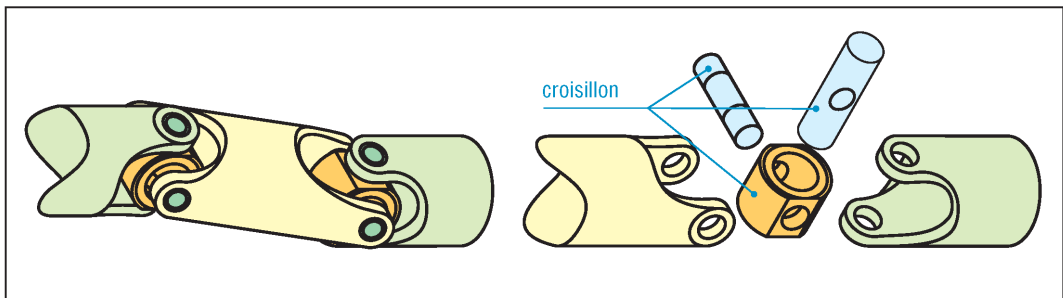
Les accouplements élastiques supportent des défauts angulaires (d_α) inférieurs à 3° environ. Pour des désalignements supérieurs, il faut utiliser les joints de cardans et assimilés (d_α ou α jusqu'à 45°). Définitions et caractéristiques : NF E 22-601.

Non flexibles en torsion ($d_\theta = 0$), ils peuvent transmettre des couples très élevés.

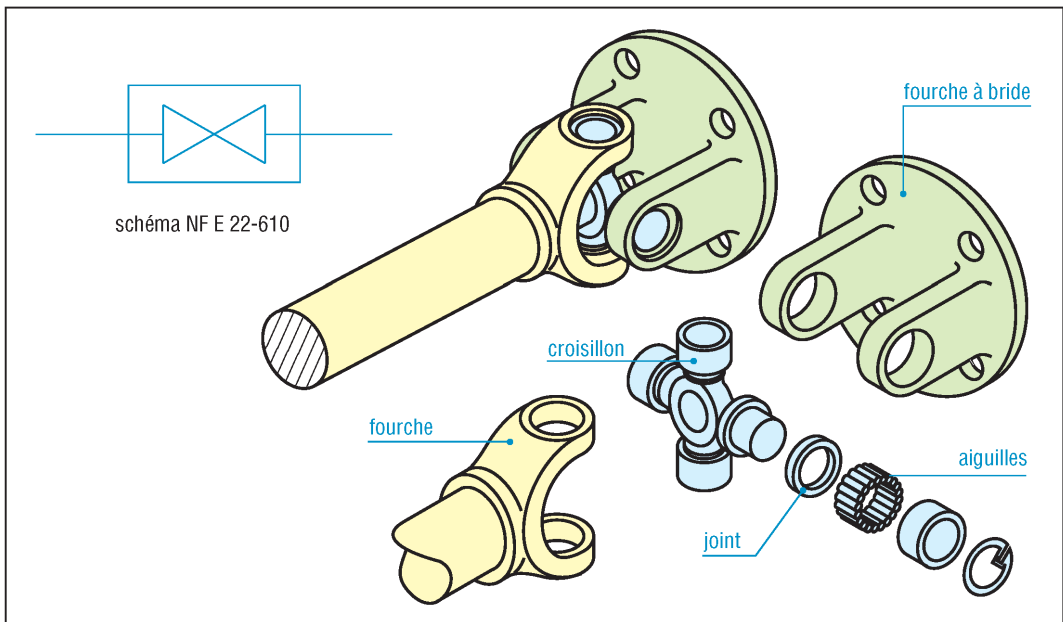
a) Joint de cardan

Encore appelé joint universel ou joint de Hooke, son invention remonte au XVI^e siècle (Jérôme Cardan). Le mouvement se transmet par l'intermédiaire d'un croisillon libre en rotation par rapport aux deux arbres (deux liaisons pivots d'axes perpendiculaires et concourants).

| Angles (α) possibles entre les deux arbres | | | |
|---|-------------|------------|-----------------|
| vitesses maximales admissibles | très lentes | 10 tr/min | > 600 tr/min |
| angles α possibles | 45° | 30° | 15 à 20° |



19. Exemple de cardan pour faible couple.



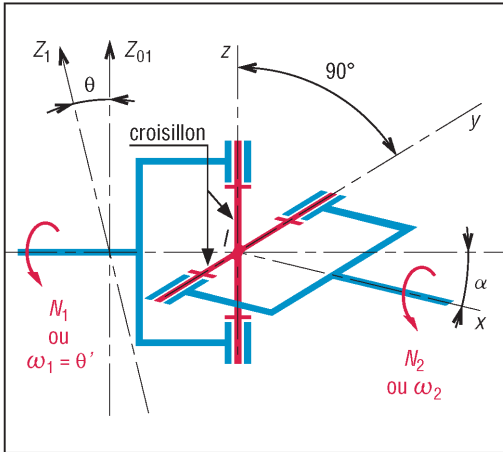
20. Exemple de cardan pour couples élevés et schéma normalisé.

Inconvénient : c'est un joint non homocinétique ; bien que le nombre de tours parcourus par les deux arbres soit le même, la vitesse de rotation de l'arbre d'entrée (N_1) n'est pas égale à chaque instant à celle de l'arbre de sortie (N_2). Il existe des fluctuations, fonctions de l'angle α des deux arbres.

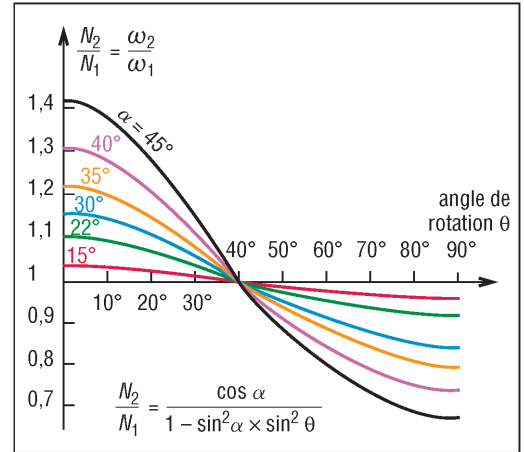
Sur un même tour, l'arbre 2 prend successivement de l'avance puis du retard par rapport à l'arbre 1 pour finir tous deux sur la même « ligne ».

Ce phénomène est générateur de vibrations importantes d'autant plus élevées que α et N_1 sont grands.

| Fluctuation de la vitesse d'un cardan en fonction de l'angle des deux arbres | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| α | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° |
| $\frac{N_2}{N_1}$ | 0,98 à 1,02 | 0,94 à 1,06 | 0,87 à 1,15 | 0,76 à 1,30 | 0,64 à 1,55 |

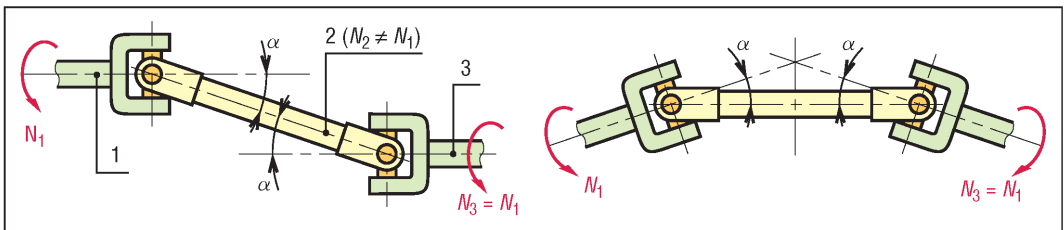


21. Schéma de principe du joint de cardan.



22. Fluctuation de la vitesse N_2 .

Correction pour avoir homocinétisme, joints en série : l'utilisation de deux joints de cardan en série avec trois arbres dont les angles α sont identiques permet de corriger le défaut précédent. Bien que la rotation de l'arbre intermédiaire (N_2) soit irrégulière, celle de l'arbre de sortie (N_3) est rigoureusement identique à celle de l'arbre d'entrée ($N_3 = N_1$ à tout instant). Les fluctuations de l'un sont compensées par celles de l'autre.

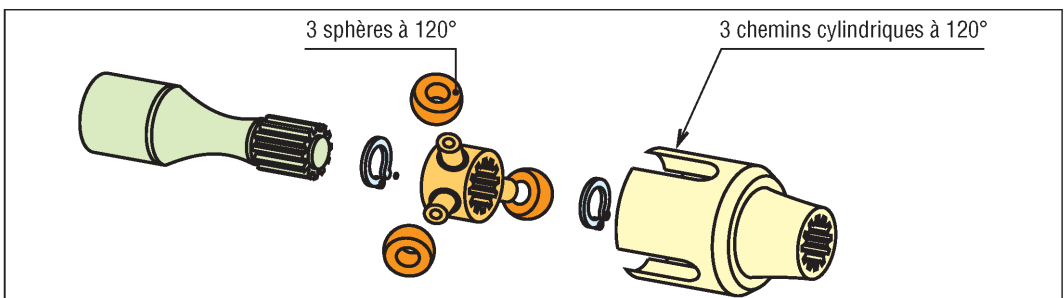


23. Groupements homocinétiques de cardans (plans de symétrie des fourches confondus).

b) Joints homocinétiques

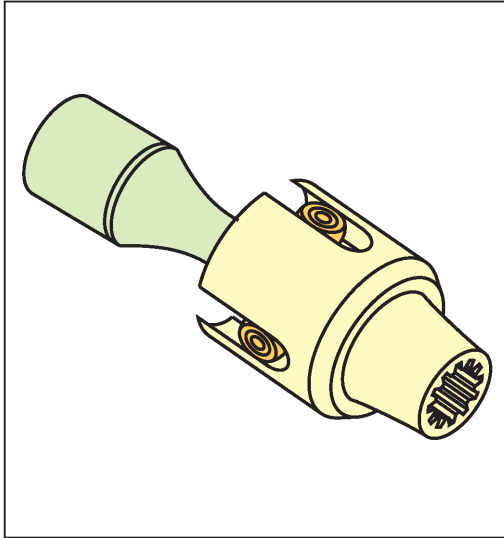
Pour couvrir les besoins des industries (automobile...) d'autres types de joints ont été développés et certains sont parfaitement homocinétiques par construction ($N_2 = N_1$ à tout instant).

Joint tripode : il est basé sur trois sphères articulées à 120° pouvant coulisser dans trois cylindres coaxiaux parallèles à l'un des arbres. Particularité : il permet une liberté en translation supplémentaire.

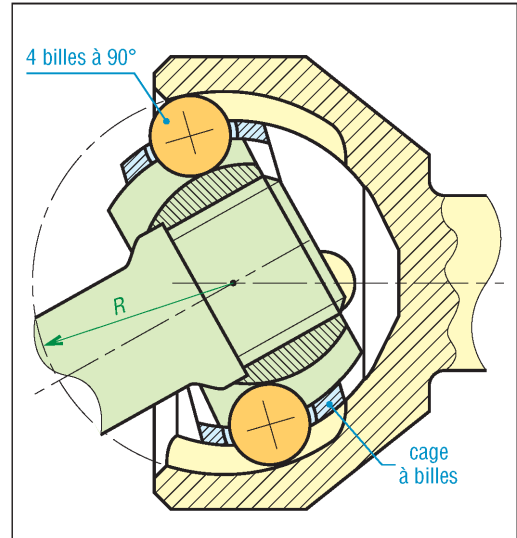


24. Joint tripode, vue éclatée.

Joint à quatre billes (type Rzeppa) : il est basé sur quatre billes à 90° pouvant rouler dans des chemins (analogie avec les roulements) de forme torique.



25. Joint tripode assemblé.



26. Joint homocinétique à quatre billes, type Rzeppa.

III - Accouplements temporaires

1. Embrayages

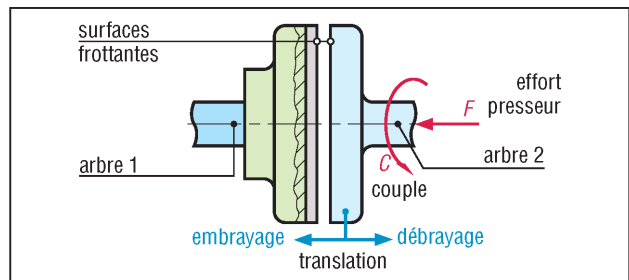
Basés sur les propriétés du frottement, les embrayages réalisent l'accouplement, ou le désaccouplement, de deux arbres au gré d'un utilisateur ou d'un automatisme, après les avoir amenés à la même vitesse de rotation.

Ils ne supportent pas ou très peu les défauts d'alignement et peuvent être classés à partir de la forme des surfaces frottantes (disque, cylindrique, conique) et de l'énergie du système de commande (mécanique, hydraulique, électromagnétique, pneumatique).

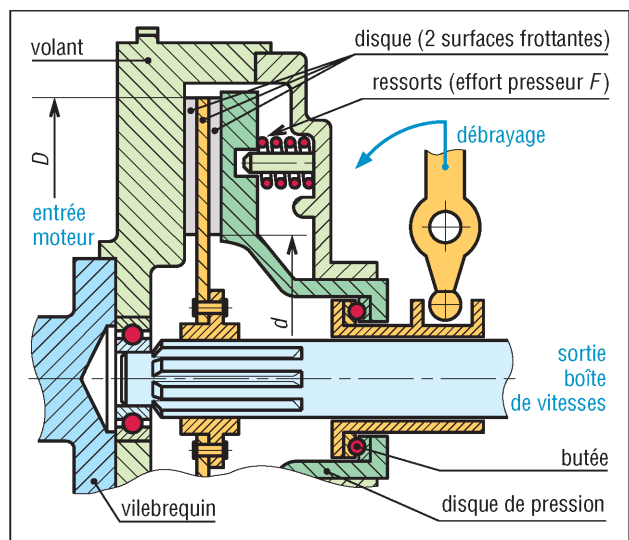
a) Embrayages à disques

Ces embrayages sont les plus utilisés ; le nombre de disques est variable et dépend de l'encombrement ou de la place disponible pour loger l'embrayage.

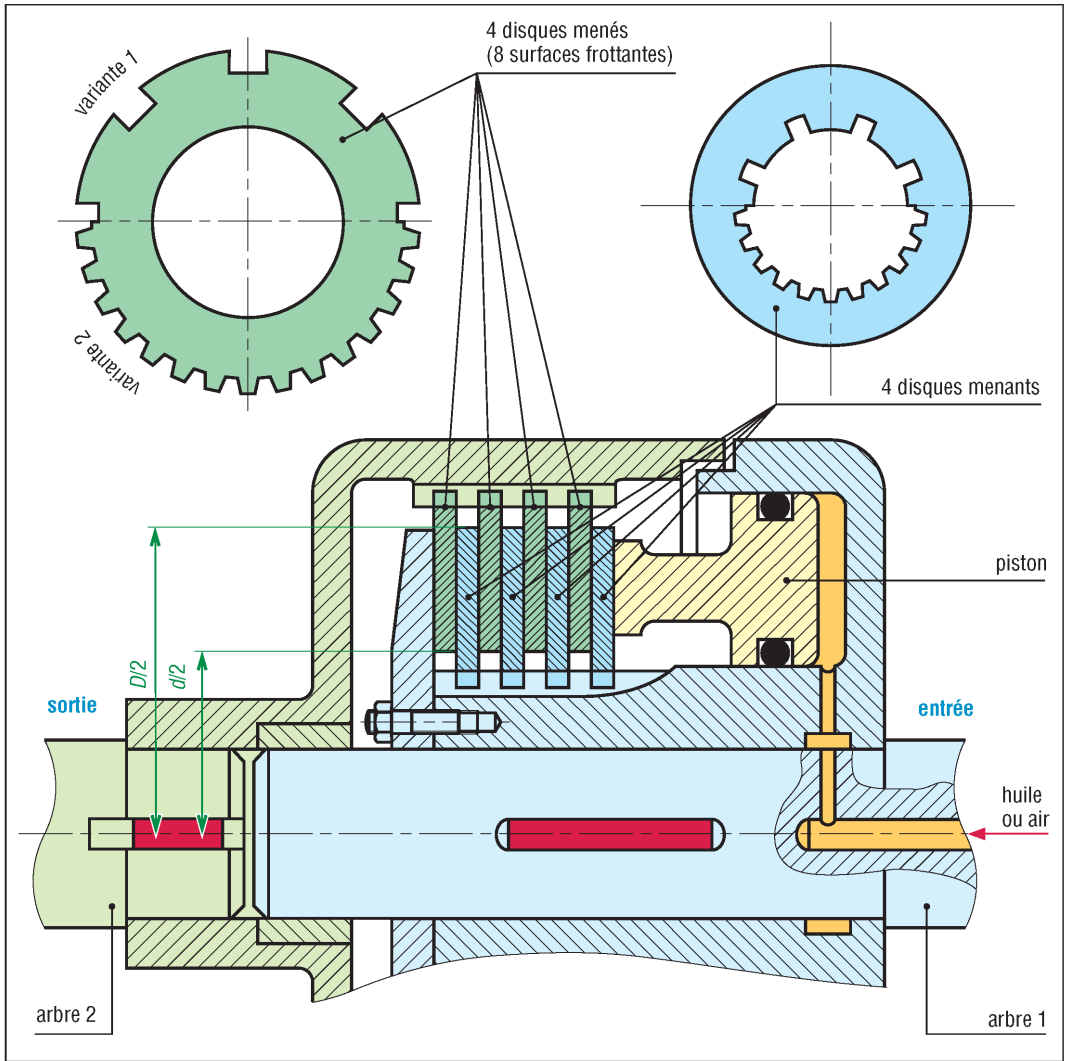
À couple transmis identique, un monodisque sera plus encombrant radialement (plus grand diamètre) et moins axialement (moins large) qu'un multidisque.



27. Principe d'un embrayage.



28. Représentation simplifiée d'un embrayage monodisque d'automobile.



29. Représentation simplifiée d'un embrayage multidisques à commande hydraulique ou pneumatique.

b) Couple transmissible (Cf)

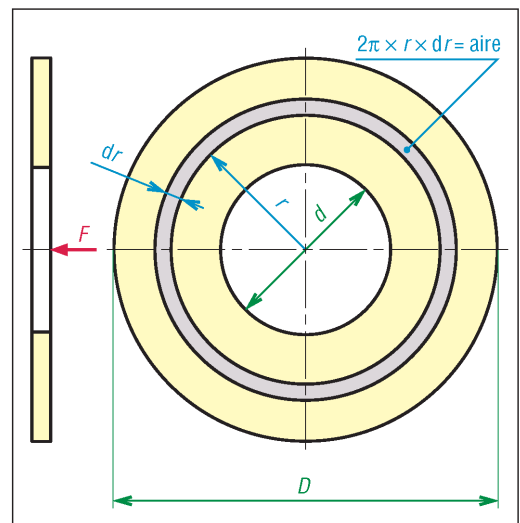
Cas où la pression p est supposée uniforme sur toute la surface frottante.

$$p = \frac{F}{S} = \frac{4.F}{\pi(D^2 - d^2)} \leq P_a \text{ (pression maxi admissible)}$$

Données :

- C_f : couple transmissible par adhérence (N.m)
- F : effort presseur ou force axiale (N)
- f : coefficient de frottement
- D : diamètre extérieur de la surface frottante
- d : diamètre intérieur de la surface frottante (valeurs usuelles : $0,45D < d < 0,8D$; valeur optimum : $d \approx 0,58D$)

Pour faire les calculs, choisissons l'élément de surface dS dont l'aire (annulaire) est limitée par les rayons r et $r + dr$:
 $dS \approx \text{circonférence} \times \text{rayon} = 2.\pi.r.dr$
 Force de frottement exercée sur dS :
 $f.p.dS = f.p.2.\pi.r.dr$



30. Données pour le calcul.

Le couple élémentaire (dCf), transmissible par frottement, est le produit de cette force de frottement par le rayon r :

$$dCf = f.p.dS.r = 2.\pi.f.p.r^2.dr$$

Le couple total transmissible s'obtient par intégration sur toute la surface (r variant de $d/2$ à $D/2$).

$$Cf = \int_{d/2}^{D/2} 2.\pi.f.p.r^2.dr = 2.\pi.f.p. \int_{d/2}^{D/2} r^2.dr$$

$$= 2.\pi.f.p. \left[\frac{r^3}{3} \right]_{d/2}^{D/2} = \frac{2}{3}.\pi.f.p. \left[\frac{D^3}{8} - \frac{d^3}{8} \right]$$

$$Cf = \frac{1}{12}.\pi.f.p.(D^3 - d^3)$$

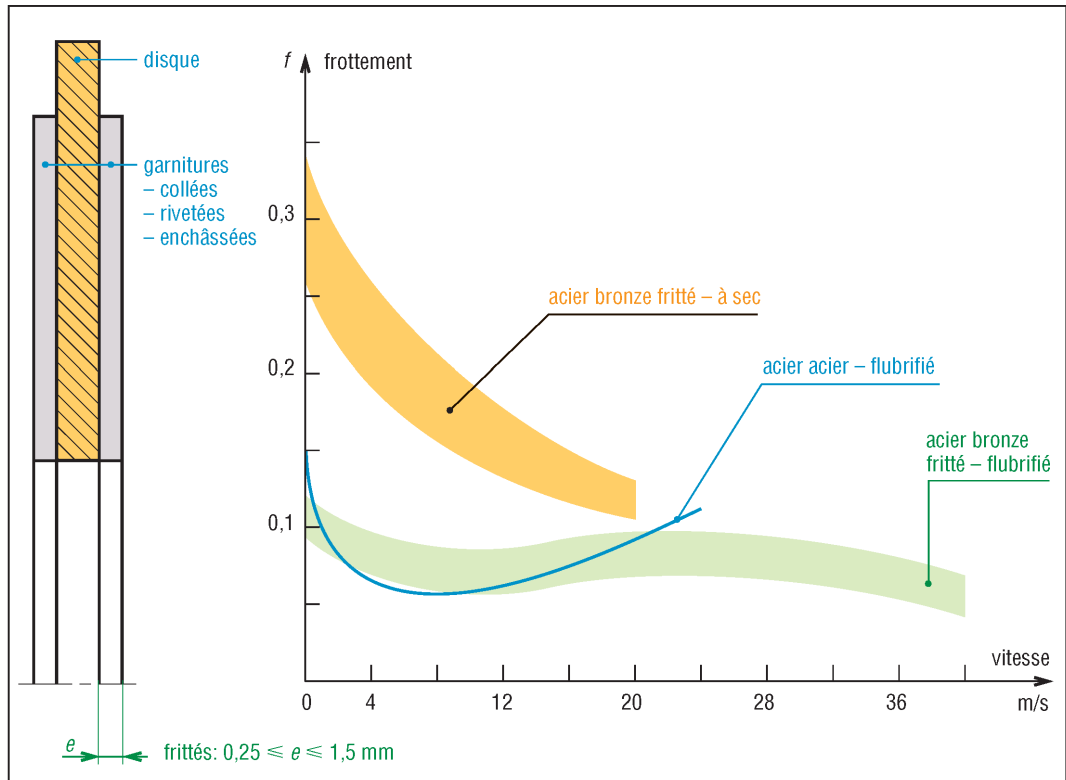
Si on remplace p par sa valeur on obtient :

$$Cf = \frac{F.f}{3} \cdot \left[\frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \right]$$

Si on a n surfaces frottantes en contact :

$$Cf = \frac{n.F.f}{3} \cdot \left[\frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \right] = \frac{2n.F.f}{3} \cdot \left[\frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right]$$

c) Caractéristiques technologiques des garnitures



31. Propriétés des garnitures.

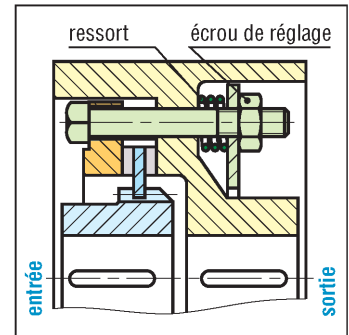
Pour les freins comme pour les embrayages, les garnitures sont des matériaux composites, mélange de carbone, soufre, particules métalliques diverses (cuivre, laiton, bronze, fer...), céramiques et autres. Le tout est lié par une résine synthétique ou un élastomère (si l'on veut donner plus de souplesse) après frittage ou moulage.

| Caractéristiques constructives indicatives de quelques garnitures | | | | |
|---|-----------------------------------|--------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| matériaux en frottement | coefficient de frottement (f) | | pression maxi admissible N/mm^2 | température maximale $^{\circ}C$ |
| | à sec | dans l'huile | | |
| métal fritté sur fonte | 0,1 à 0,4 | 0,05 à 0,1 | 1 | 500 à 600 |
| métal fritté sur acier | 0,1 à 0,3 | 0,05 à 0,1 | 2 | 500 à 600 |
| garnitures tissées sur acier ou fonte | 0,3 à 0,6 | 0,1 à 0,2 | 0,3 à 0,7 | 175 à 260 |
| garnitures moulées sur acier ou fonte | 0,2 à 0,5 | 0,08 à 0,12 | 0,35 à 1 | 200 à 260 |
| acier sur fonte | 0,1 à 0,2 | 0,04 | 0,7 à 1,7 | 250 |

2. Limiteurs de couple

La technologie est la même que celle des embrayages. Il existe de nombreuses variantes : monodisques, multidisques, etc. Rôle : il limite le couple transmissible entre deux arbres afin de protéger le mécanisme contre les surcharges (comme limiter le couple au démarrage) et les blocages.

Le tarage du couple est en général obtenu par un système presseur à ressort.

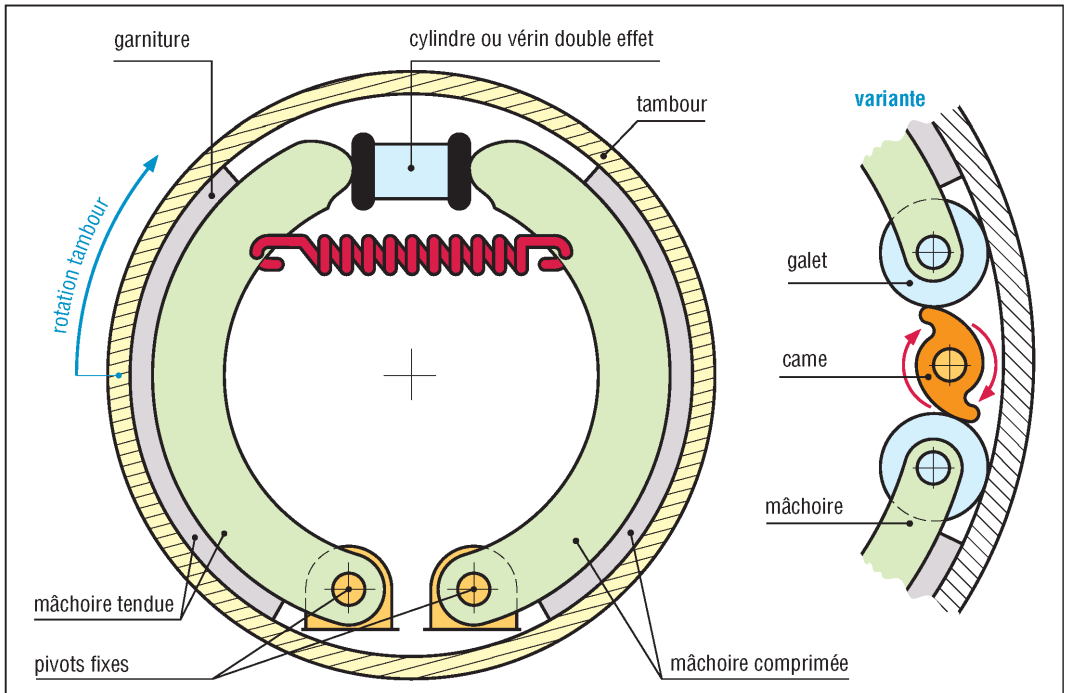


32. Limiteur de couple.

Les freins fonctionnent de la même manière que les embrayages mis à part que l'un des arbres, fixe, sert de base pour arrêter progressivement le second par absorption de l'énergie cinétique des masses mobiles. Cette énergie est transformée en chaleur puis dissipée dans l'air ambiant.

a) Freins à tambours

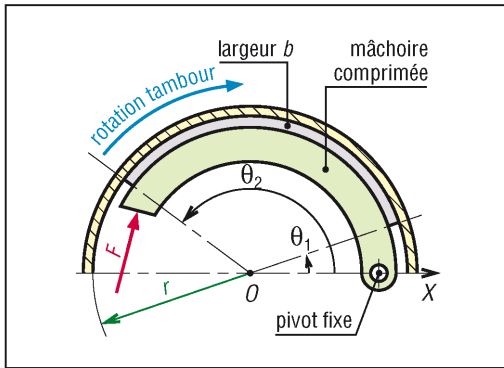
Ils ont pour eux une grande puissance de freinage sous un faible effort de commande. Aux vitesses élevées et en usages intensifs on leur préfère les freins à disques. Il existe plusieurs variantes.



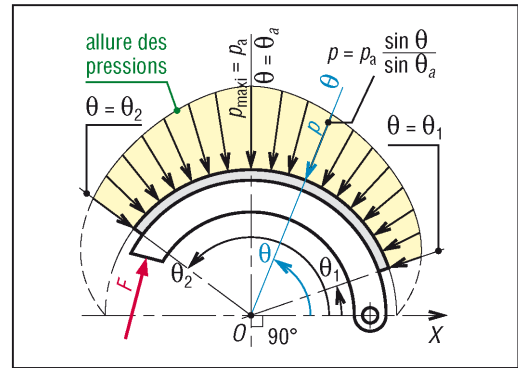
33. Principe de fonctionnement d'un frein à tambour.

La mâchoire comprimée supporte l'essentiel du freinage (environ les 2/3) et de ce fait s'use plus vite. L'effort de freinage peut être fourni par un vérin hydraulique (encore appelée cylindre) ou par un dispositif à came.

Couple de freinage exercé par une mâchoire intérieure comprimée



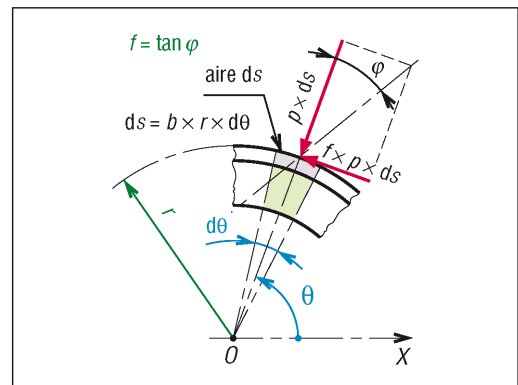
34. Principales données.



35. Allure des pressions normales.

C_f : couple de freinage
 f : coefficient de frottement entre garniture et tambour
 p : pression normale ou radiale de contact
 p_a : pression p maximale exercée ($p_a \leq$ pression admissible)
 b : largeur de la mâchoire
 r : rayon intérieur du tambour
 L'expérience montre que la distribution des pressions p sur la mâchoire peut être résumée par :

$$p = p_a \frac{\sin \theta}{\sin \theta_a}$$



36. Éléments de calcul.

$$p_{\text{maxi}} = p_a \text{ pour } \theta = \theta_a = 90^\circ \text{ si } (\theta_2 - \theta_1) > 90^\circ$$

$$p_{\text{maxi}} = p_a \text{ pour } \theta = \theta_{\text{maxi}} \text{ si } (\theta_2 - \theta_1) \leq 90^\circ$$

Pour l'élément de surface choisi ($dS = b \cdot r \cdot d\theta$), la force de frottement appliquée est $f \cdot p \cdot dS$.

Le couple de freinage (dC_f) engendré par cet élément est le produit de la force de frottement par le bras de levier r ($dC_f = f \cdot p \cdot r \cdot dS$).

Le couple total de freinage exercé par la mâchoire s'obtient par intégration (θ variant de θ_1 à θ_2) :

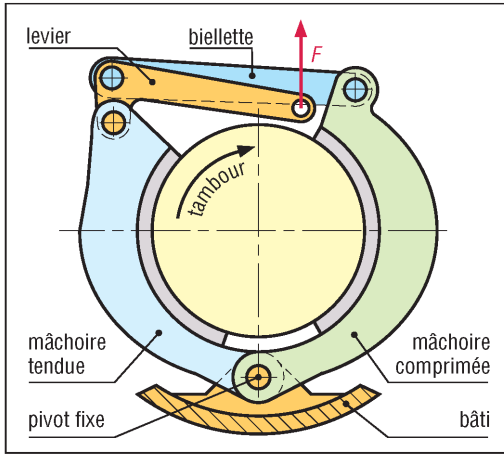
$$C_f = \int_{\theta_1}^{\theta_2} f \cdot p \cdot r \cdot ds = \int_{\theta_1}^{\theta_2} f \cdot p \cdot b \cdot r^2 \cdot d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} f \cdot p_a \frac{\sin \theta}{\sin \theta_a} b \cdot r^2 \cdot d\theta$$

$$C_f = \frac{f \cdot p_a \cdot b \cdot r^2}{\sin \theta_a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta \cdot d\theta = \frac{f \cdot p_a \cdot b \cdot r^2}{\sin \theta_a} \left[-\cos \theta \right]_{\theta_1}^{\theta_2}$$

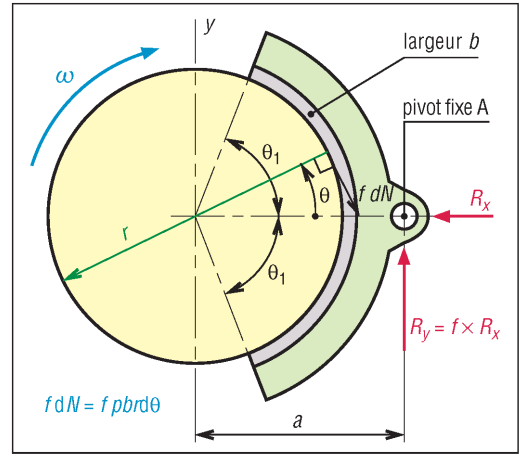
$$C_f = \frac{f \cdot p_a \cdot b \cdot r^2}{\sin \theta_a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

Cas des freins à tambours et mâchoires extérieures (ou sabots)

Ils sont utilisés sur certains équipements industriels pour réaliser des couples de freinages très élevés. Le couple de freinage est exactement le même que pour une mâchoire intérieure (voir formule du paragraphe précédent).



37. Exemple de frein à tambour à mâchoires extérieures.



38. Principe du frein à sabot pivotant.

Cas d'un sabot pivotant : le sabot est supposé symétrique par rapport à l'articulation.

Principales formules (même principe de détermination que précédemment) :

Pression de contact : $p = p_a \cdot \cos\theta$ (p est maxi pour $\theta = 0$, au droit de R_x).

Couple de freinage :

$$C_f = 2 \cdot f \cdot b \cdot p_a \cdot r^2 \cdot \sin\theta_1 = a \cdot R_y$$

Efforts sur l'articulation :

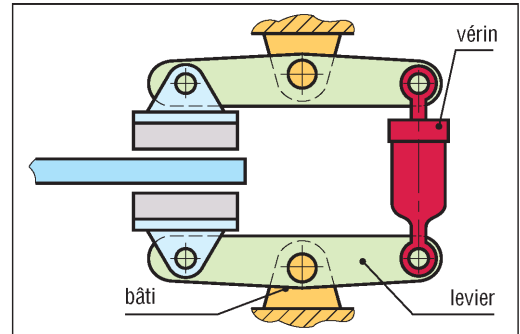
$$\text{Pas de basculement autour de A pour } a = \frac{4r \sin \theta_1}{2\theta_1 + \sin 2\theta_1} \text{ et}$$

$$R_x = \frac{b \cdot r \cdot p_a}{2} (2\theta_1 + \sin 2\theta_1) ; R_y = f \cdot R_x$$

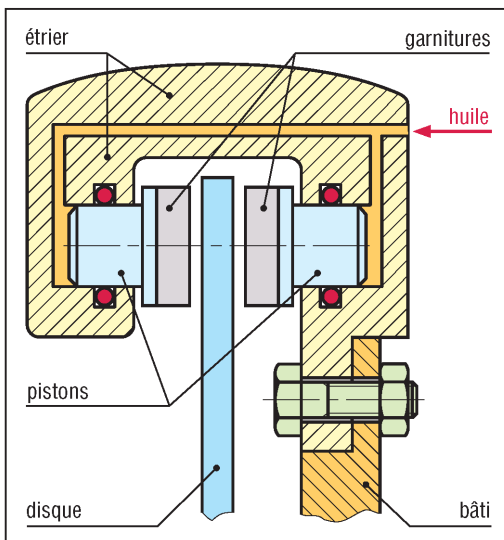
b) Freins à disques

Ils ont pour eux la stabilité du couple de freinage, notamment aux vitesses élevées et une bonne tenue dans des conditions sévères d'utilisation (services intensifs, surcharges, etc).

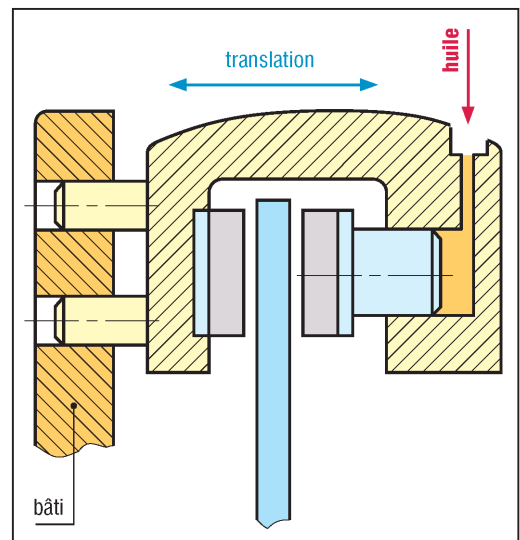
Ils permettent une meilleure évacuation de la chaleur que les freins à tambour, un freinage plus progressif et sont plus faciles à entretenir. Cependant, à encombrement égal et à effort de commande identique (F) leur couple de freinage est deux à quatre fois plus faible.



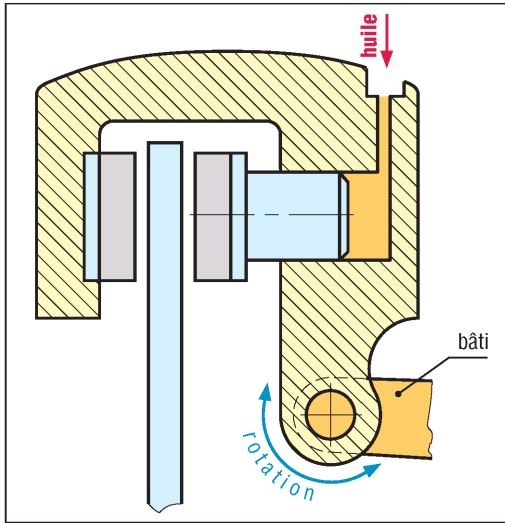
39. Étrier mobile à leviers ou à pincettes.



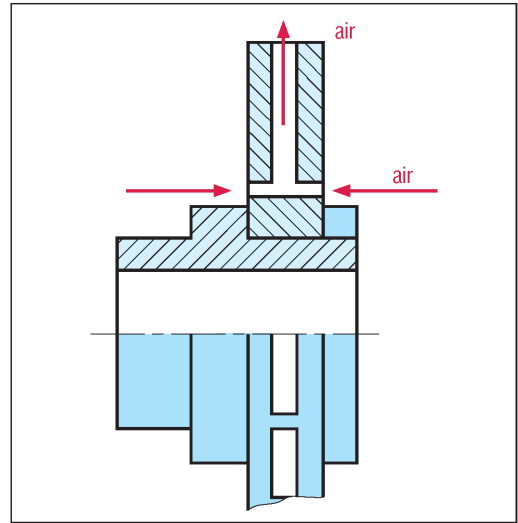
40. Frein à disque à deux pistons et étrier fixe.



41. Étrier mobile, cas 1.



42. Étrier mobile, cas 2.



43. Disque ventilé.

4. Coupleurs

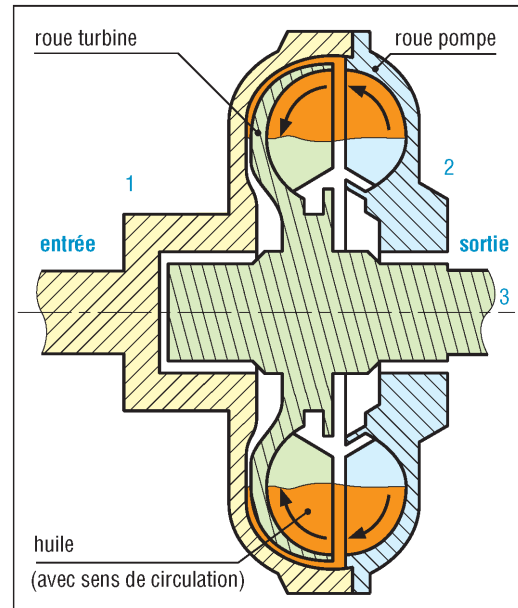
Ils remplacent les embrayages dans certaines circonstances.

Le couple transmis, très faible ou nul au démarrage, augmente progressivement avec la vitesse de rotation (varie avec le carré de cette vitesse). Les moteurs peuvent ainsi démarrer à vide ou sans charge.

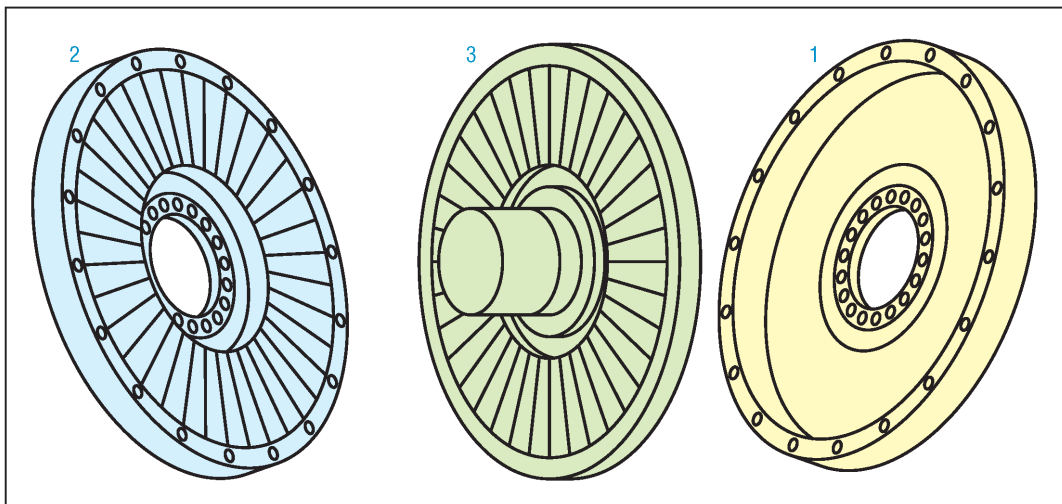
Sous l'effet de la rotation de l'arbre d'entrée (roue pompe), le fluide intérieur (huile spéciale) est accéléré, l'énergie cinétique acquise est ensuite transmise à l'arbre de sortie (roue turbine) entraînant ainsi sa rotation.

En fonctionnement normal il y a toujours un léger glissement entre les deux arbres (2 à 4 %).

Le fluide, pouvant absorber les chocs, agit également en limiteur de couple.



44. Principe du coupleur.



45. Éclaté d'un coupleur.

5. Convertisseurs

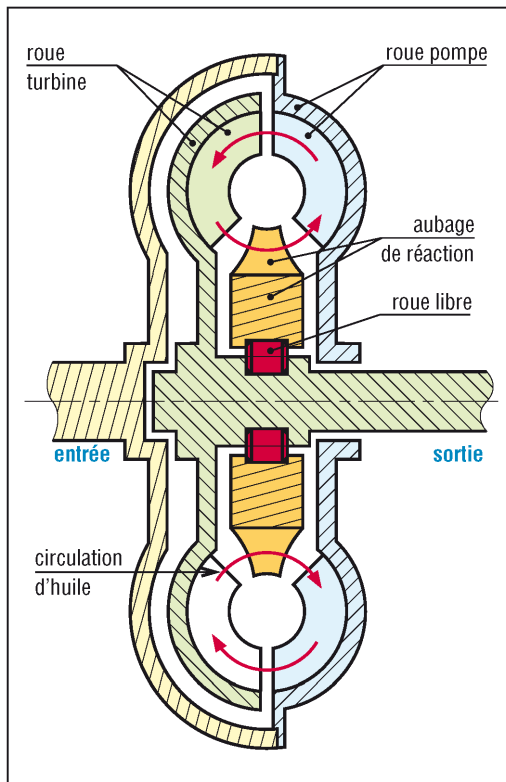
Ils ne doivent pas être confondus avec les coupleurs. Ils permettent, grâce à un troisième organe (aubages ou ailettes de réaction pouvant modifier le sens de circulation du fluide) de faire varier le couple.

Il y a modification du couple lorsque la roue turbine se bloque ou tourne au ralenti alors que la roue pompe est à sa vitesse maximale. Le couple peut alors être multiplié par deux ou plus.

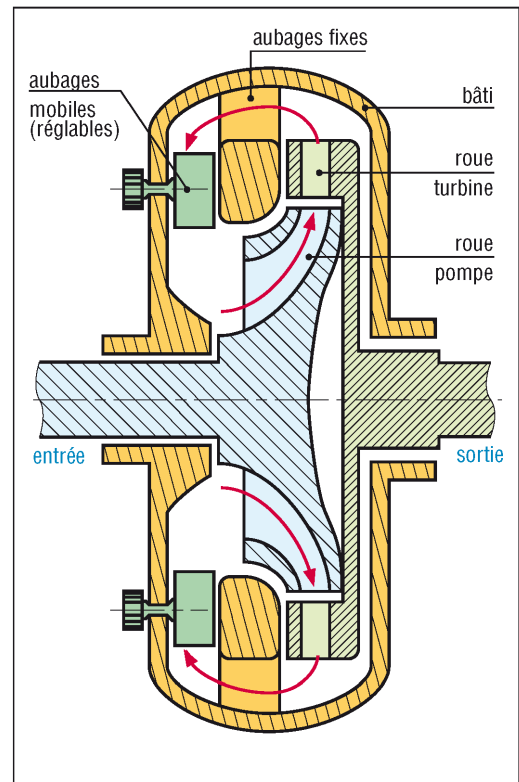
Si la pompe et la turbine tournent à la même vitesse les aubages de réaction tournent eux aussi dans le même sens et le convertisseur fonctionne comme un coupleur, sans amplification du couple.

Variante 1 : elle est souvent installée sur les véhicules routiers avec des boîtes automatiques.

Variante 2 : implantée sur de grosses installations, elle utilise des aubages réglables (par servomoteurs ...) permettant de gommer les différences entre couple moteur et couple récepteur (fonction égalisatrice). Lorsque les aubages mobiles obturent complètement la circulation d'huile, le moteur est presque déchargé.

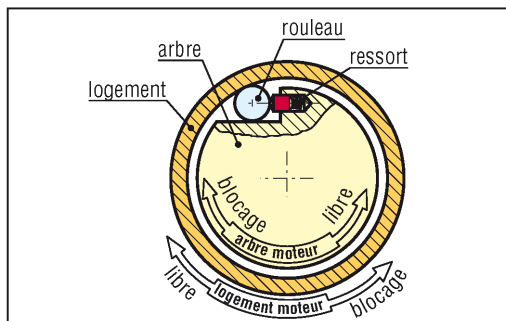


46. Variante 1.



47. Variante 2.

6. Roues libres



48. Roue libre, principe.

Elles permettent la transmission dans un seul sens de rotation et le débrayage dans l'autre. L'entraînement est obtenu par coincement ou arc-boutement du rouleur entre les deux arbres, « effet de cône », le ressort assurant le contact entre les trois éléments.

Les applications et les technologies (formes des rouleaux...) sont variées.

34

LUBRIFICATION GRAISSAGE TRIBOLOGIE

OBJECTIFS

- Préciser les quatre cas du frottement.
- Indiquer les caractéristiques, les propriétés et les classifications des principales familles de lubrifiants.
- Décrire les principaux dispositifs de lubrification.

La fonction d'un lubrifiant est de favoriser le mouvement ou le glissement entre deux surfaces frottantes.

D'une manière générale, les lubrifiants réduisent les frottements et l'usure, évitent le grippage, participent au refroidissement, évacuent les impuretés (poussières, débris d'usure...), protègent contre la corrosion, peuvent avoir une fonction nettoyante (détergente), favori et parfois participer à l'étanchéité. Chacune de ces fonctions peut être plus ou moins développée selon l'application.

De tous les lubrifiants, enrichis ou non, les huiles et les graisses minérales à base de pétrole sont les plus utilisées. Les produits de synthèse (fabriqués chimiquement) occupent une place grandissante.

Les lubrifiants, en constante évolution, sont des éléments importants de la conception des produits, car ils participent aux économies d'énergie (éco-conception).

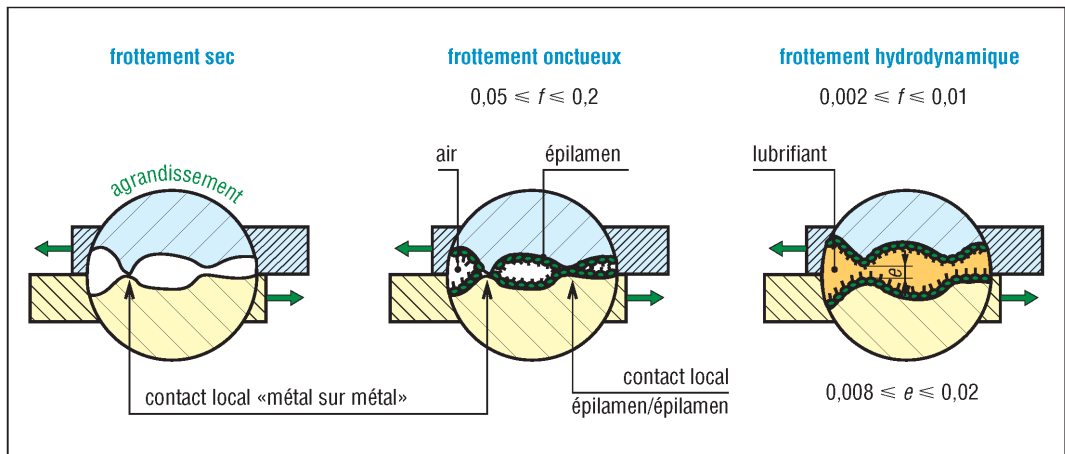
Remarques : à elles seules, les huiles représentent plus de 95 % du total des lubrifiants employés.

La tribologie est la science du frottement, de l'usure et de la lubrification.

| Principaux lubrifiants | | | |
|--|--|--|--|
| | solides | liquides | pâteux |
| lubrifiants naturels | <ul style="list-style-type: none">- graphite- bisulfure de molybdène MoS₂- biséléniures- cires, résines... | <ul style="list-style-type: none">- huiles minérales de pétrole : aromatiques paraffiniques (alcanes) et naphthéniques- huiles siccatives | <ul style="list-style-type: none">- graisses (à base d'huile de pétrole)- pâtes lubrifiantes- lanoline, suif, brais... |
| lubrifiants de synthèse ou artificiels | <ul style="list-style-type: none">- plastiques fluorés (PTFE...)- polyamides- vernis de glissement | <ul style="list-style-type: none">silicones, phosphates- huiles composées ou compound... | <ul style="list-style-type: none">- graisses de synthèse (silicone...)- pâtes lubrifiantes |

I - Quatre cas du frottement

Le frottement entre deux surfaces frottantes peut être décrit par quatre comportements typiques.



1. Principaux cas de frottement entre deux surfaces.

Le frottement sec : il n'y a pas de lubrifiant entre les surfaces en contact. Le glissement y est le plus difficile et l'usure la plus rapide ; il est caractérisé par des contacts locaux fréquents sur les aspérités des surfaces, des échauffements, des arrachements et des microsoudures.

Le frottement onctueux : un film de lubrifiant recouvre les surfaces en contact sous la forme d'un épilamen (très fine couche). Le frottement est diminué ($f \approx 0,05$ à $0,20$) et le glissement favorisé. Les contacts locaux directs, sans épilamen, sont plus rares ; il y a moins d'arrachements, de microsoudures et d'usure.

Le frottement mixte : c'est un mélange de frottement onctueux et de frottement hydrodynamique, caractérisé par une portance hydrodynamique intermittente avec quelques contacts locaux, épilamen sur épilamen. Le frottement ($f \approx 0,04$ à $0,1$) et l'usure sont encore réduits.

Le frottement hydrodynamique : il n'y a plus aucun contact entre les surfaces. Celles-ci sont toujours séparées par une couche de lubrifiant d'épaisseur minimale e de $0,02$ à $0,008$ mm. Le mouvement, à condition que la vitesse soit suffisante, crée une portance hydrodynamique comparable au ski nautique. Le frottement est très réduit ($f \approx 0,002$ à $0,01$) et l'usure pratiquement nulle.

Exemple : palier hydrodynamique (voir chapitre 23 : paliers lisses, coussinets).

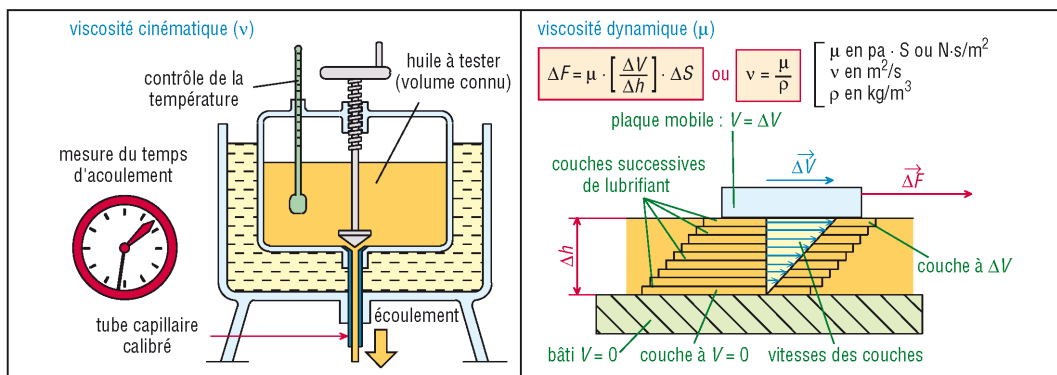
II - Huiles

Elles permettent d'obtenir un frottement onctueux, mixte ou hydrodynamique. Elles se présentent sous la forme d'une base (huile minérale ou de synthèse) avec des additifs (anti-usure, extrême pression, liés à la viscosité, antioxydants, anti-corrosion...) pour améliorer les caractéristiques ou adapter l'huile à l'application choisie.

La viscosité et le point d'écoulement sont les propriétés principales.

1. Viscosités

Plus une huile est épaisse, plus sa viscosité est élevée. La fluidité est la propriété inverse de la viscosité. La viscosité de la majorité des fluides diminue lorsque la température augmente.



2. Les viscosités.

a) Viscosité cinématique (ν) : on la détermine en mesurant, à une température donnée, la durée de l'écoulement d'un volume connu de liquide à travers un appareil comportant un orifice ou tube calibré (tube capillaire) de dimensions normalisées.

Unités : m^2/s ; Stoke (St) ou centistoke (cSt) ; $10\,000\text{ St} = 1\text{ m}^2/\text{s}$ et $1\text{ cSt} = 1\text{ mm}^2/\text{s}$

b) Viscosité dynamique (μ) : elle est égale au produit de la viscosité cinématique (ν) par la masse volumique du fluide (ρ) : $\mu = \rho \cdot \nu$.

Unités : Pa.s (pascal.seconde) ou $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$; poise (P) et centipoise (cP)

1 poise = 1 P = 0,1 Pa.s ; 1 000 centipoises = 1 000 cP = 1 Pa.s

| Exemples (à 20 °C) | viscosité ν (cSt) | masse volumique ρ (kg/m^3) | viscosité μ (Pa.s) |
|--------------------|-----------------------|---|------------------------|
| essence | $\approx 0,74$ | 743 | 0,000 55 |
| gas oil à 20 °C | ≈ 14 | 893 | 0,013 |
| huile SAE 10 | ≈ 95 | 909 | 0,088 |
| huile SAE 30 | ≈ 320 | 909 | 0,290 |
| huile SAE 40 | ≈ 770 | 909 | 0,700 |

| Huiles minérales et huiles de synthèse : comparaison des propriétés | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|--|--|
| familles | compatibilité avec huiles minérales | biodégradabilité | fluidité à basse température | viscosité à haute température | résistance oxydation haute température | applications |
| huiles minérales | – | médiocre | médiocre | acceptable | acceptable | les plus usuelles sont les huiles paraffiniques hautement raffinées |
| polyalpholé-fines (PAO) | excellente | médiocre | bonne (IV > 100) | bonne | très bonne | travaillent dans des conditions extrêmes (température...) : moteurs, transmissions, engrenages, paliers... |
| alkylats aromatiques | excellente | médiocre | bonne | acceptable | bonne | systèmes travaillant à basse températures (– 80 à – 100 °C) : compresseurs frigo... |
| esters (diesters) organiques | acceptable à bonne | bonne | bonne | bonne à très bonne | bonne à excellente | transmissions d'hélicoptères, moteurs à réaction, instrumentation, gyroscopes, fluides hydrauliques... |
| esters phosphates | acceptable | médiocre | acceptable | médiocre | acceptable | compresseurs, turbines à vapeur et à gaz, systèmes électro-hydrauliques... |
| polyglycols | médiocre | très variable | bonne | très bonne | bonne | réducteurs à vis, compresseurs, paliers à hautes températures, fluides hydrauliques peu inflammables... |

Caractéristiques pour choisir les huiles : base minérale ou synthétique ; inhibée à la corrosion, au moussage ; non additivée ; additivée ou compoundée ; propriétés anti-usure, extrême pression, détergentes ; avec agent d'adhésivité ; avec améliorant de l'indice de viscosité...

2. Propriétés caractéristiques des huiles

Point d'écoulement : c'est la température à partir de laquelle une huile, chauffée, puis refroidie dans des conditions bien précises cesse de couler (début de cristallisation ou de solidification).

Index de viscosité (VI ou IV) : caractérise la variation de la viscosité en fonction de la température. Un IV de 100 indique une très faible variation de la viscosité, un IV de 0 une très grande variation.

Onctuosité : elle caractérise l'aptitude d'une huile à adhérer aux surfaces (pouvoir adhérent) sous forme d'une fine couche (épilamen).

Volatilité, point éclair : température à partir de laquelle les vapeurs émises par une huile, chauffée dans des conditions bien précises, s'enflamment au contact d'une flamme puis s'éteignent aussitôt.

Autres propriétés : résistance à l'oxydation, à la corrosion, indice d'acide, teneur en cendres, en eau...

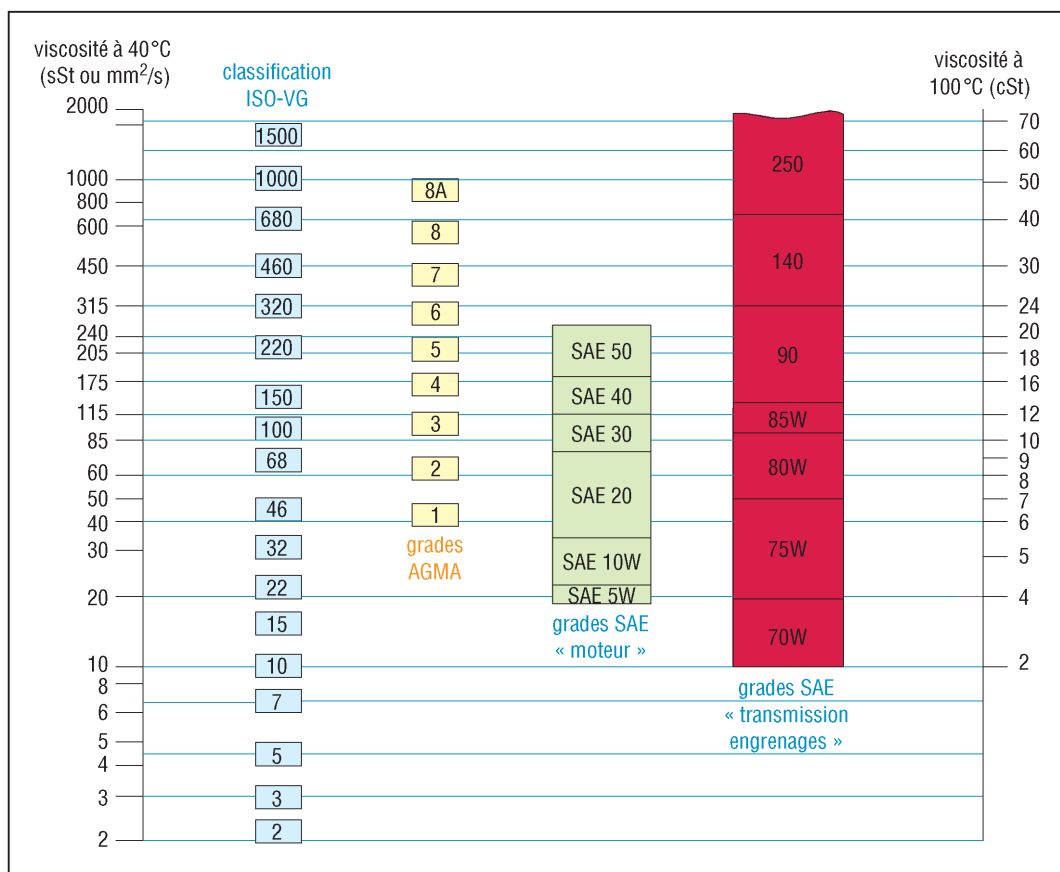
3. Principales classifications

a) Classification ISO : elle classe les huiles à partir de leur viscosité (NF ISO 7448).

Désignation : lettres ISO VG suivi du nombre précisant la viscosité cinématique à 40 °C en centistoke. (classes : 2 – 3 – ... – 1500 – 2200 – 3200).

Exemple : une huile classée ISO-VG 15 a pour limites de viscosité 13,5 et 16,5 cSt, 15 représentant la viscosité moyenne la plus probable.

| Classes ISO de viscosité | Limites de viscosité cSt à 40 °C | Classes ISO de viscosité | Limites de viscosité cSt à 40 °C |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| ISO VG 2 | 1,98 à 2,42 | ISO VG 100 | 90,0 à 110 |
| ISO VG 3 | 2,88 à 3,52 | ISO VG 150 | 135 à 165 |
| ISO VG 5 | 4,14 à 5,06 | ISO VG 220 | 198 à 242 |
| ISO VG 7 | 6,12 à 7,48 | ISO VG 320 | 288 à 352 |
| ISO VG 10 | 9,00 à 11,0 | ISO VG 460 | 414 à 506 |
| ISO VG 15 | 13,5 à 16,5 | ISO VG 680 | 612 à 748 |
| ISO VG 22 | 19,8 à 24,2 | ISO VG 1 000 | 900 à 1 100 |
| ISO VG 32 | 28,8 à 35,2 | ISO VG 1 500 | 1 350 à 1 650 |
| ISO VG 46 | 41,4 à 50,6 | ISO VG 2 200 | 1 980 à 2 420 |
| ISO VG 68 | 61,2 à 74,8 | ISO VG 3 200 | 2 880 à 3 520 |



3. Comparaison des classifications ISO et SAE.

b) Classification SAE : essentiellement utilisée pour l'automobile et les véhicules industriels (moteurs et transmissions), elle classe aussi les huiles selon leur viscosité, mais définit des tranches ou des intervalles continus de viscosité avec minimum et maximum.

La classification SAE 20, SAE 30... utilise la viscosité des huiles à 100 °C (huiles dites pour « hautes » températures).

La classification SAE 0W, SAE 5W... (avec W = winter) utilise la viscosité des huiles à -18 °C (huiles dites pour « basses » températures ou « hiver »).

Les huiles multigrades présentent deux viscosités caractéristiques. L'huile SAE 10W-40 a même viscosité qu'une huile SAE 40 à 100°C, même viscosité qu'une huile SAE 10W à -18 °C et couvre trois classes de viscosités.

| Grade SAE | 0W | 5W | 10W | 15W | 20W | 25W | 20 | 30 | 40 | 50 | | |
|--|---------------|--------------|--------------|--------------|--|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-----|-----|
| viscosité cinématique (cSt) à 100 °C | 3,8 mini | 3,8 mini | 4,1 mini | 5,6 mini | 5,6 mini | 9,3 mini | 5,6 à 9,3 | 9,3 à 12,5 | 12,5 à 16,3 | 16,3 à 21,9 | | |
| viscosité dynamique maxi Pa.s -30 °C | 3,25 à -30 °C | 3,5 à -25 °C | 3,5 à -20 °C | 3,5 à -15 °C | 4,5 à -10 °C | 6 à -5 °C | X | | | | | |
| Huiles classe L - Famille H - Systèmes hydrauliques - NF ISO 11158 et ISO 6743-4 - catégories : | | | | | | | | | | | | |
| HH : huiles minérales raffinées non inhibées | | | | | HR : huiles HL + propriétés viscosité/températures ↗ | | | | | | | |
| HL : huiles minérales raffinées + antirouille + antioxydation | | | | | HV : huiles HM + propriétés viscosité/températures ↗ | | | | | | | |
| HM : huiles HL + propriétés anti-usure + filtrabilité | | | | | HG : huiles HM + propriétés anti-saccade | | | | | | | |
| Grades usuels (viscosité ISO VG) | | | | | 10 | 15 | 22 | 32 | 46 | 68 | 100 | 150 |

c) Autres classifications : utilisent des désignations et symboles, principaux cas :

| Autres familles | A | F | D | T | C | M | G | U | E |
|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|----------|------------|----------------|------------|------------------------|---------------------|
| Utilisation | Graissage perdu | Paliers de broche | Compresseurs | Turbines | Engrenages | Travail métaux | Glissières | Traitements thermiques | Moteurs combustions |
| NF ISO | 6743-1 | 6743-2 | 6743-3 | 6743-5 | 6743-6 | 6743-7 | | | 6743-15 |

Exemple : famille E (ISO 6743-25) : EGA-EGB-EGC (2 temps – ISO 13738) ; EMA-EMB (4 temps).

4. Principaux dispositifs de lubrification à l'huile

Voir quelques exemples dans le chapitre 25 : montage de roulements (pages 290).

a) Lubrification par barbotage ou par bain d'huile : c'est la plus simple et la plus usuelle. Une partie du mécanisme en mouvement (roue dentée...) trempe dans le bain et emporte par adhérence de l'huile vers les points à lubrifier. La quantité d'huile du bain doit être suffisante et tenir compte des conditions de service : calories à évacuer, éviter les vidanges trop rapprochées, etc.

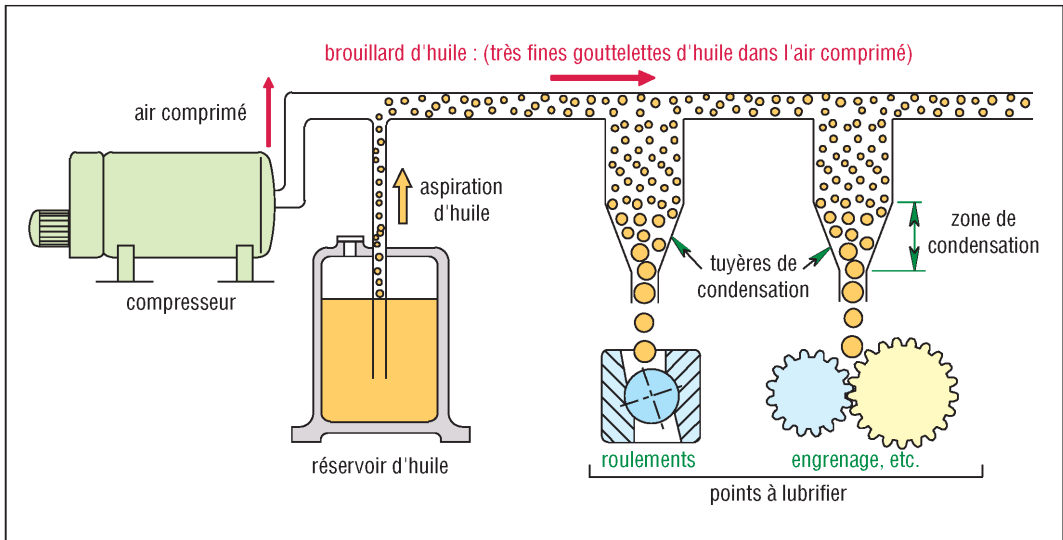
Le niveau du bain doit être contrôlé périodiquement : vis de contrôle, jauge, indicateur.

Un excès d'huile est souvent plus néfaste qu'un manque ; il crée un brassage source d'échauffements et de pertes d'énergie.

b) Lubrification par barbotage et projections : elle est une variante de la précédente. Le mouvement des composants (engrenages...) doit être assez rapide (effet centrifuge) pour, qu'après trempage, le débit des projections soit suffisant. L'huile projetée sur les parois ruisselle et peut être recueillie (cuvettes, renvois, larmiers...) puis dirigée (canaux) vers les parties à lubrifier.

c) Lubrification par brouillard d'huile ou air-huile : elle est utilisée aux vitesses très élevées (roulements, engrenages) mais aussi dans les réseaux pneumatiques (lubrificateurs).

Principe : un débit constant d'air comprimé aspire et pulvérise une certaine quantité d'huile sous forme de très fines gouttelettes. Le brouillard ainsi constitué est amené par un réseau de canalisations près des points à lubrifier. En ces points, des rétrécissements (raccords de condensation ou tuyères) condense l'huile sous forme de gouttes plus grosses directement utilisables pour la lubrification. Le débit d'air permet aussi le refroidissement et participe à l'étanchéité (repousse les particules étrangères).

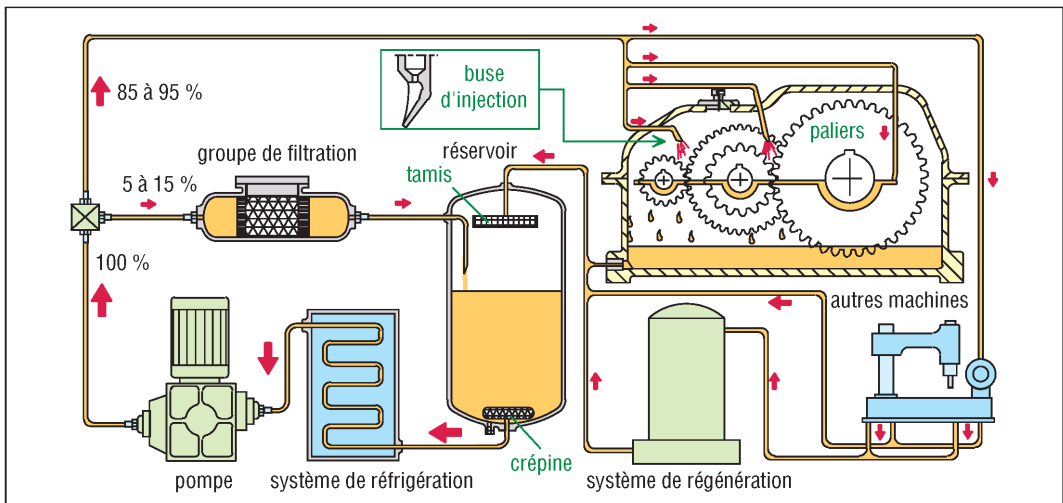


4. Principe de la lubrification par brouillard d'huile.

d) Lubrification par circulation d'huile : ce mode est le plus élaboré et le plus coûteux. Une même pompe lubrifie en même temps plusieurs zones ou points. Le débit d'huile, constant, arrivant en chaque point à lubrifier, peut être réglé (soupapes) et calculé au plus juste pour assurer lubrification et refroidissement. Des échangeurs de chaleur (réfrigérants), des systèmes de filtration peuvent être ajoutés à l'installation.

Exemple : lubrification des paliers d'un moteur à explosion (voir « paliers lisses » page 258).

Pour plus de détails voir NF ISO 7967-6.



5. Principe de la lubrification par circulation d'huile.

III - Graisses

Elles permettent un frottement onctueux ou un frottement mixte. Du fait de leur consistance, elles sont stables au repos et se comportent comme un solide. En service, sous l'action des charges, elles réagissent comme un liquide : la fluidité augmente et se rapproche de celle de l'huile de base.

Fabrication : elles sont obtenues par dispersion d'agents épaississants (savons métalliques déterminant les propriétés physiques : consistance, etc.) dans une « huile » avec ou sans additifs représentant 85 à 97 % de la masse totale. Le graphite, le bisulfure de molybdène, le plomb (« extrême pression »), les colorants et les charges (talc...) sont les additifs les plus courants.

1. Propriétés des graisses

Consistance : c'est la propriété principale. Elle exprime la résistance à la déformation de la graisse. Étroitement liée à l'adhérence et à l'onctuosité, elle diminue lorsque la température augmente (« comportement du beurre »).

Point de goutte : il caractérise la tenue de la graisse à la chaleur en précisant la température de début de liquéfaction.

Point de solidification : il indique la température de début de solidification de la graisse.

Autres propriétés : résistance au cisaillement, qualité extrême pression, filmo-résistance, acidité...

| Avantages des graisses par rapport aux huiles | Inconvénients des graisses par rapport aux huiles |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> – Permettent le graissage à vie – Étanchéité simplifiée, application aisée (même aux endroits difficiles d'accès) – Supportent mieux les chocs et vibrations, tiennent mieux aux vitesses lentes – Peuvent participer à l'étanchéité (permettent des jeux plus élevés) – Simplicité de conception et de mise en œuvre – Prix de revient modique | <ul style="list-style-type: none"> – Tendance au vieillissement (durcissent ou ramollissent selon les cas) – Ne conviennent ni aux vitesses élevées avec charges élevées ni pour les cas où il y a des échauffements, des températures élevées avec des calories à évacuer |
| | Évolution des graisses |
| | Les huiles de synthèse (diester, silicone) permettent un emploi à basses et hautes températures et les savons complexes (Li, Na, Ca) des températures élevées |

| Propriétés des graisses usuelles (bases : huiles minérales) | | | | | | | | | |
|---|--------------------|---|---------------------------|------------|-------|---------|----------|------------|--|
| type de la graisse | nature du savon | aspect (point de goutte) | température d'utilisation | résistance | | | | | observations |
| | | | | chaleur | eau | charges | vitesses | adhésivité | |
| au lithium** | lithium (Li) | butyreux (*) lisse (170/190°) | – 30 à 130 °C | ***** | ***** | ***** | ***** | *** | Les plus utilisées, tous usages, multiservices. Allie les propriétés des autres graisses |
| calcique (à la chaux) | calcium (Ca) | butyreux (*) lisse « rose » (80/90°) | – 20 à 70 °C | * | ***** | *** | *** | * | Insolubles dans l'eau prix faible, graissages courants peu sévères. Apte à l'étanchéité |
| sodique (à la soude) | sodium (Na) | fibreux (150/180°) | – 20 à 130 °C | **** | * | **** | **** | **** | pour roulements, sensible à l'eau, supporte vibrations et chaleur |
| à l'aluminium | à l'aluminium (Al) | butyreux (*) lisse (70/100°) | – 10 à 80 °C | * | ***** | * | * | ***** | faible résistance mécanique. Assez adhésives (chaînes...) |

(*) butyreux : qui à l'apparence ou les caractères du beurre ; ** variantes avec huiles de synthèse (– 50 à 160 °C).

2. Classification et désignation

Le grade NLGI est la classification la plus usuelle. Il est lié à la valeur d'enfoncement d'un cône pesant posé (pendant 5 secondes) sur la surface aplanie de la graisse à tester, préalablement malaxée à 25 °C. Classification désignation : NF ISO 6743-9 ; spécification : ISO 12924.

| Grade NLGI | 000 | 00 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| consistance | très fluide | fluide | semi-fluide | très molle | molle | moyenne | dure | très dure | extra dure |
| enfoncement cône pesant (en 0,1 mm) | 445 à 475 | 400 à 430 | 355 à 385 | 310 à 340 | 265 à 295 | 220 à 250 | 175 à 205 | 130 à 160 | 85 à 115 |
| utilisation | — | A | A-B | B-C | B-C-D-E | E | – | – | – |

A = engrenages sous carter ; B = engrenages apparents, chaînes, câbles... ; C = articulations, cardans, chaînes ; D = graisses tous usages ; E = roulements, galets, axe vertical ; graissage centralisé : grades 0 et 1.

| Désignation normalisée des graisses - NF ISO 12924 et NF ISO 6743-9 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------------|-----------|------------|--|--|--------|-------|------|-------|
| ISO | L | X | Symbole 1 | | Symbole 2 | | Symbole 3 | Symbole 4 | Grade NGLI | | | | | | |
| Sigle ISO | Classe des lubrifiants | Famille des graisses | Température minimale d'utilisation | Température maximale d'utilisation | Contamination par l'eau | Aptitude à lubrifier sous charge élevées | Consistance NGLI (page 413) | | | | | | | | |
| Exemple : graisse de désignation ISO-L-XBEGB 00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ISO | L | X | B | E | G | B | 00 | | | | | | | | |
| Pour une graisse utilisable de -20 à 160°C ; sans protection anti rouille, résistante au délavage à l'eau ; ayant des propriétés extrême pression ; un nombre de consistance NGLI 00 (« fluide »). | | | | | | | | | | | | | | | |
| Signification des symboles 1-2-3-4 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Symbole 1 | A(L) | B(L) | C(L) | D(L) | E(L) | A(F) | B(F) | C(F) | D(F) | E(F) | A(P) | B(P) | C(P) | D(P) | E(P) |
| Température mini (°C) d'utilisation | 0 | -20 | -30 | -40 | < -40 | 0 | -20 | -30 | -40 | < -40 | 0 | -20 | -30 | -40 | < -40 |
| | Couple démarrage ≤ 1000 mN.m Couple fonctionnement ≤ 1000 mNm | | | | | Pression d'écoulement ≤ 1400 hPa | | | | | Pénétrabilité 1/10 mm ≥ 140 ≥ 120 ≥ 120 ≥ 100 ≥ 100 | | | | |
| Symbole 2 | A | | B | | C | | D | | E | | F | | G | | |
| Température maxi (°C) | 60 | | 90 | | 120 | | 140 | | 160 | | 180 | | > 180 | | |
| Point de goutte °C | ≥ 90 | | ≥ 130 | | Rapport | | | | | | | | | | |
| Durée de vie en heures (h) | F ₅₀ ≥ 100 h | | | | | | | | | | | | | | |
| Symbole 3 | A | B | C | D | E | F | G | H | I | | | | | | |
| Protection anti-rouille | L | M | H | L | M | H | L | M | H | L = sans protection ; M = protection en présence d'eau ; H = protection en présence d'eau salée. | | | | | |
| Protection anti-rouille | L | L | L | M | M | M | H | H | H | L = sèche ; M = humidité ambiante ; H = délavage à l'eau. | | | | | |
| Symbole 4 – pouvoir lubrifiant sous charges élevées | | | | | | | | | | A | | B | | | |
| Propriétés extrême pression (EP) | | | | | | | | | | non | | oui | | | |
| Exigence à l'essai quatre billes | | | | | | | | | | aucune | | ≥ 25 0 | | | |

3. Principaux dispositifs de graissage

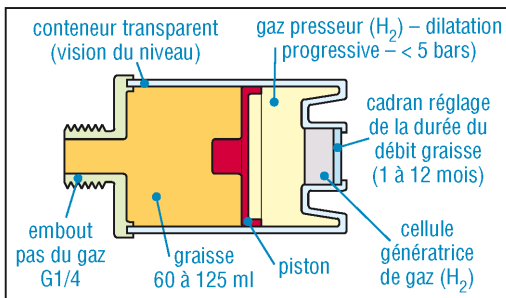
Voir quelques exemples chapitre 25 : montage de roulements page 285.

a) Graissage par garnissage au montage : solution simple et usuelle, le graissage peut être à vie ou périodique, avec regarnissage après démontage et nettoyage lors des opérations de maintenance. La quantité de graisse prévue doit être suffisante, compte tenu de la durée de vie attendue et des conditions de fonctionnement (température...).

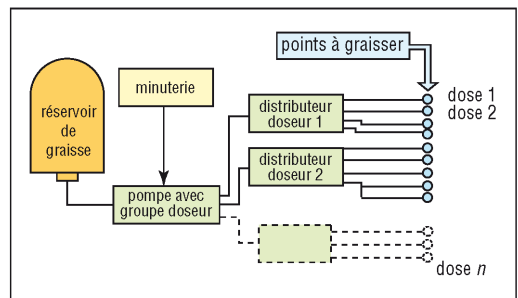
b) Utilisation des graisseurs : les graisseurs permettent le regraissage périodique sans démontage du dispositif. Pour éviter les excès de graisse, il y a lieu de prévoir des systèmes d'évacuation, en particulier pour la graisse usagée (chicanes, soupape à graisse, bouchon de vidange...). L'emploi des graisseurs automatiques diminue le nombre des interventions et garantit un graissage régulier.

c) Graissage centralisé : complètement automatisé, il est intéressant lorsque les points à lubrifier sont nombreux, jusqu'à plusieurs milliers, ou lorsque l'accès est difficile ou impossible. Il diminue les risques d'accident, les oublis, et évite l'arrêt des installations.

Le lubrifiant est envoyé sous pression, par intermittence, vers des distributeurs doseurs ou nourrices par une pompe avec réseau de canalisations. Les distributeurs doseurs, installés près des points à graisser, fournissent ensuite la dose prévue en chaque point.



6. Exemple de graisseur automatique (SKF...).



7. Installation simplifiée de graissage centralisé.

35

JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ

OBJECTIFS

- Décrire et indiquer les caractéristiques, les propriétés et la classification des principaux joints d'étanchéité.
- Préciser les matériaux utilisés.

Les joints d'étanchéité, bien que passant inaperçus, sont des éléments importants au bon fonctionnement des systèmes. L'explosion de la navette spatiale Challenger, en 1986, fut causée par la défaillance d'un joint non compatible du propulseur. Il en existe une grande variété (joints plats ou profilés, pâtes, revêtements...), seules quelques solutions industrielles typiques sont abordées ici.

I - Généralités

Définition : une enceinte est dite parfaitement étanche si aucune quantité de fluide qui y est contenu ne peut en sortir et si aucune particule (ou fluide) étrangère ne peut y entrer.

| Paramètres à prendre en compte pour le choix d'une étanchéité | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Nature du fluide à étancher- Pression du fluide (pointes)- Température et dilatation- Mouvement relatif des surfaces à étancher- Vitesse du mouvement- Formes des surfaces à étancher- Dimensions et tolérances- États de surface (rugosité) | <ul style="list-style-type: none">- Durée de vie souhaitée- Tolérance d'une fuite- Compatibilité chimique entre le joint et le fluide à étancher- Porosité des matériaux- Simplicité de la conception- Contrôle de l'étanchéité- Entretien, maintenance- Aspect commercial |

Il existe une grande variété de joints, qui peuvent cependant être classés en deux familles :

Les joints pour étanchéité statique : les surfaces à étancher restent immobiles l'une par rapport à l'autre.

| Principaux dispositifs pour étanchéité statique | | | | |
|---|---|--|--|---|
| sans joint (par écrasement) | joints indémontables | joints plats | joints profilés | joints particuliers |
| <ul style="list-style-type: none">- cône/cône- sphère/cône- cône/cylindre | <ul style="list-style-type: none">- brasure- soudure- collage | <ul style="list-style-type: none">- homogènes- composites- pour brides | <ul style="list-style-type: none">- toriques- 4 lobes... | <ul style="list-style-type: none">- soufflets- diaphragmes- membranes |

Les joints pour étanchéité dynamique : les surfaces à étancher sont mobiles ou en mouvement l'une par rapport à l'autre. Exemple : arbre/moyeu (voir chapitre 25 : montage de roulements).

| Principaux dispositifs et joints pour étanchéité dynamique | | | | |
|--|--|--|---|--|
| Joints pour pièces tournantes | | Joints pour applications linéaires | | |
| Joints frottants | Dispositifs sans frottement | Joints hydrauliques et pneumatiques | Joints pour pulsations | Joints divers |
| – joints à lèvres : radiaux ou axiaux – garnitures mécaniques | – passages étroits – chicanes, labyrinthes – dispositifs centrifuges : déflecteur, rainure... | – joints pour pistons de vérins – joints pour tige de vérins... | – diaphragmes – soufflets – membranes | – presse étoupe (robinetterie...) – segments pour piston (moteur) |

Principales sources de fuites : défauts de formes et rugosité des surfaces en contact ; défauts de centrage ; dilatations ; porosité des matériaux ; incompatibilité chimique joint/milieu...

II – Matériaux pour joints

De nombreux matériaux sont possibles : papiers, fibres diverses, composites (base : métallique, verre, carbone, céramique...), métaux (pour pressions et températures élevées), caoutchoucs et plastiques...

Caoutchoucs et de certains plastiques : ils occupent une place de choix. La température et la compatibilité chimique avec le milieu sont les principaux paramètres pour les choisir.

Le nitrile, pour usages courants, et les élastomères fluorés, pour milieux plus agressifs et températures plus élevées (exemple : FPM), sont de loin les caoutchoucs les plus utilisés. Ils sont compatibles avec la plupart des huiles. Beaucoup de joints sont prévus pour des systèmes hydrauliques et doivent donc résister aux huiles et aux graisses. La plupart des élastomères changent de volume ou « gonflent » en présence d'huiles à base de pétrole. La résistance à la traction et la dureté sont de bons indicateurs sur la résistance à l'abrasion et à l'extrusion, qualités essentielles pour les joints dynamiques. Voir NF ISO 6072 ; NF T47-503 ; NF L17-107.

| Caractéristiques essentielles des principaux élastomères pour joints d'étanchéité | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------|--------------------------|---------------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------|--------|-----------------------|-------|---|
| matériau | abréviation | températures emploi (°C) | températures limites (°C) | dureté (Shore) | résistance • compression • traction | résistance à l'abrasion | non perméabilité aux gaz | résistances chimiques | | | | | qualités essentielles emploi type le plus usuel avec |
| | | | | | | | | à l'air O ₂ , ozone | huiles minérales | acides | carburants pétroliers | eau | |
| Nitriles (Butadiène Acrylonit.) | NBR (HNBR) | -30 à 100 | -50 à 130 | 30 à 90 | •B •B | C à B | B à C | A à C | A | B à C | A à B | A à C | huiles, eau, air comprimé ; pneumatique ; carburants ; éviter O ₂ , ozone, lumière |
| Fluoro-carbones | FKM (FPM) | -20 à 200 | -20 à 230 | 50 à 90 | •B •B | B à D | A | A | A | A à D | A | A à D | lubrifiants, carburants hautes températures, ozone, O ₂ , solvants |
| Silicones | VMQ | -60 à 220 | -70 à 250 | 30 à 90 | •B •D | C à D | D à NR | A | A à B | D à NR | A à C | A à D | chaleur, froid, air chaud, résistance au vieillissement, diélectrique, résiste déchirement |
| Polyuréthanes | AU | -30 à 80 | -30 à 100 | 65 à 100 | •A •A | A | B à A | A à C | B à A | D à NR | A à C | C à D | résistance abrasion, usure, mécanique et déchirement |
| Éthylène Propylène | EPM EPDM | -50 à 150 | -55 à 160 | 40 à 90 | •C •B | A à C | D à C | A à B | C à D | A à NR | C à D | A à B | résistance, abrasion, air chaud, atmosphère, esters phosphoriques, fluides hydrauliques |
| Chloroprènes | CR | -40 à 100 | -40 à 130 | 30 à 90 | •B •B | C | B à C | A à B | B à A | B à NR | B à C | B à C | inflammable, résistance aux huiles, agents atmos, eau de mer |
| Butyl | IIR | -25 à 150 | -40 à 180 | 40 à 80 | •A •C | C | A | A à B | C à D | A à C | C | A à B | huiles et graisses minérales, faible perméabilité, diélectrique |
| Polyacrylique | ACM | -25 à 150 | -30 à 180 | 40 à 80 | •A •D | B à C | B à C | A à B | A | B à D | A à B | C à D | huiles et graisses minérales, résiste au vieillissement |

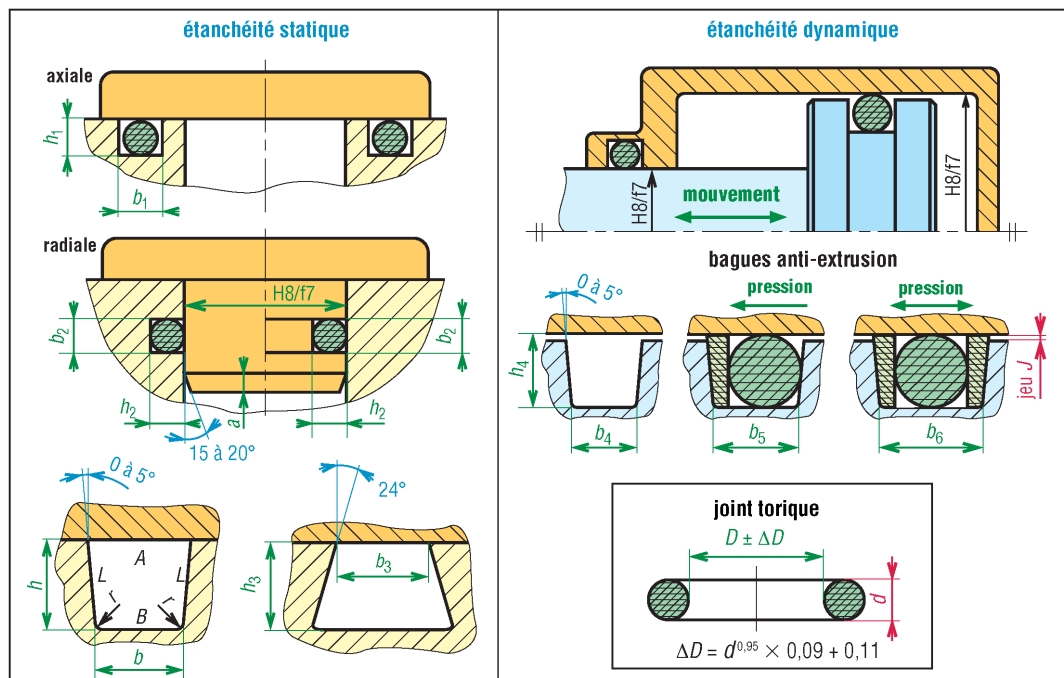
A : excellent, B : bon, C : moyen, D : passable, NR : non recommandé

III – Principaux joints normalisés

1. Joint torique

Très utilisé, il convient particulièrement aux applications statiques et à certaines applications dynamiques (vitesse réduite et pression modérée). Il est économique, léger, peu encombrant, facile à monter, fiable en service et nécessite peu d'entretien. Il est disponible dans des milliers de dimensions et dans de nombreuses nuances d'élastomères (nitrile, viton...).

Phénomène d'extrusion : l'action de la pression comprime le joint et l'applique avec force contre les surfaces de contact. Plus la pression est forte et plus l'élastomère doit être dur pour éviter l'extrusion ou l'expulsion du joint. L'extrusion dépend du jeu diamétral au montage, de l'intensité de la pression et de la dureté du joint. Un mouvement relatif augmente les risques. Les bagues anti-extrusion (PTFE...) permettent une correction.



1. Dimensions et caractéristiques de montage des joints toriques.

| joint | Étanchéité statique - dimensions | | | | | Étanchéité dynamique - dimensions | | | |
|-------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | axiale ISO 3601-2 | | | radiale | | hydraulique | | pneumatique | |
| | $h_{1,0}^{+0,1}$ mm | pneumatique $b_{1,0}^{+0,2}$ | hydraulique $b_{1,0}^{+0,2}$ | h_2 mm | $b_{2,0}^{+0,25}$ mm | h_4 mm | b_4 mm | h_4 mm | b_4 mm |
| 1,78 | 1,3 | 2,9 | 3,2 | 1,4 à 1,45 | 2,8 | 1,45 à 1,5 | 2,4 à 2,6 | 1,5 à 1,55 | 2,3 à 2,5 |
| 2,62 | 2,0 | 3,6 | 4,0 | 2,1 à 2,2 | 3,8 | 2,25 à 2,3 | 3,6 à 3,8 | 2,2 à 2,35 | 3,1 à 3,3 |
| 3,53 | 2,7 | 4,8 | 5,3 | 2,8 à 2,9 | 5,0 | 3,1 à 3,15 | 4,8 à 5,0 | 3,2 à 3,25 | 4,2 à 4,4 |
| 5,33 | 4,2 | 7,0 | 7,6 | 4,4 à 4,5 | 7,2 | 4,7 à 4,75 | 7,1 à 7,3 | 4,9 à 4,95 | 6,4 à 6,6 |
| 6,99 | 5,7 | 8,5 | 9,0 | 5,8 à 5,9 | 9,5 | 6,3 à 6,4 | 9,5 à 9,7 | 6,55 à 6,6 | 8,4 à 8,6 |

| Étanchéité statique et dynamique – dimensions communes | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------|-----------|--------------------|------------------------|---|-------------------|-------------------|--|-----------------------|
| d mm | chanfrein- rayon ISO 3601-2 | | gorge trapézoïdale | | avec bagues anti extrusion – ISO 3601-2 | | | | |
| | a (mm) 20° à 15° | r (mm) | h_3 mm | $b_{3,0}^{+0,1}$ mm | sans bague | | bague d'un côté | | bagues des deux côtés |
| | | | | | $b_{4,0}^{+0,25}$ | $b_{5,0}^{+0,25}$ | $b_{6,0}^{+0,25}$ | | |
| 1,78 | 0,9 à 1 | 0,2 à 0,4 | 1,25 à 1,3 | 1,40 | 2,8 | 4,2 | 5,6 | | |
| 2,62 | 1,1 à 1,5 | 0,2 à 0,4 | 2,05 à 2,1 | 2,10 | 3,8 | 5,2 | 6,6 | | |
| 3,53 | 1,4 à 1,8 | 0,4 à 0,8 | 2,8 à 2,85 | 2,85 | 5,0 | 6,4 | 7,8 | | |
| 5,33 | 2,1 à 2,7 | 0,4 à 0,8 | 4,55 à 4,63 | 4,35 | 7,2 | 8,0 | 10,9 | | |
| 6,99 | 2,8 à 3,6 | 0,8 à 1,2 | 5,85 à 5,93 | 5,85 | 9,5 | 12,3 | 15,1 | | |

| Joints toriques (et joints à 4 lobes) : extrait de dimensions normalisées – NF ISO 3601-1 | |
|---|---|
| d | D : diamètre intérieur du tore (en mm)- classes de tolérances A et B |
| 1,78 ± 0,08 A et B | 2,57 - 2,90 - 3,68 - 4,47 - 5,28 - 6,07 - 7,65 - 9,25 - 10,82 - 12,42 - 14,00 - 15,60 - 17,17 - 18,77 - 20,35 - 21,95 - 23,52 - 25,12 - 26,70 - 28,30 - 29,87 - 31,47 - 33,05 - 34,65 - 37,82 - 41,00 - 44,17 - 47,35 - 50,52 - 53,70 - 56,87 - 60,05 - 63,22 - 66,40 - 69,57 - 72,75 - 75,92 - 82,27 - 88,62 - 94,97 - 101,32 - 107,67 - 114,02 - 120,37 - 126,72 - 133,07 |
| 2,62 ± 0,08A ± 0,09B | 2,84 - 3,63 - 4,42 - 5,23 - 6,02 - 7,59 - 9,19 - 10,77 - 12,37 - 13,94 - 15,54 - 17,12 - 18,72 - 20,29 - 21,89 - 23,47 - 25,07 - 26,64 - 28,24 - 29,82 - 31,42 - 32,99 - 34,59 - 36,17 - 37,77 - 39,34 - 40,94 - 42,52 - 44,12 - 45,69 - 47,29 - 48,90 - 50,47 - 52,07 - 53,64 - 55,25 - 56,82 - 58,42 - 59,99 - 61,60 - 63,17 - 64,77 - 66,34 - 67,95 - 69,52 - 71,12 - 72,69 - 75,87 - 82,22 - 88,57 - 94,92 - 101,27 - 107,62 - 113,97 - 120,32 - 126,67 - 133,02 - 139,37 - 145,72 - 152,07 - 158,42 - 164,77 - 171,12 - 177,47 - 183,82 - 190,17... |
| 3,53 ± 0,10 A et B | 4,34 - 5,94 - 7,52 - 9,12 - 10,69 - 12,29 - 13,87 - 15,47 - 17,04 - 18,64 - 20,22 - 21,82 - 23,39 - 24,99 - 26,57 - 28,17 - 29,74 - 31,34 - 32,92 - 34,52 - 36,09 - 37,69 - 40,87 - 44,04 - 47,22 - 50,39 - 53,57 - 56,74 - 59,92 - 63,09 - 66,27 - 69,44 - 72,62 - 75,79 - 78,97 - 82,14 - 85,32 - 88,49 - 91,67 - 94,84 - 98,02 - 101,19 - 104,37 - 107,54 - 110,72 - 113,89 - 117,07 - 120,24 - 123,42 - 126,59 - 129,77 - 132,94 - 136,12 - 139,39 - 142,47 - 145,64 - 148,82 - 151,99 - 158,34 - 164,69 - 171,04 - 177,39 - 183,74 - 190,09 - 196,44 - 202,79... |
| 5,33 ± 0,13 A et B | 10,46 - 12,07 - 13,64 - 15,24 - 16,81 - 18,42 - 19,99 - 21,59 - 23,16 - 24,77 - 26,34 - 27,94 - 29,51 - 31,12 - 32,69 - 34,29 - 37,47 - 40,64 - 43,82 - 46,99 - 50,17 - 53,34 - 56,52 - 59,69 - 62,87 - 66,04 - 69,22 - 72,39 - 75,57 - 78,74 - 81,92 - 85,09 - 88,27 - 91,44 - 94,62 - 97,79 - 100,97 - 104,14 - 107,32 - 110,49 - 113,67 - 116,84 - 120,02 - 123,19 - 126,37 - 129,54 - 132,72 - 135,89 - 139,07 - 142,24 - 145,42 - 148,59 - 151,77 - 158,12 - 164,47 - 170,82 - 177,17 - 183,52 - 189,87 - 196,22 - 202,57 - 208,92 - 215,27 - 221,62 - 227,97... |
| 6,99 ± 0,15 A et B | 113,67 - 116,84 - 120,02 - 123,19 - 126,37 - 129,54 - 132,72 - 135,89 - 139,07 - 142,24 - 145,42 - 148,59 - 151,77 - 158,12 - 164,47 - 170,82 - 177,17 - 183,52 - 189,87 - 196,22 - 202,57 - 208,92 - 215,27 - 221,62 - 227,97 - 234,32 - 240,67 - 246,99 - 253,37 - 266,07 - 278,77 - 291,47 - 304,17 - 316,87 - 329,57 - 342,27 - 354,97 - 367,67 - 380,37 - 393,07 - 405,26 - 417,96 - 430,66 - 443,36 - 456,06 - 468,76 - 481,46 - 494,16 - 506,86... |

| Jeu j_{maxi} (indicatif) en fonction de la dureté | | | |
|---|--------------------------------|-----|-----|
| pression p (bars) | dureté (shore) de l'élastomère | | |
| | 70 | 80 | 90 |
| $p \leq 60$ | 0,2 | | |
| $60 < p \leq 100$ | 0,1 | 0,2 | |
| $100 < p \leq 160$ | | 0,1 | 0,2 |
| $160 < p \leq 250$ | | | 0,1 |

pour des jeux supérieurs ajouter des bagues anti-extrusion.

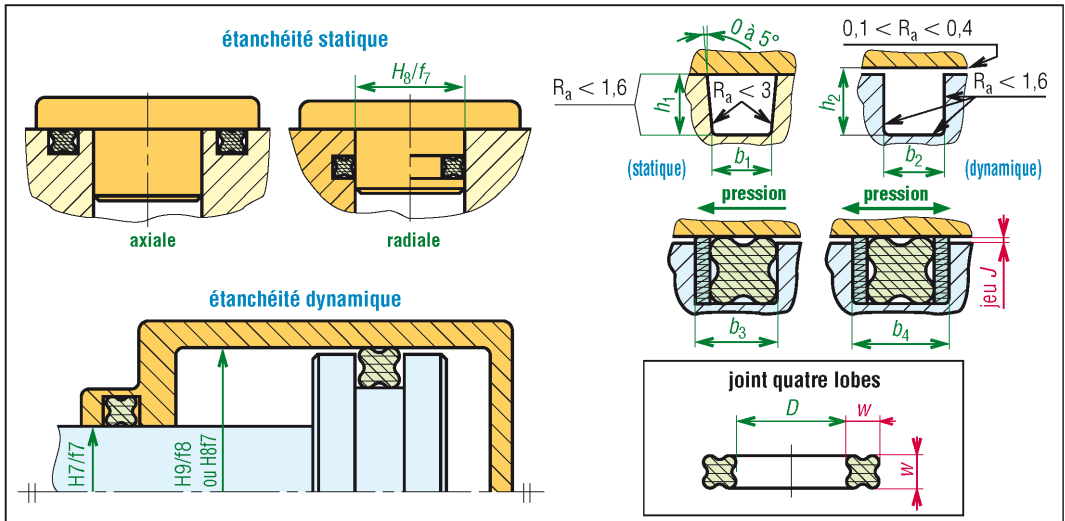
| États de surface des gorges | | R_a (µm) | R_z (µm) |
|-----------------------------|---|------------|------------|
| étanchéité statique | fond de gorge B et surface d'étanchéité A | ≤ 1,6 | ≤ 6,3 |
| | faces latérales L | ≤ 1,6 | ≤ 6,3 |
| étanchéité dynamique | surfaces frottantes A | ≤ 0,4 | ≤ 1,6 |
| | fond de gorge B | ≤ 1,6 | ≤ 6,3 |
| | surfaces latérales L | ≤ 1,6 | ≤ 6,3 |

2. Joint à quatre lobes

Les applications et les usages sont les mêmes que pour les joints toriques, ils sont un peu plus coûteux. On observe également moins de frottement et moins de risque de vrillage. De nombreux matériaux sont proposés : le nitrile (NBR), le viton (FPM), les silicones (SI)...

Comme précédemment, les pressions élevées sont possibles avec des bagues anti-extrusion.

Ils sont disponibles dans les mêmes dimensions que les joints toriques (voir paragraphe précédent).



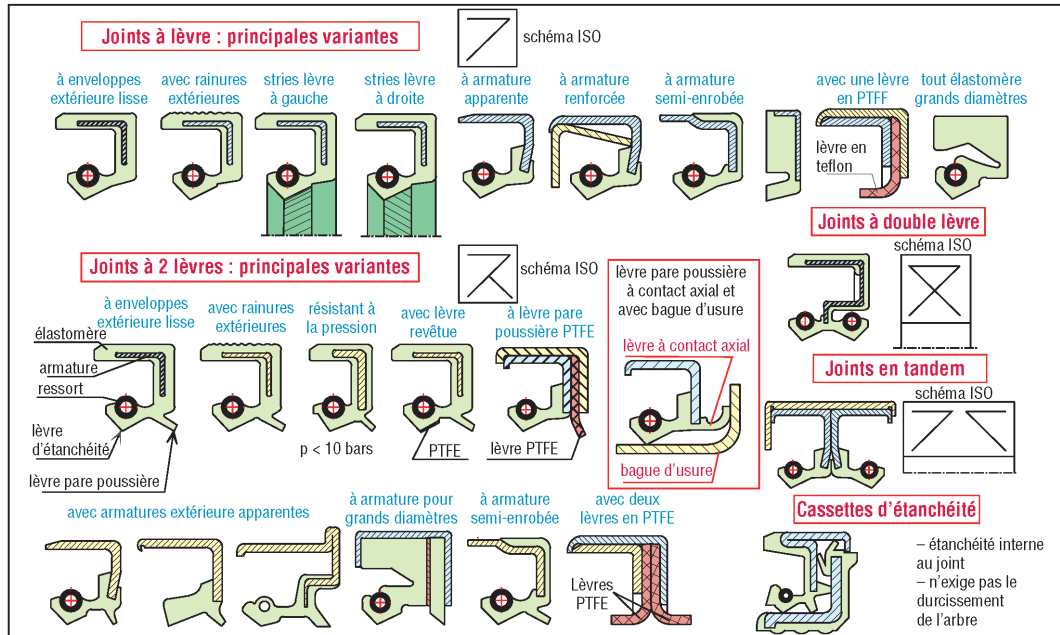
2. Dimensions et caractéristiques de montage des joints à quatre lobes.

| Principales cotes de montage | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|--------|
| W | tolérances sur W | h_1 (statique) | h_2 (dynamique) | $b_1 = b_2$ ± 0,1 | b_3 ± 0,1 | b_4 ± 0,1 | rayons |
| 1,78 | ± 0,08 | 1,40 à 1,45 | 1,50 à 1,55 | 2,1 | 3,5 | 4,9 | 0,22 |
| 2,62 | ± 0,08 | 2,25 à 2,30 | 2,30 à 2,35 | 3,1 | 4,5 | 5,9 | 0,30 |
| 3,53 | ± 0,10 | 3,10 à 3,15 | 3,20 à 3,25 | 4,1 | 5,5 | 6,9 | 0,40 |
| 5,33 | ± 0,13 | 4,75 à 4,80 | 4,90 à 4,95 | 6,1 | 7,8 | 9,5 | 0,40 |
| 6,99 | ± 0,15 | 6,20 à 6,25 | 6,45 à 6,50 | 8,1 | 10,6 | 13,1 | 0,60 |

3. Joints à lèvres à contact radial

Ce sont des joints pour étanchéité dynamique, mouvement de rotation uniquement. Ils sont essentiellement utilisés avec les huiles et les graisses. Compacts, ils se composent d'une lèvre (nitrile, FPM...) en forme de couteau, frottant radialement sur l'arbre. Un ressort jarretière, à spires jointives de forme torique, assure le maintien de contact lèvre/arbre.

Principales variantes : joint à une lèvre ; joint à deux lèvres, la lèvre supplémentaire est dite pare-poussière ; joints en tandem ; armature apparente ou non...



3. Joints à lèvres à contact radial : variantes technologiques usuelles pour diamètres petits et moyens.

| | | | |
|--------------------|----------------------------|----------------|---|
| NBR | Nitrile | - 50° à 100 °C | Joints les plus universels qui conviennent à la plupart des applications usuelles. Bonne résistance aux graisses et huiles minérales... |
| HNBR (WNBR) | Nitriles hydrogénés | - 50° à 150 °C | Variante des NBR en plus résistante à l'usure et aux températures élevées... |
| FPM (FKM) | Élastomères fluorocarbonés | - 20° à 200 °C | Ont les meilleures caractéristiques de résistance chimique (fluides hydrauliques..) et de tenue à la chaleur. Joints de longues durées... |
| ACM | Élastomères Polyacrylates | - 40° à 170 °C | Bonne tenue aux températures et au vieillissement (ozone). Bonne résistance aux lubrifiants EP... |
| PTFE | Polytétrafluoroéthylène | - 70° à 200 °C | Plastique non élastique (n'est pas un élastomère), utilisé avec les fluides agressifs, peut s'utiliser à sec, faible frottement... |
| MVQ (VMQ) | Caoutchouc silicone | - 70° à 160 °C | Large gamme de températures ; résistance médiocre à l'abrasion, aux huiles oxydées et aux additifs EP (extrêmes pressions) |

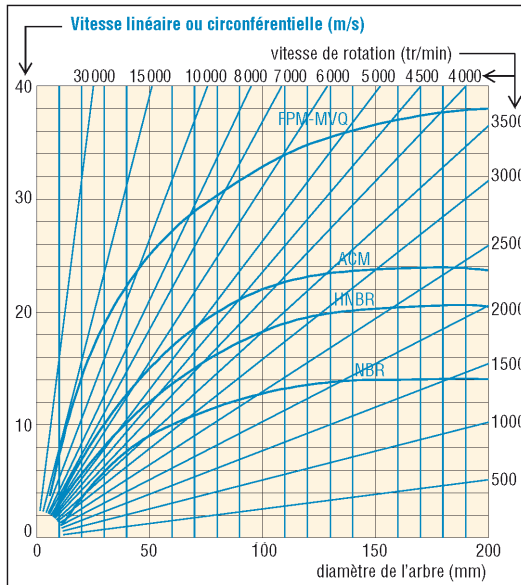
Conditions d'utilisation : ils doivent être utilisés sous de faibles pressions, moins de 1 bar, éventuellement 5 à 7 bars en ajoutant un support rigide.

La vitesse circonférentielle V au contact est limitée, à 8 à 14 m/s (NBR), 30 m/s (PTFE, FPM).

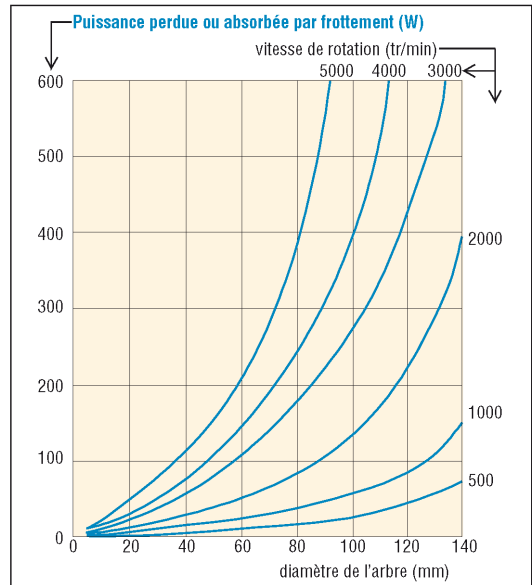
| Caractéristiques de l'arbre | | Caractéristiques du logement | |
|---|--|--|--|
| $0,2 \leq Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$ $1 \leq Rz \leq 4 \mu\text{m}$ circularité IT8 | dureté : 45 HRC si $V \leq 4 \text{ m.s}^{-1}$ 60 HRC si $V > 4 \text{ m.s}^{-1}$ ou 65 HRC avec le PTFE | armature enrobée (caoutchouc) $1,6 \leq Ra \leq 6,3 \mu\text{m}$ $10 \leq Rz \leq 25$; $R_{\text{max}} \leq 25 \mu\text{m}$ | armature apparente (métal) $0,8 \leq Ra \leq 3,2 \mu\text{m}$ $6,3 \leq Rz \leq 10$; $R_{\text{max}} \leq 10 \mu\text{m}$ |
| (défaut coaxialité maxi mm entre arbre et logement) divisé par \varnothing arbre mm $\approx 0,03$ | | (battement maxi mm) / vitesse arbre $\text{tr.min}^{-1} \approx 0,000 1$ | |

Défauts de coaxialité : pour éviter les faux ronds, sources de fuites, l'axe de l'arbre doit être coaxial à celui du logement recevant le joint. De même battement $< 0,3$.

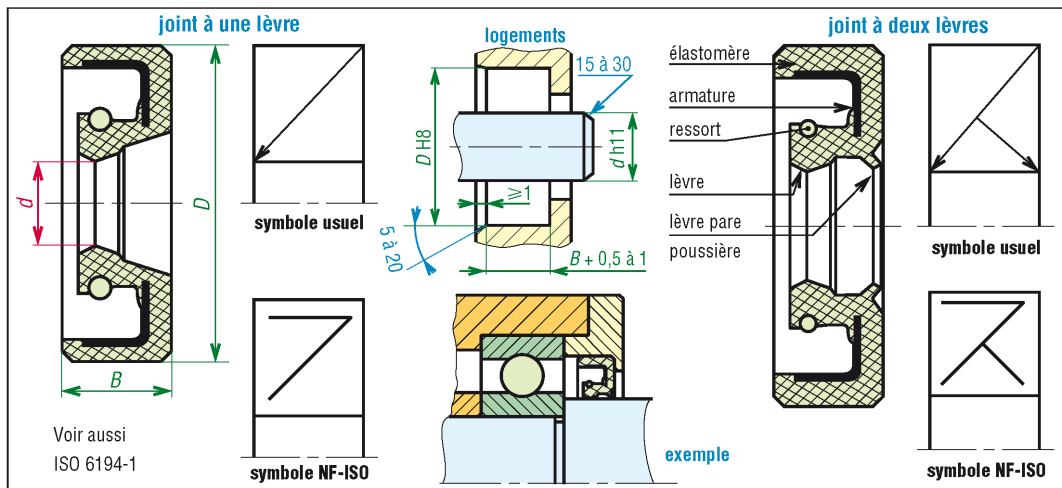
| | | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| d (mm) | 20 | 40 | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 |
| coaxialité (mm) | 0,05 | 0,15 | 0,25 | 0,28 | 0,32 | 0,33 | 0,34 | 0,35 |



4. Vitesses admissibles au contact lèvres arbre.



5. Pertes par frottement entre lèvres et arbre : contact radial.



6. Dimensions et caractéristiques des joints NBR = nitrile ; FPM = caout. fluoré ; ACM = polyacrylate ; SIL = silicone...

| d | D | B | 1 lèvre | 2 lèvres |
|----|----|----|------------------|----------------------|
| 6 | 16 | 7 | NBR-FPM-PTFE | FPM-NBR |
| 7 | 22 | 7 | NBR-FPM-PTFE | FPM-NBR |
| 8 | 22 | 7 | NBR-FPM-PTFE | FPM-NBR |
| | 24 | 7 | NBR-FPM-PTFE | FPM-NBR |
| 9 | 22 | 7 | NBR-FPM-PTFE | FPM-NBR |
| | 24 | 7 | NBR | NBR-FPM |
| 10 | 22 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 26 | 7 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| 12 | 24 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 28 | 7 | NBR-ACM-FPM | NBR-FPM |
| 15 | 24 | 7 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| | 32 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 17 | 28 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 35 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 18 | 30 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 30 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 35 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 20 | 30 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR |
| | 40 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 22 | 35 | 7 | NBR-FPM-ACM-PTFE | NBR-FPM-PTFE-FPM |
| | 40 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 25 | 35 | 7 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| | 40 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 28 | 40 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR |
| | 47 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 30 | 40 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM-PTFE-NBR-FPM |
| | 47 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM-PTFE-NBR-FPM |
| 32 | 45 | 7 | NBR-PTFE-FPM | NBR-FPM |
| | 52 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-PTFE |
| 35 | 47 | 7 | NBR-FPM-SIL | NBR-SIL-FPM |
| | 52 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 38 | 52 | 7 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| | 62 | 7 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| 40 | 52 | 7 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 60 | 10 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| 42 | 55 | 8 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 62 | 8 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| 45 | 62 | 8 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM-ACM-NBR |
| | 65 | 8 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM-ACM-NBR |

| d | D | B | 1 lèvre | 2 lèvres |
|-----|-----|----|--------------|--------------|
| 48 | 62 | 8 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| | 72 | 8 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| 50 | 65 | 8 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| | 72 | 8 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 52 | 68 | 8 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| | 72 | 8 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 55 | 70 | 8 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 80 | 8 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 58 | 72 | 8 | NBR-FPM | FPM-NBR |
| | 80 | 10 | NBR | NBR-FPM |
| 60 | 75 | 8 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 80 | 8 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 62 | 85 | 10 | NBR-FPM | NBR |
| | 90 | 12 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| 65 | 85 | 10 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM-PTFE |
| | 90 | 10 | NBR-FPM | NBR-FPM-PTFE |
| 70 | 90 | 10 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 100 | 10 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 72 | 100 | 10 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 75 | 95 | 10 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 100 | 10 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 78 | 100 | 10 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| 80 | 100 | 10 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 110 | 10 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 85 | 110 | 10 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 120 | 12 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| 90 | 110 | 12 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| | 120 | 12 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| 95 | 120 | 12 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 100 | 120 | 12 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 130 | 12 | NBR-FPM-PTFE | FPM-NBR |
| 105 | 130 | 12 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 140 | 12 | NBR-FPM | NBR |
| 110 | 130 | 12 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| | 140 | 12 | NBR-FPM-PTFE | NBR-FPM |
| 120 | 140 | 13 | NBR-FPM | NBR-FPM |
| 125 | 150 | 13 | NBR-FPM | NBR-FPM |

4. Joint V-ring

Ce joint est entièrement en élastomère (nitrile, viton...), à frottement axial, pour étanchéité dynamique. Sa lèvre, de forme conique, s'appuie sur une surface perpendiculaire à l'arbre et agit comme un déflecteur centrifuge qui éjecte boues, poussières, huiles, eau...

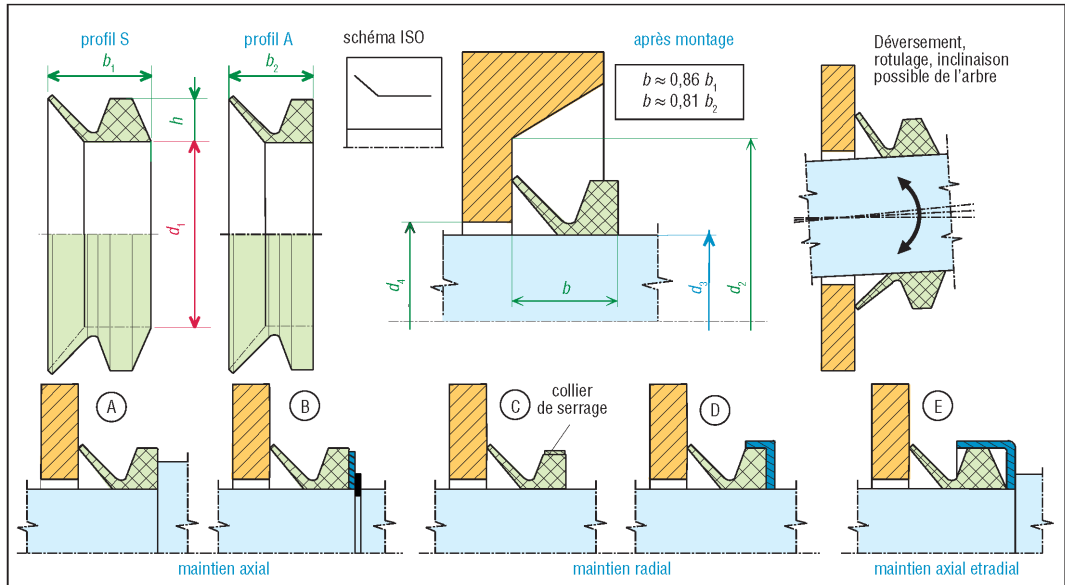
Disponible en grands diamètres, jusque 4 m, il supporte de plus grandes vitesses de rotation que le joint à lèvre radiale mais il est moins efficace. Il supporte un léger rotulage (1 à 4°).

Recommandations :

– Prévoir un appui ou blocage axial (utiliser le profil A) à partir de 8 m/s pour le nitrile (NBR) et 6,5 m/s pour le viton (FPM) ; **fig. 7A et B.**

– Prévoir un appui ou blocage radial supplémentaire à partir de 12 m/s (nitrile) et 10 m/s (viton). À 18 m/s la lèvre ne frotte plus ; **fig. 7C, D, E.**

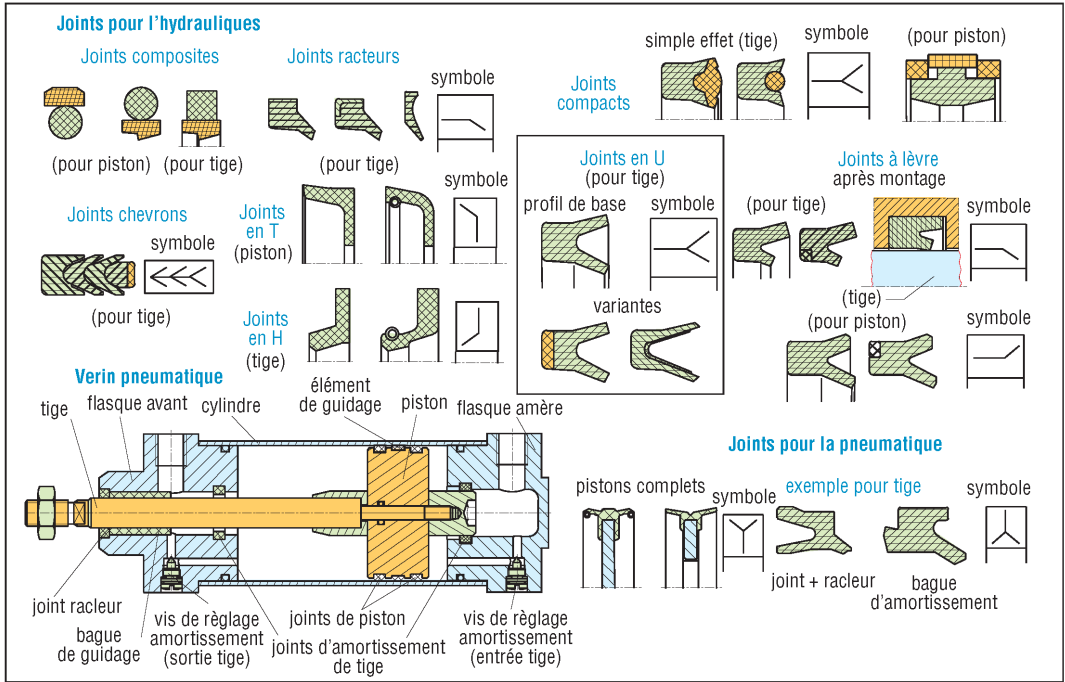
Rugosité surface d'appui : $1,6 \leq R_a \leq 3,2$ sans lubrification ; $R_a \leq 10$ avec lubrification.



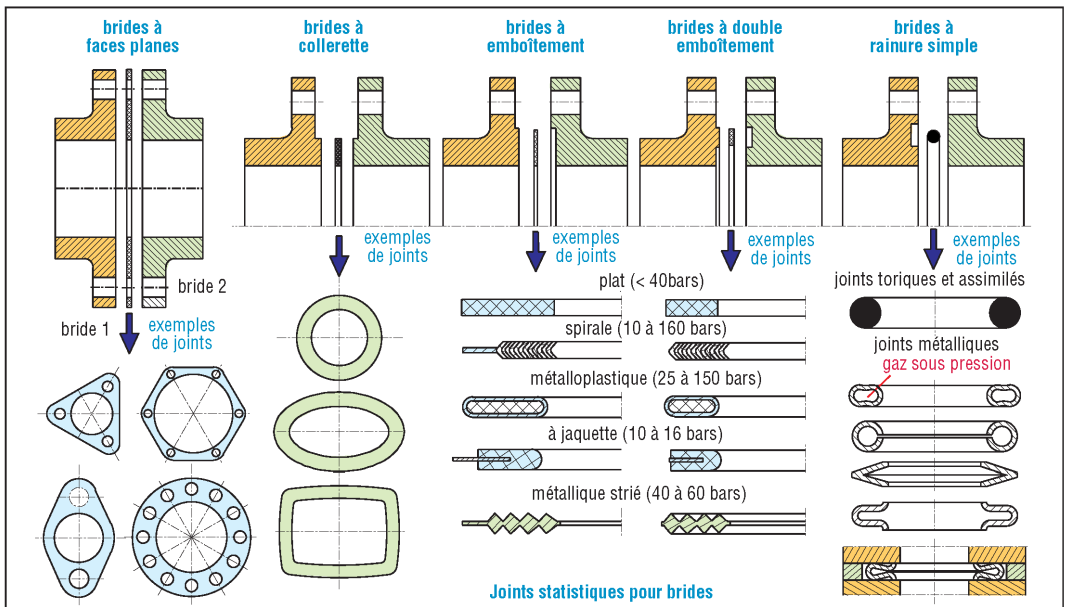
7. Joints V-ring : variantes technologiques et caractéristiques de montage.

| Joint V-Ring (à frottement axial) : extrait des principales dimensions normalisées | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|---------------|---------------|-----|-------|-------|------------------|-------|---------------|---------------|-----|-------|-------|
| d_3 Ø arbre | d_1 | d_2 mini | d_4 maxi | h | b_1 | b_2 | d_3 Ø arbre | d_1 | d_2 mini | d_4 maxi | h | b_1 | b_2 |
| 4,5 à 5,5 | 4 | d_1+6 | d_1+1 | 2 | 5,2 | 3,7 | 43 à 48 | 40 | d_1+15 | d_1+3 | 5 | 13,0 | 9,0 |
| 5,5 à 6,5 | 5 | d_1+6 | d_1+1 | 2 | 5,2 | 3,7 | 48 à 53 | 45 | d_1+15 | d_1+3 | 5 | 13,0 | 9,0 |
| 6,5 à 8 | 6 | d_1+6 | d_1+1 | 2 | 5,2 | 3,7 | 53 à 58 | 49 | d_1+15 | d_1+3 | 5 | 13,0 | 9,0 |
| 8 à 9,5 | 7 | d_1+6 | d_1+1 | 2 | 5,2 | 3,7 | 58 à 63 | 54 | d_1+15 | d_1+3 | 5 | 13,0 | 9,0 |
| 9,5 à 11,5 | 9 | d_1+9 | d_1+2 | 3 | 7,7 | 5,5 | 63 à 68 | 58 | d_1+15 | d_1+3 | 5 | 13,0 | 9,0 |
| 11,5 à 13,5 | 10,5 | d_1+9 | d_1+2 | 3 | 7,7 | 5,5 | 68 à 73 | 63 | d_1+18 | d_1+4 | 6 | 15,5 | 11,0 |
| 13,5 à 15,5 | 12,5 | d_1+9 | d_1+2 | 3 | 7,7 | 5,5 | 73 à 78 | 67 | d_1+18 | d_1+4 | 6 | 15,5 | 11,0 |
| 15,5 à 17,5 | 14 | d_1+9 | d_1+2 | 3 | 7,7 | 5,5 | 78 à 83 | 72 | d_1+18 | d_1+4 | 6 | 15,5 | 11,0 |
| 17,5 à 19,5 | 16 | d_1+9 | d_1+2 | 3 | 7,7 | 5,5 | 83 à 88 | 76 | d_1+18 | d_1+4 | 6 | 15,5 | 11,0 |
| 19 à 21 | 18 | d_1+12 | d_1+2 | 4 | 10,5 | 7,5 | 88 à 93 | 81 | d_1+18 | d_1+4 | 6 | 15,5 | 11,0 |
| 21 à 24 | 20 | d_1+12 | d_1+2 | 4 | 10,5 | 7,5 | 93 à 98 | 85 | d_1+18 | d_1+4 | 6 | 15,5 | 11,0 |
| 24 à 27 | 22 | d_1+12 | d_1+2 | 4 | 10,5 | 7,5 | 98 à 105 | 90 | d_1+18 | d_1+4 | 6 | 15,5 | 11,0 |
| 27 à 29 | 25 | d_1+12 | d_1+3 | 4 | 10,5 | 7,5 | 105 à 115 | 99 | d_1+21 | d_1+4 | 7 | 18,0 | 12,8 |
| 29 à 31 | 27 | d_1+12 | d_1+3 | 4 | 10,5 | 7,5 | 115 à 125 | 108 | d_1+21 | d_1+4 | 7 | 18,0 | 12,8 |
| 31 à 33 | 29 | d_1+12 | d_1+3 | 4 | 10,5 | 7,5 | 125 à 135 | 117 | d_1+21 | d_1+4 | 7 | 18,0 | 12,8 |
| 33 à 36 | 31 | d_1+12 | d_1+3 | 4 | 10,5 | 7,5 | 135 à 145 | 126 | d_1+21 | d_1+4 | 7 | 18,0 | 12,8 |
| 36 à 38 | 34 | d_1+12 | d_1+3 | 4 | 10,5 | 7,5 | 145 à 155 | 135 | d_1+21 | d_1+4 | 7 | 18,0 | 12,8 |
| 38 à 43 | 36 | d_1+15 | d_1+3 | 5 | 13,0 | 9,0 | 155 à 165 | 144 | d_1+24 | d_1+5 | 8 | 20,5 | 14,5 |

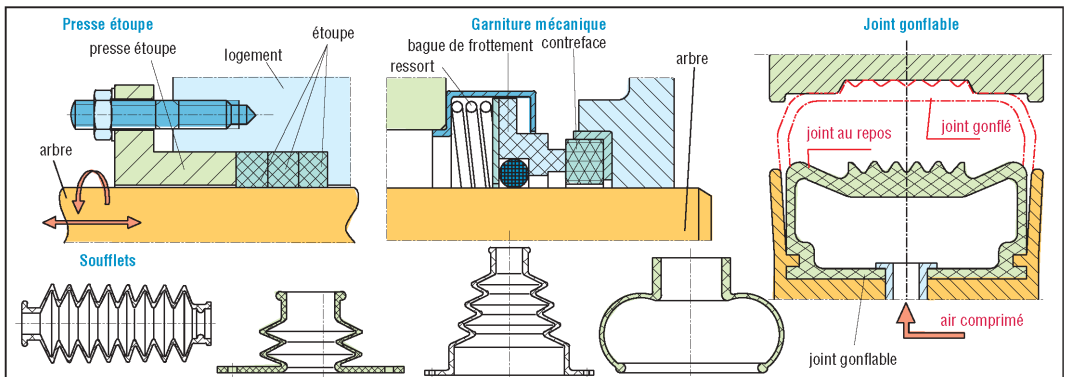
5. Autres familles de joints



8. Joints dynamiques pour l'hydraulique et le pneumatique (pour pressions élevées). Voir aussi page 611.



9. Joints statiques pour brides.



10. Autres joints usuels.

36

NOTION DE PROJET ET DE PRODUIT

OBJECTIFS

- Expliquer la démarche de projet, la comparer avec la démarche scientifique et en indiquer les principales étapes.
- Définir la notion de produit.
- Décrire quelques graphes utilisés pour la conduite des projets.

La démarche de projet, « design process », consiste à concevoir, innover, créer et réaliser un produit à partir d'un besoin à satisfaire. C'est à la fois un art et une science.

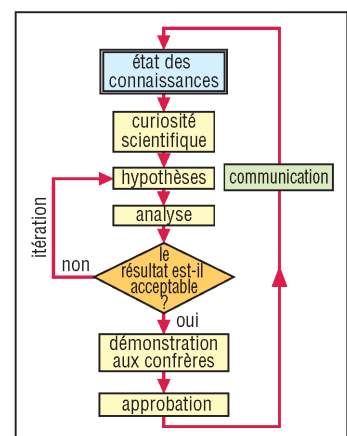
Le produit envisagé peut être entièrement nouveau ou être l'évolution d'un système existant. Dans presque tous les cas, le processus de création ou d'amélioration est le résultat d'un travail d'équipe.

Les concepteurs de produits doivent avoir des connaissances dans le domaine des sciences de bases (mécanique, électricité, électronique, statistiques, chimie, etc.) mais aussi dans le domaine des sciences de l'ingénieur et du technicien (matériaux, composants, productique, etc.). De plus, ils devront avoir la capacité à communiquer leurs idées à la fois graphiquement (dessin industriel, graphes) et oralement (exposés, conférences, etc.) et avoir des connaissances en économie, marketing et publicité. Voir aussi chapitre 45 : Écoconception page 567.

I - Démarche scientifique et démarche de projet

1. Démarche scientifique

Elle commence avec la curiosité scientifique qui résulte de l'insatisfaction concernant les domaines non explorés des sciences. Des chercheurs intéressés, une équipe, émettent un certain nombre d'hypothèses pouvant répondre au problème posé. Les hypothèses sont ensuite vérifiées et testées par analyse : calculs, expérimentations... Si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants, les hypothèses sont modifiées puis l'analyse recommencée, et ceci autant de fois qu'il le faudra jusqu'à complète satisfaction, ou abandon. Une fois au point, les résultats et la démonstration sont soumis aux confrères de la même discipline pour approbation et validation. Si l'approbation est obtenue, les découvertes réalisées sont communiquées à la communauté scientifique et viennent enrichir l'état des connaissances.



1. Démarche scientifique.

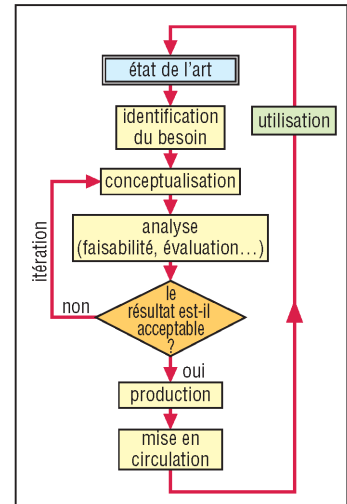
2. Démarche de projet

Elle démarre avec l'identification d'un besoin qui résulte de l'insatisfaction concernant les domaines non explorés de l'état de l'art : marché, produits existants, composants, matériaux, connaissances technologiques, procédés de fabrication...

Des concepteurs intéressés, une équipe, imaginent un certain nombre d'idées ou de concepts pouvant satisfaire le besoin identifié. La faisabilité technique et économique de ces concepts est vérifiée et évaluée par analyses (coûts, valeur, performances, fiabilité, etc.), études et essais.

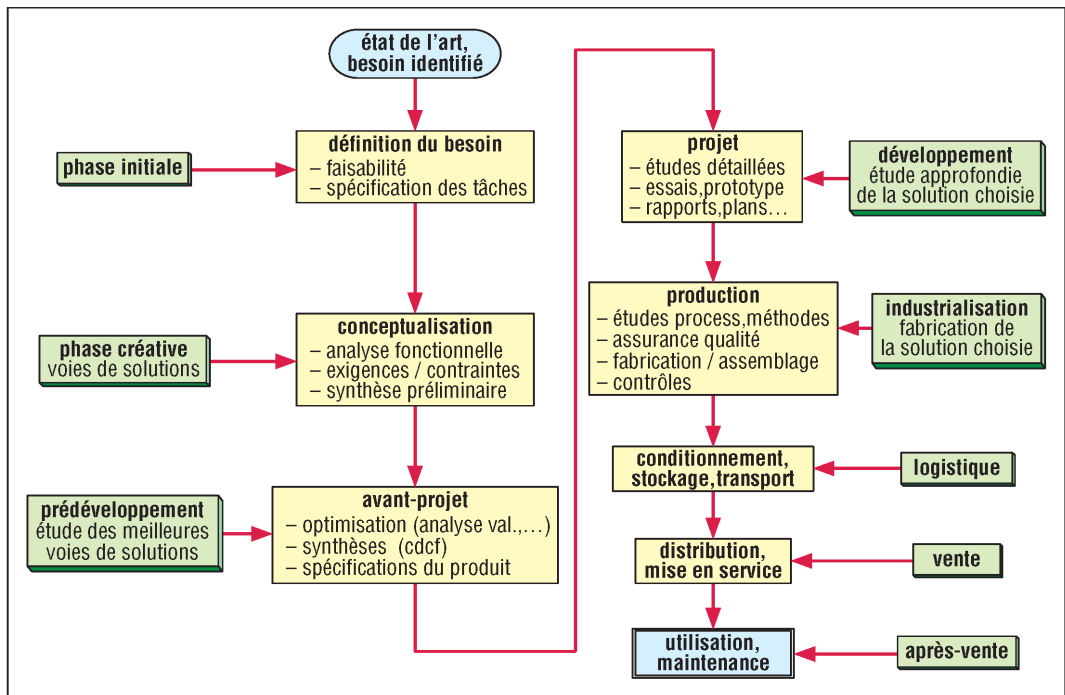
Si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants, les concepts sont modifiés puis de nouveau analysés jusqu'à satisfaction ou abandon.

Une fois au point, la solution retenue est soumise à approbation auprès de responsables du projet. Si l'approbation est obtenue, le produit est développé, fabriqué, diffusé, mis en service et vient enrichir l'état de l'art.



2. Démarche de projet.

II - Principales étapes d'un projet



3. Différentes étapes d'un projet.

Il existe de nombreuses combinaisons possibles pour créer un produit. La procédure réellement exigée est le plus souvent très complexe. De plus, de nombreux créateurs ont utilisés avec succès des voies différentes.

Les phases indiquées, sous forme de séquences, ont été retenues pour fournir aux étudiants et aux lycéens une approche simplifiée. Certaines analyses et certaines tâches peuvent être réalisées dans plusieurs séquences successives.

Les personnes expérimentées pourront choisir une voie plus en rapport avec leurs méthodes de travail.

1. Phase initiale - Définition du besoin

L'écoute du marché (marketing) permet, à partir d'études diverses et d'enquêtes, de rechercher, d'identifier et de définir des besoins existants non encore satisfaits.

Faisabilité : étude permettant de savoir si on a les moyens techniques et économiques de mener à bien le projet envisagé. Quelles sont les possibilités de création? De quelle marge de manœuvre dispose-t-on?

Spécification des tâches : elle consiste à faire l'inventaire (sous forme de cahier des charges, de planning prévisionnel, etc.) des paramètres, critères et données qui serviront à contrôler la conduite du projet et les travaux à entreprendre (Planification).

2. Conceptualisation - Phase de créativité

Dans un premier temps, le travail consiste à faire des propositions d'idées pour réaliser le produit. Toutes les solutions alternatives sont développées à partir d'analyses diverses (fonctionnelle, faisabilité, maintenabilité, etc.) et évaluées sous forme de concepts : fonctions, exigences, contraintes, critères de construction, fonctionnement, assurance qualité...

Synthèse préliminaire : elle fait le bilan des voies de solution possibles et établit les limites et les contraintes à la conception envisagée.

| Exemples de critères de construction | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| accessibilité | recyclabilité ou destruction | manutention |
| réglages, mises au point | composants achetés, matériaux | fixations |
| cablages, connexion | entretien et lubrification | environnement |
| étalonnages, calibrage | tableau de bord ou de commande | maintenabilité |
| emballage, montage | aptitude à la production | fiabilité |
| dispositifs de surveillance | normalisation et standardisation | maintenance |
| facteurs humains | sécurité et sûreté | interchangeabilité |

3. Avant-projet - Phase de prédéveloppement

Cette phase est essentielle, car 70 à 80 % des choix concernant les investissements, les coûts de la production et valeur du produit sont décidés ou programmés à ce stade.

Optimisation : chaque voie de solution est approfondie : étude des options choisies, ébauche de la définition, analyse de la valeur, analyse des coûts, des délais, des performances, de la fiabilité, des risques... Plans et modèles de fonctionnement, étapes de production...

Synthèse : elle fait un bilan et propose la (ou les) meilleure solution avec recommandations, justifications, chiffrages...

Spécifications techniques du produit : c'est le document de référence technique définissant le produit envisagé et qui sera utilisé dans les phases suivantes pour en réaliser les diverses parties.

| Exemples de critères entrant dans la spécification d'un produit | | | | |
|---|------------|-----------|-------------|---------------|
| performances | ergonomie | qualité | maintenance | procédés |
| coût de production | sécurité | fiabilité | emballage | environnement |
| durée de vie | autonomie | quantités | transport | taille |
| temps d'exploitation | service | matériaux | brevets | manutention |
| éléments standards | normes | clients | politique | poids |
| contrôles/essais | esthétique | finition | contraintes | concurrence |

4. Phase développement

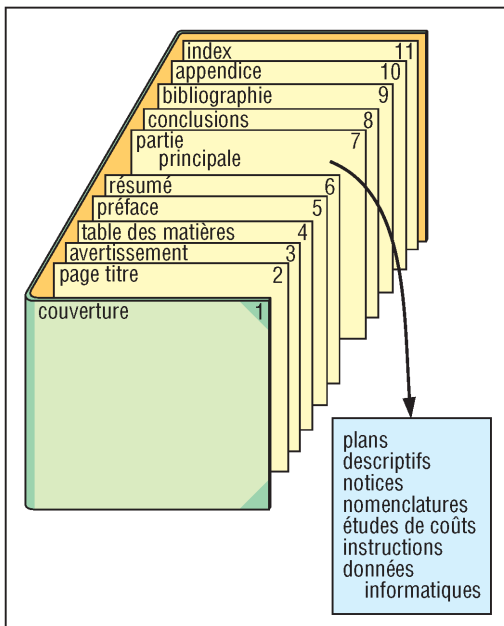
Objectif : faire l'étude détaillée de la solution définitivement retenue.

Études détaillées : la solution retenue est mise en forme concrètement et testée à partir des lois scientifiques et des techniques de l'ingénieur : calculs, études graphiques, études techniques diverses...

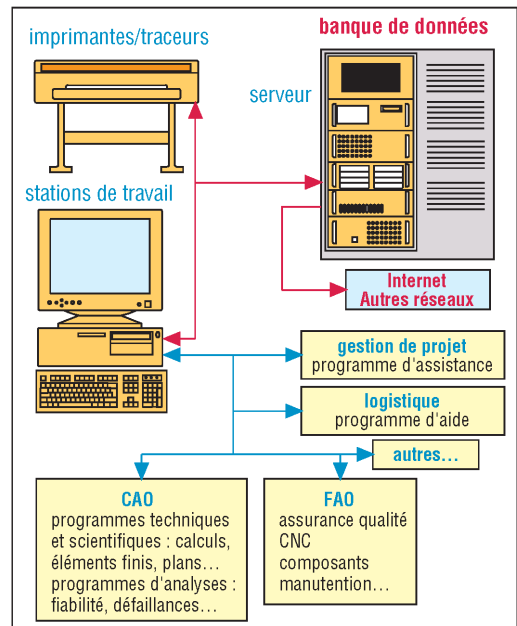
Essais expérimentaux et prototype : les tests peuvent être réalisés à partir de modèles informatiques (CAO) ou sur des modèles réels (maquette, modèle à échelle, prototype). Sont vérifiées les caractéristiques, la faisabilité, la durabilité, l'esthétique...

Plans, rapports, banques de données CAO : toutes les caractéristiques de la solution finale étant connue et parfaitement définie, cette phase consiste à produire et à rassembler tous les documents (plans, croquis, graphiques, bilans, rapports, notices, nomenclatures, analyses de coûts...) nécessaires à la description détaillée et à la définition correcte et complète du produit.

Les documents doivent être utilisables à des fins contractuelles (appels d'offre, négociations, contrats) et leur reproduction doit être aisée.



4. Exemple de compte rendu de projet (rapport).



5. Aspect informatique d'un projet.

III - Notion de produit

Un produit est prévu, conçu et fabriqué pour répondre et satisfaire aux besoins d'un utilisateur.

Le mot produit englobe tous les articles ou objets commercialisables issus d'opérations de production ou de service.

Principales familles de produits :

a) Produits matériels : composants mécaniques, électriques, électroniques, matières premières, produits alimentaires, équipements divers (automobiles, camions, engins, trains, avions, etc.), installations complexes (usines clé en main, centrale électrique, barrage, etc.)...

b) Produits liés à l'information ou à la communication : livres, magazines, journaux, documentations, cassettes vidéo, émission TV, film, logiciels...

c) Services : études, réparations, devis, transports, communication téléphonique, action de formation, prestations hospitalières, bancaires, hôtelières touristiques...

IV – Exemples de graphes utilisés pour la gestion des projets

Un même projet peut regrouper des milliers de tâches ou d'activités qu'il est nécessaire de gérer dans le temps. À cette fin, de nombreux graphes sont utilisables : courbes de coûts, organigrammes, histogrammes, Pert, diagramme de Gantt...

Il existe de nombreux logiciels (gestion de projet) d'assistance.

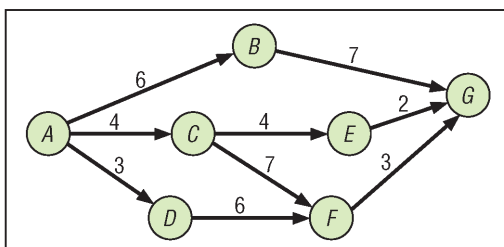
1. Pert (Program evaluation and review technique).

Ce graphe, sous forme de réseau, permet de décrire, au cours du temps, les interactions entre les différentes phases ou étapes d'un projet dont les données et le plan de développement sont connus.

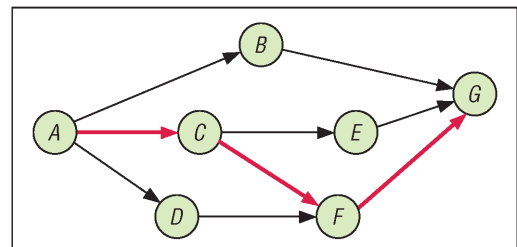
Il met en évidence le chemin critique ou itinéraire de plus longue durée pour parvenir à l'objectif fixé.

La présentation offre des variantes ; il est possible de travailler avec des durées statistiques.

Exemple 1



6. Graphe ou planning Pert.



7. Mise en évidence du chemin critique.

| événement ou tâche | tâches précédentes | durée tâche t_p (jours) | T_E (jours) | T_L (jours) | marge M (jours) |
|--------------------|--------------------|---------------------------|---------------|---------------|-------------------|
| B | A | 6 | 6 | 7 | 1 |
| C | A | 4 | 4 | 4 | 0 |
| D | A | 3 | 3 | 5 | 2 |
| E | C | 4 | 8 | 12 | 4 |
| F | D | 6 | 11 | 11 | 0 |
| | C | 7 | 11 | 11 | 0 |
| G | B | 7 | 14 | 14 | 0 |
| | E | 2 | 14 | 14 | 0 |
| | F | 3 | 14 | 14 | 0 |

Les tâches C et D doivent être terminées avant de commencer l'étape F. De même B, E et F doivent être accomplies avant G. A représente le départ et G l'arrivée ou le dernier jour. t_p indique la durée de la tâche.

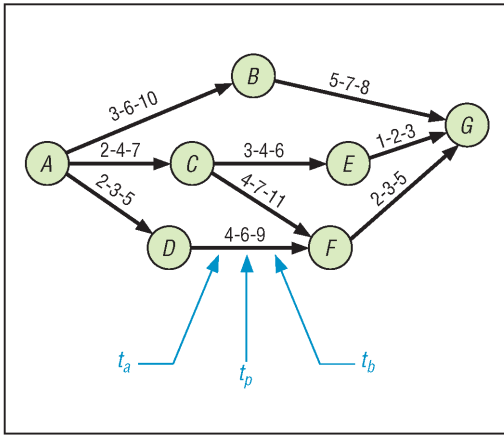
T_E indique la date au plus tôt de la fin d'une tâche qui ne peut pas être terminée avant cette date. T_L précise la date de fin de tâche au plus tard ; si la durée dépasse la valeur T_L l'ensemble du projet prend du retard et les étapes suivantes sont décalées.

La marge M ($M = T_L - T_E$) précise le délai ou la tolérance possible pour exécuter une tâche (si $M = 0$ aucun délai ne peut être toléré).

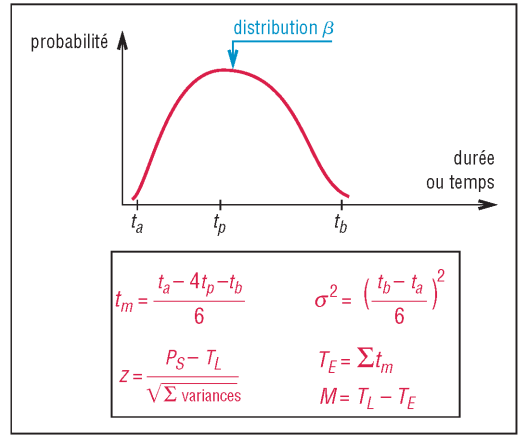
Exemple 2

Variante de l'exemple précédent avec des durées statistiques.

L'ordre des tâches reste le même. La durée de chaque tâche varie entre une valeur minimale ou optimiste (t_o) et une valeur maximale ou pessimiste (t_p). (t_p) représente la durée la plus probable. Pour chaque tâche (t_m) indique la durée prévisible ou attendue et (σ^2) la variance (voir formules fig. 9).



8. Variante avec des durées statistiques.

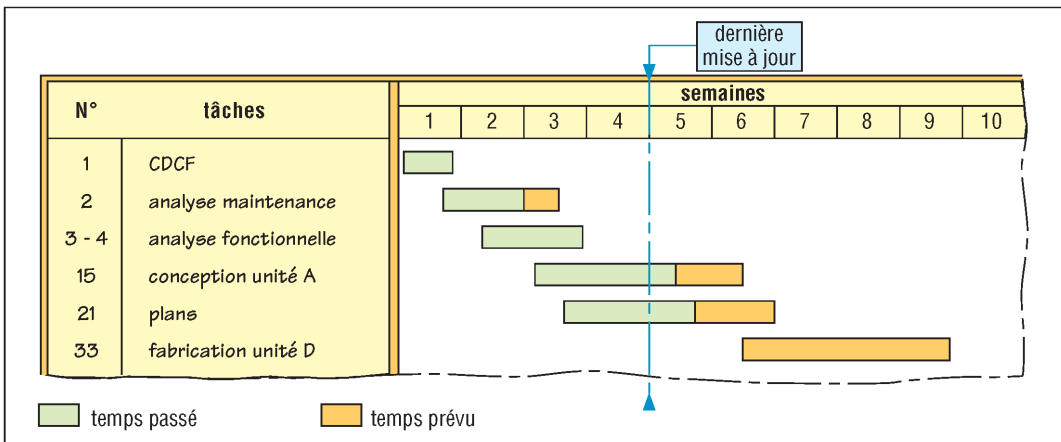


9. Distribution typique et formules usuelles.

2. Graphe ou diagramme de Gantt

Ce diagramme à barres horizontales particulier aux multiples possibilités met en évidence la durée d'une tâche, d'une intervention, d'un cycle de fabrication, la charge d'un opérateur, d'une équipe...

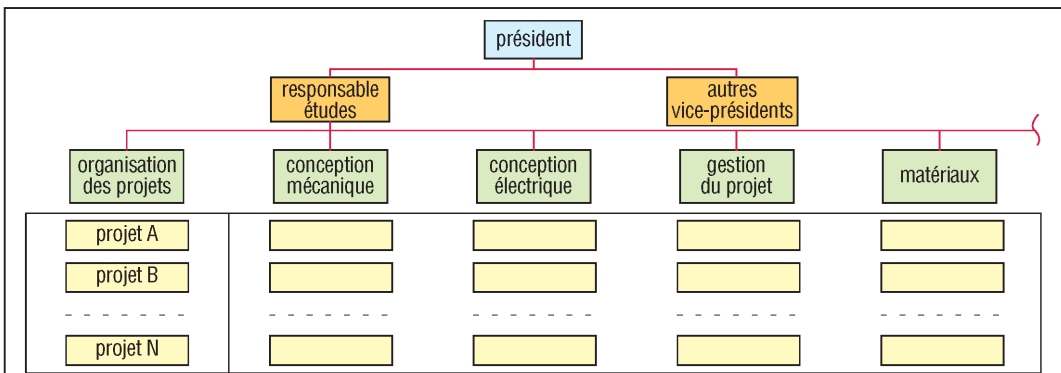
Il peut également faire apparaître, pour une même tâche, la relation entre le temps prévu et le temps réellement passé.



10. Graphe de Gantt.

3. Organigramme d'organisation

L'organigramme, de forme matricielle, permet pour un projet (noté A, B...) de connaître les départements impliqués, le nom des responsables, les intervenants...



11. Organigramme de forme matricielle.

37

MÉTHODES D'ANALYSE ET CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL

OBJECTIFS

- Définir les fonctions d'un produit.
- Donner les principes de l'analyse fonctionnelle, de l'analyse de la valeur, de l'AMDEC et du cahier des charges fonctionnel (CdCF).
- Indiquer quelques méthodes pour pratiquer l'analyse fonctionnelle.

Ces méthodes sont utilisées dans les premières phases d'un projet pour étudier, analyser et décortiquer un produit envisagé dans le but de le rendre aussi compétitif que possible et lui donner le maximum de caractéristiques. L'analyse fonctionnelle est utilisée par de nombreuses disciplines : ingénierie système, analyse de la valeur, EFB, COD, CdCF, AMDEC, QFD, etc. Voir aussi : normes : NF X 50-100 ; NF EN 1325 ; FD X 50-153 et 159, etc.

I – Fonctions d'un produit

Pour s'assurer qu'un produit puisse satisfaire les besoins d'un client il faut s'occuper en priorité des services qu'il rend. La notion de fonction met en œuvre ce principe, elle est un élément fondamental de l'analyse de la valeur et du cahier des charges fonctionnel (CdCF).

Dans ce type d'analyse, le produit est considéré comme un ensemble fonctionnel, assurant un certain nombre de fonctions, et non pas uniquement comme un assemblage de pièces ou de composants.

1. Notion de fonction

Fonction : c'est une action réalisée par un produit, ou un constituant, exprimée sous forme d'un but à atteindre.

Écriture : on utilise un verbe à l'infinitif qui dit ce que fait le produit, suivi par un complément : sur qui ou sur quoi agit le produit.

Exemple : « transporter le conducteur » est l'une des fonctions d'une automobile.

Remarque : les fonctions sont indépendantes des solutions qui les réalisent. Par exemple, à la fonction « transporter le conducteur » correspondent plusieurs solutions possibles : véhicule mono-corps, berline essence, break diesel...

2. Différents types de fonctions

Un même produit assure en général un grand nombre de fonctions de natures différentes dont certaines sont plus importantes que d'autres. Dans certaines analyses (valeur, AF, CdCF), il est nécessaire de les différencier, de les classer et de les hiérarchiser.

a) Fonctions de service

Les utilisateurs et le marché (clients...) ne sont concernés que par les fonctions de service. Ces fonctions, voulues et perçues par le client, donnent de la valeur au produit.

Fonctions de service : action demandée à un produit ou réalisée par lui, afin de satisfaire une partie du besoin d'un utilisateur donné.

Remarque : liée au service ou à l'usage d'un produit, la fonction de service décrit ou définit une action du produit qui répond à un besoin ou une attente de l'utilisateur.

Exemple : « transporter au moins 5 personnes » est une fonction de service d'une automobile ; « être utilisable en tout terrain » peut en être une autre, etc.

Les fonctions de service sont soit des fonctions d'usage soit des fonctions d'estime.

Fonction d'usage : c'est une fonction de service liée à l'aspect utilitaire du produit.

Exemple : « corriger la vue » est une fonction d'usage pour une paire de lunettes.

Fonction d'estime : c'est une fonction de service ayant un impact psychologique ou affectif sur l'utilisateur du produit (esthétique, « image », style...).

Remarque : ces fonctions font choisir un produit particulier parmi d'autres ayant les mêmes fonctions d'usage.

Exemple : « avoir une image sportive » est une fonction d'estime pour une automobile.

b) Fonctions techniques (fonctions internes)

Les fonctions techniques sont le plus souvent ignorées de l'utilisateur ou client et ne donnent pas directement de la valeur au produit. Cependant la qualité du produit et la parfaite réalisation de ses fonctions de service en dépendent.

Fonction technique : action d'un constituant ou action intervenant entre les constituants du produit afin d'assurer les fonctions de service de celui-ci.

Remarque : lorsqu'il choisit une solution globale, le concepteur détermine les fonctions techniques du produit qui peuvent aussi dépendre de la technologie disponible ou choisie. Les fonctions techniques peuvent être les fonctions de service d'un constituant du produit.

Exemple : si « filtrer l'air » est une fonction technique d'un filtre à air d'automobile, « être fixé au châssis » peut en être une autre ; ces deux fonctions peuvent aussi être considérées comme des fonctions de service de ce constituant par son fabricant.

c) Contraintes (fonctions contraintes)

Contraintes : caractéristique, effet ou disposition de conception qui est rendu obligatoire ou a été interdit pour quelque raison que ce soit. Aucune possibilité n'est laissée.

Remarques : les contraintes, en principe de nature technique, limitent les choix de solutions. Elles résultent de lois, normes, réglementations, brevets, coûts, concurrence, usages, modes, interchangeabilité, etc. En analyse fonctionnelle il est recommandé de les regrouper.

Exemple : « avoir des phares blancs » est une contrainte imposée aux automobiles.

d) Fonctions principale, complémentaire ou secondaire

Ces notions s'utilisent avec les fonctions de service, fonctions techniques et contraintes. Elles permettent de hiérarchiser ou valoriser des fonctions de même nature entre elles.

Du fait de leur subjectivité, diverses analyses fonctionnelles déconseillent leur emploi.

Fonctions principale : fonction jugée primordiale ou essentielle par rapport aux autres.

Fonctions complémentaire : fonction du produit jugée complémentaire par rapport à celles estimées principales.

Exemple : si « couper le gazon » est la fonction de service principale d'une tondeuse à razer, « ramasser le gazon coupé » peut être une fonction de service jugée complémentaire.

3. Critères d'appréciation (« critères de valeur ») des fonctions

Dans les analyses, ce sont les critères (paramètres, grandeurs, échelle de mesure, etc.) retenus ou choisis pour apprécier, évaluer ou mesurer la manière dont une fonction est réalisée.

Exemples : performances ; consommation ; niveau sonore ; niveau de confort ; taux d'équipement ; fiabilité ; durabilité, impacts environnementaux, taux de recyclabilité...

| Caractéristiques principales des critères d'appréciation des produits | | | | |
|---|--|--|---|---|
| | niveau du critère | flexibilité du critère | limites d'acceptation | taux d'échange |
| définition | dans l'échelle de mesure choisie, c'est le niveau souhaité ou attendu par la fonction testée du produit. | elle précise les variations possibles du niveau du critère d'appréciation (amplitude de l'intervalle de tolérance) | ce sont les limites de l'intervalle de tolérance définissant la flexibilité ; au-delà et en deçà de ces limites il y a non satisfaction | transfert accepté d'un critère vers un autre ou négocié sur une variation de prix |
| exemple 1 : moteur d'automobile à concevoir | consommation de 5 litres aux 100 km prévue à la vitesse stabilisée de 120 km/h | tolérer, dans les mêmes conditions, une variation de 5 % de la consommation des moteurs identiques | la consommation maximale ne doit pas dépasser 5 l mais peut varier de 5 % sous cette valeur | un écart de masse du moteur de 1 kg (en moins) peut s'échanger avec un écart de consommation de 0,5 % (en plus) |
| exemple 2 : cote 60H7 (ajustement ISO) | dimension nominale de 60,000 mm pour la cote 60H7 | la qualité 7 indique un intervalle de tolérance normalisé de 30 µm pour la dimension 60 | la lettre H (écart) positionne l'intervalle de tolérance entre 60,000 et 60,030 mm. | la qualité 6 (19 µm) est possible si elle est échangée avec une augmentation maxi du coût de 8% |

II - Analyse fonctionnelle (AF)

Le concept de fonction du paragraphe I se décline au travers d'analyses fonctionnelles qui se présentent souvent sous la forme de graphes ou diagrammes d'analyse (paragraphe III).

Démarche : décrire complètement les fonctions d'un produit et leurs relations, recenser les contraintes, qui seront toutes systématiquement caractérisées, classées et évaluées.

Objectif : recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions du produit.

Recenser : c'est rechercher, déterminer et identifier les fonctions du produit.

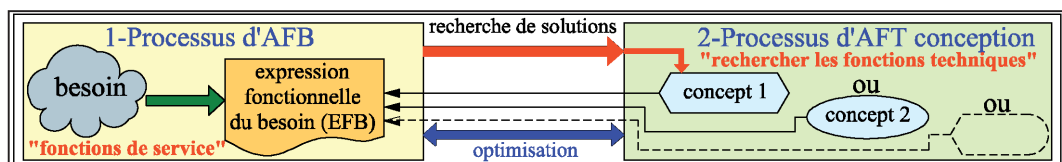
Caractériser : c'est énoncer les critères d'appréciation, niveaux et flexibilités des fonctions.

Ordonner : c'est classer les fonctions (en fonctions de service, techniques, contraintes...).

Hiérarchiser : c'est évaluer l'ordre d'importance des fonctions retenues.

Valoriser : c'est attribuer à une fonction une valeur ou un poids lié à son importance.

Plusieurs cas d'analyses fonctionnelles (AF) sont possibles : AFB ou AFE et AFT ou AFI.



1. Relation logique entre les processus d'AFB et d'AFT : dimension duale des deux analyses.

1. Analyse fonctionnelle du besoin (AFB) ou externe (AFE)

Analyse fonctionnelle du besoin : c'est la partie de l'analyse fonctionnelle qui décrit le besoin auquel devra répondre le produit sous forme de fonctions de service et de contraintes. C'est le point de vue client ou utilisateur du produit.

Remarque : le produit est défini uniquement par ce qu'il fait ; l'approche est systématique, autrement dit le produit est analysé comme un système en interaction avec tout ce qui l'environne (interacteurs) pour en définir l'usage et les services attendus. L'AFB débouche sur une expression fonctionnelle du besoin (EFB), consignée éventuellement dans un CdCF (page 441), et diverses analyses (risques, fiabilité, coût/impacts...).

2. Analyse fonctionnelle interne (AFT) ou interne (AFI)

Analyse fonctionnelle technique : c'est la partie de l'analyse fonctionnelle qui contribue à étudier et à formaliser l'architecture d'un produit en identifiant les fonctions techniques des sous-ensembles ou composants. Elle traduit le point de vue du concepteur du produit et l'aide à bâtir des solutions.

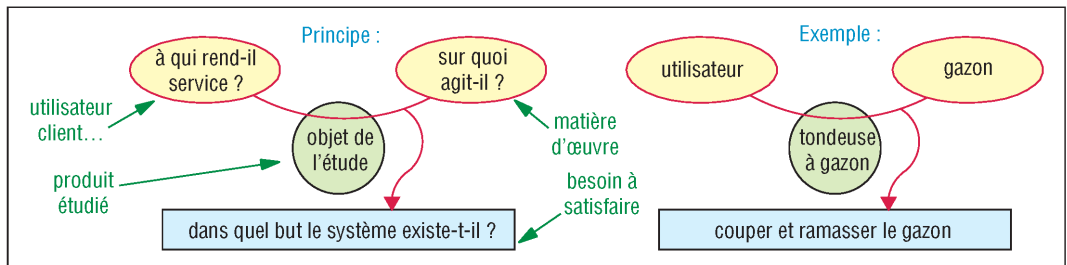
Remarque : l'AFT s'intéresse au « comment cela fonctionne » associé à un concept de solution. Elle permet au concepteur d'imaginer ou modéliser des principes de solution et définir le produit en termes de composants et d'architecture technique. Elle débouche sur une architecture fonctionnelle du produit avec diagramme (FAST...), arborescences (produit, logistique...), études diverses : sûreté de fonctionnement, gestion des risques (AMDEC)...

III - Diagrammes d'analyse fonctionnelle

Seuls quelques cas typiques sont abordés ; voir aussi organigrammes page 131.

1. Méthode APTE : « bête à cornes »

C'est le graphe le plus simple mettant en évidence les fonctions de service d'un produit.

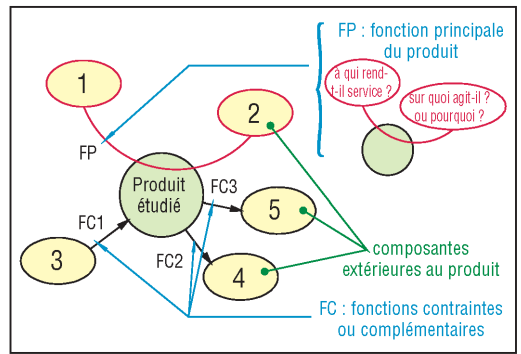


2. Méthode APTE « bête à cornes » : principe et exemple d'application.

2. APTE : diagramme des interacteurs (ou pieuvre)

La méthode permet d'analyser le besoin, identifier les fonctions de service et contraintes du produit avec les éléments de son environnement (interacteurs).

Principe : le produit étudié est en relation avec certaines composantes du milieu extérieur repérées par 1, 2, 3, 4 et 5. Il doit s'adapter à 3 et agit sur 4 et 5. Il crée ou modifie les relations entre 1 et 2.



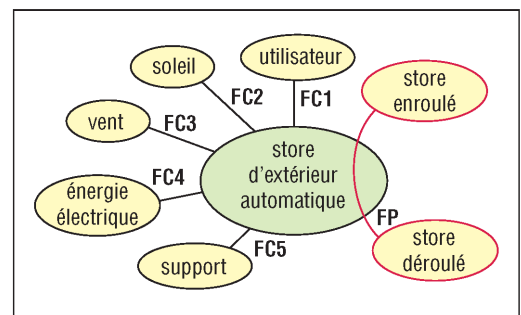
3. Principe de la méthode apte.

Exemple : principales fonctions de service d'un store automatique (décrit page 435).

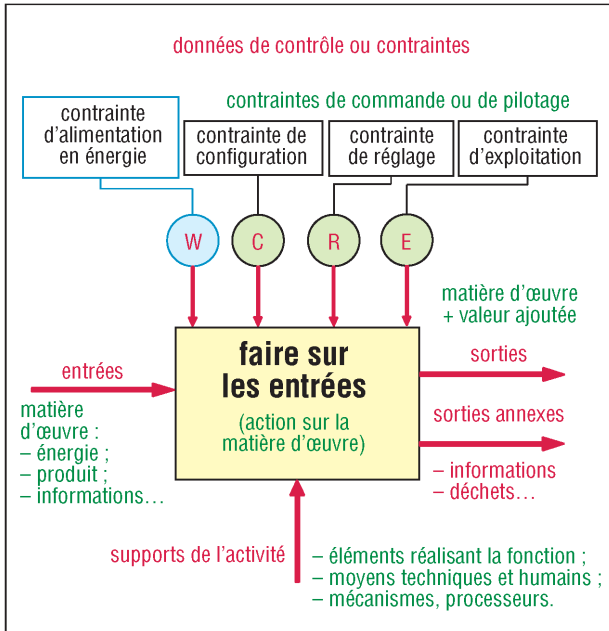
Fonction de service (ou principale) FP : manœuvrer automatiquement le store.

Fonctions contraintes (ou de service complémentaires) FC :

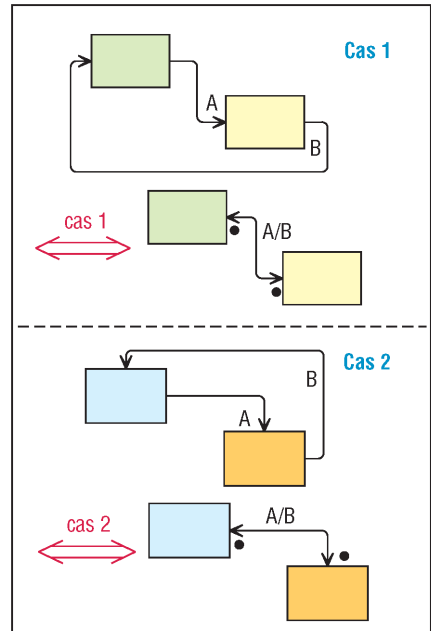
- FC1 : pouvoir être commandé manuellement par le client.
- FC2 : s'adapter à l'intensité de la lumière solaire.
- FC3 : s'adapter à l'intensité du vent.
- FC4 : utiliser l'énergie électrique.
- FC5 : être maintenu solidement par le support.



4. Exemple d'application de la méthode apte.



5. Boîte SADT : forme générale.



6. SADT : réciprocité entre boîtes (cas 1 et 2).

3. Diagramme FAST (Function Analysis System Technique)

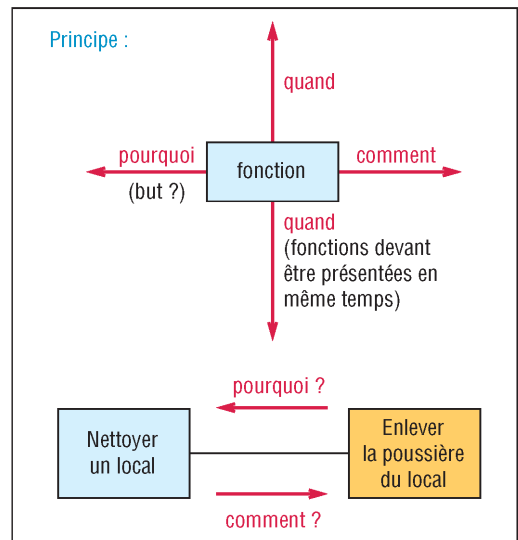
Lorsque les fonctions sont identifiées, cette méthode les ordonne et les décompose logiquement pour aboutir aux solutions techniques de réalisation.

En partant d'une fonction de service, elle présente les fonctions dans un enchaînement logique en répondant aux trois questions :
 - Pourquoi cette fonction doit-elle être assurée ? (suivant un axe horizontal orienté vers la gauche).
 - Comment cette fonction doit-elle être assurée ? (suivant le même axe horizontal, mais orienté vers la droite).
 - Quand cette fonction doit-elle être assurée ? (suivant un axe vertical orienté vers le bas).

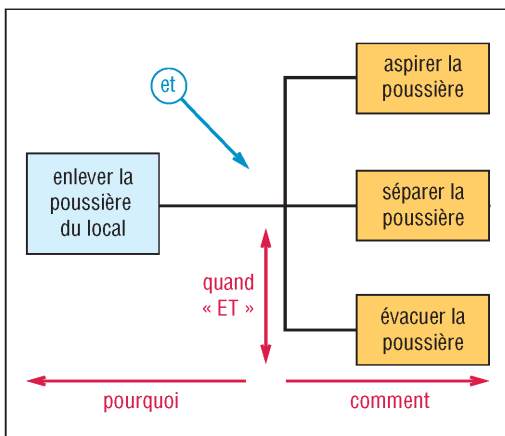
- Pourquoi cette fonction doit-elle être assurée ? (suivant un axe horizontal orienté vers la gauche).

- Comment cette fonction doit-elle être assurée ? (suivant le même axe horizontal, mais orienté vers la droite).

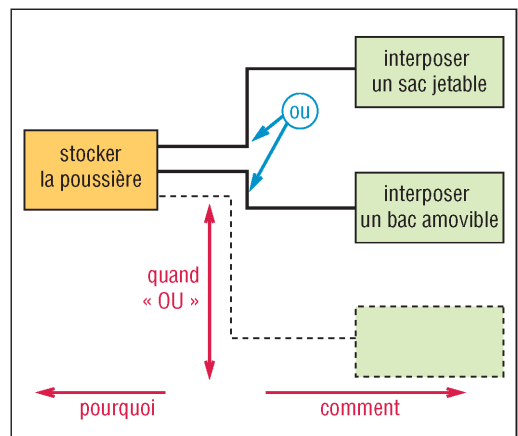
- Quand cette fonction doit-elle être assurée ? (suivant un axe vertical orienté vers le bas).



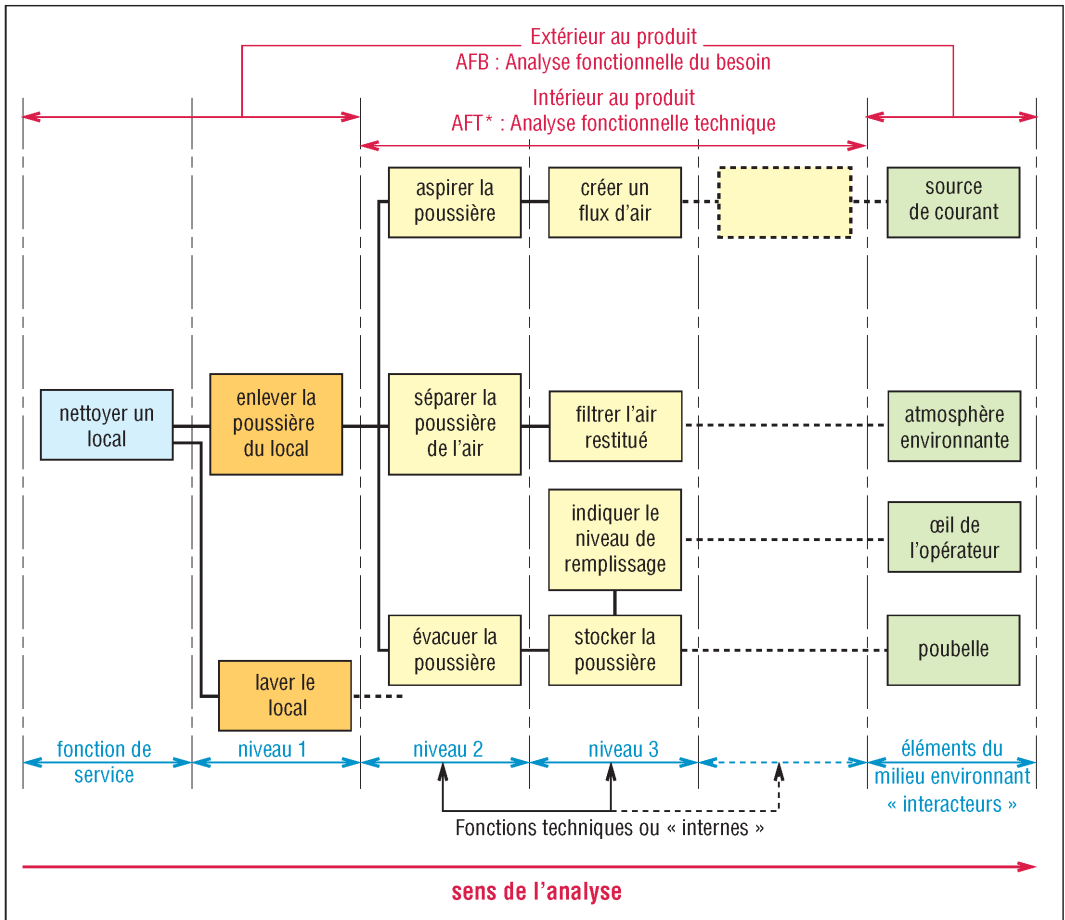
7. Principe d'élaboration du diagramme.



8. Quand « ET », fonctions devant être réalisées en même temps.



9. Quand « OU », fonctions alternatives possibles.



10. Exemple de diagramme FAST avec ses différents niveaux d'analyse (* ou AFI, AF interne).

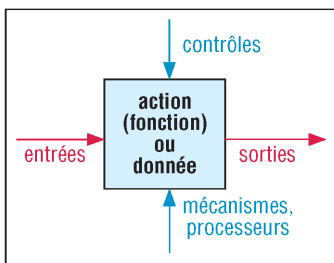
4. Méthode SADT

Elle reprend les principes précédents mais utilise des règles précises et un formalisme plus complexe. Elle est bien adaptée aux systèmes automatisés vastes ou complexes intégrant l'informatique (figures 5, 6, 11, 12, 13, 14).

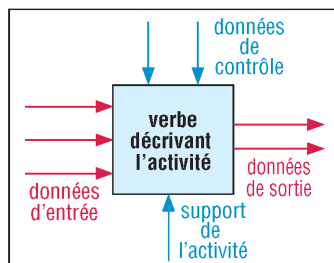
Principe : elle utilise des boîtes numérotées et des flèches codifiant les relations ou contraintes entre celles-ci.

Les côtés des boîtes ont une signification particulière :

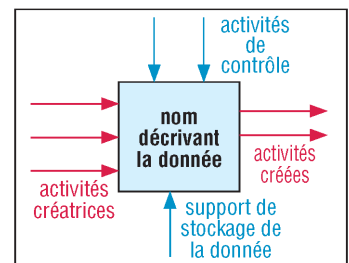
- Les données d'entrée (flèches arrivant côté gauche) sont transformées en données de sortie (flèches sortant côté droit) par la fonction indiquée dans la boîte. La sortie de chaque boîte peut devenir l'entrée ou le contrôle d'une ou plusieurs autres boîtes.
- Les contrôles (flèches arrivant côté haut) indiquent les données et les paramètres régissant la transformation réalisée par la fonction.
- Les mécanismes (flèches arrivant côté bas) précisent le support de la fonction : machine, appareil, moteur, capteurs...



11. Forme générale des boîtes.



12. Actigramme.



13. Datagramme.

Niveaux d'analyse (hiérarchie des diagrammes) : le diagramme de plus haut niveau est noté A-0 (« A moins zéro ») et représente l'ensemble du problème.

Le diagramme de niveau inférieur A0 se décompose en n boîtes (A1 à An) donnant n diagrammes de niveau inférieur de même nom. De même A1 se décompose en plusieurs boîtes et niveaux A11, A12, etc. Même remarque pour A2, A3...

Pour éviter la surabondance on utilise de 3 à 6 boîtes (au plus) par niveau, celles-ci sont toujours numérotées 1, 2, 3...

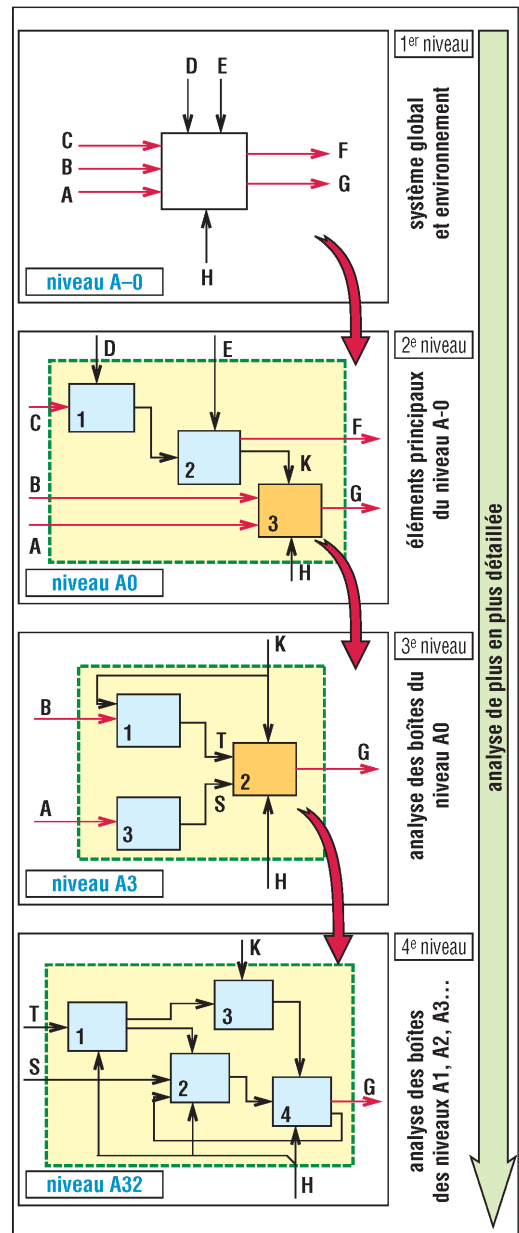
Règle : chaque diagramme de niveau inférieur doit s'inscrire très exactement dans le diagramme de niveau immédiatement supérieur tout en préservant les relations de chaque boîte avec son environnement (même nombre de flèches arrivant ou sortant des 4 côtés).

Pour l'exemple proposé, les relations notées A, B, K, G et H de la boîte 3 du diagramme A0 se retrouvent toutes sur le diagramme A3.

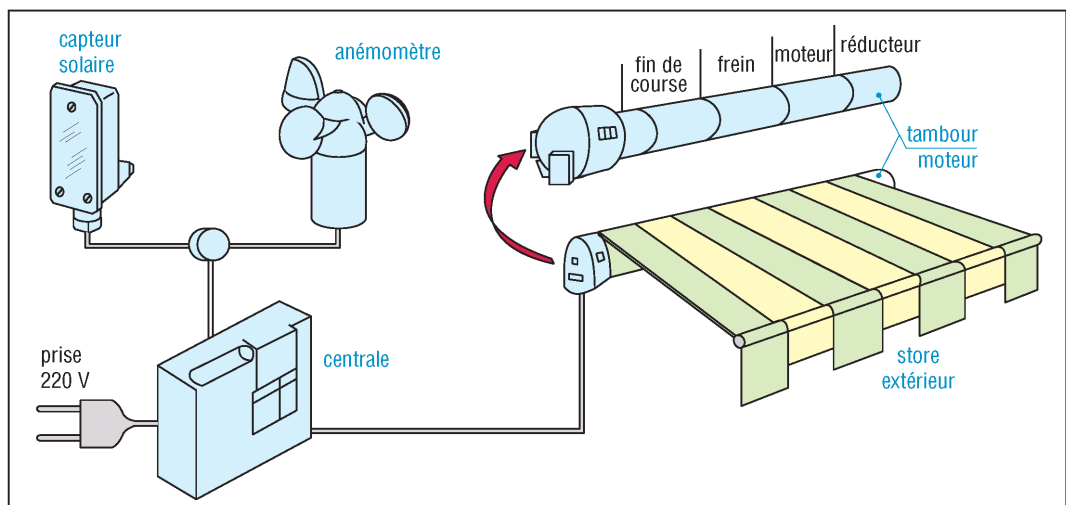
Exemple : store extérieur automatique

Si l'intensité de la lumière solaire mesurée par le capteur solaire est suffisamment forte, le store s'abaisse automatiquement ou est déroulé par le tambour moteur. Si l'intensité du vent mesurée par l'anémomètre est à un niveau trop élevé, le store est remonté ou enroulé.

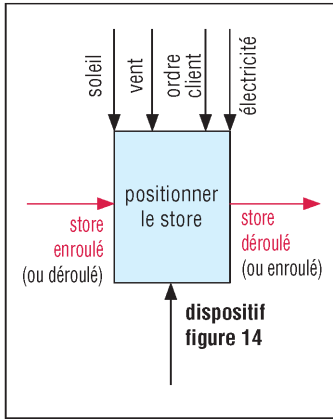
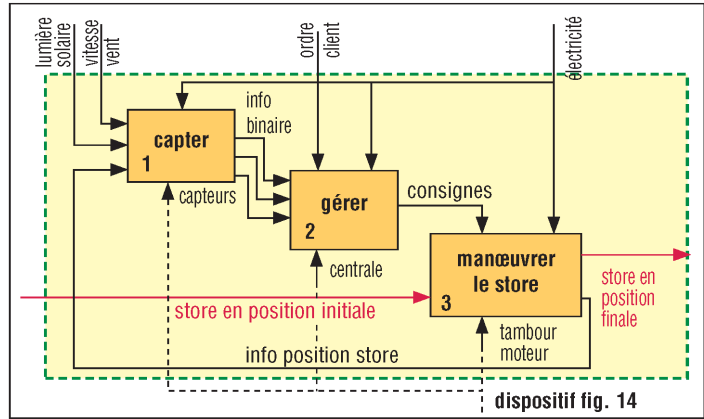
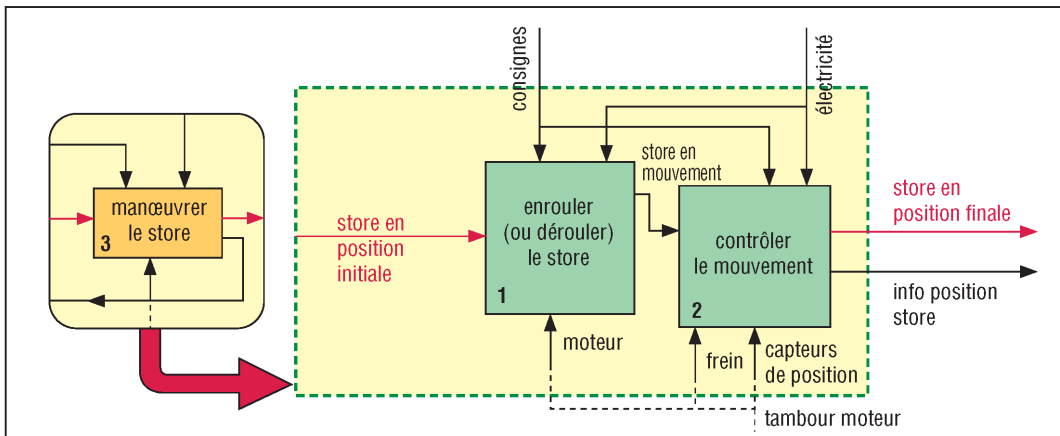
Les mesures du capteur solaire et de l'anémomètre sont transmises à la centrale qui gère les informations et commande le tambour moteur (voir fig. 15, 16, 17 et 18).



14. Méthode SADT : exemple de structure hiérarchique.



15. Store automatique.

16. 1^{er} niveau (A-O).17. 2^e niveau (AO).18. 3^e niveau, cas A3.

IV – Analyse de la valeur (AV)

L'analyse est utilisée pour créer (conception) ou améliorer (reconception) un « produit » de façon à ce qu'il soit porteur du maximum de valeur pour les parties intéressés (client, entreprise...). La démarche vise à satisfaire le juste besoin avec le minimum de ressources.

L'AV est réalisée dans la phase prédevelopment d'un projet, car 80 % des choix et arbitrages relatifs aux coûts de production, à la valeur et à la qualité sont faits à ce stade.

Voir aussi : NF X 50-152 – NF X 50-153 – FD X 50-153 – FD X 50-159 – NF EN 1325.

1. But et objectifs

Les objectifs sont : identifier et éliminer les coûts inutiles sans compromettre la qualité et la fiabilité du produit envisagé. Autrement dit concentrer l'investissement sur ce qui est utile, nécessaire et éliminer l'inutile. La volonté d'innover par rapport à une situation acquise.

La méthode permet en particulier d'améliorer la compétitivité du produit en optimisant le rapport valeur/coût. La valeur du produit doit être aussi grande que possible pour l'utilisateur et le coût pour l'entreprise aussi petit que possible.

2. Notion de valeur

Valeur : c'est le jugement porté sur le produit, par un utilisateur, sur la base de ses attentes et de ses motivations. C'est le prix que client-utilisateur est prêt à payer pour acquérir le produit, comparativement à d'autres concurrents (sorte de ratio qualité/coûts ; qualité/prix).

En AV, la valeur est une donnée relative permettant de traduire (sous forme monétaire ou autre) l'adéquation entre besoin et ressources nécessaires pour y parvenir.

Remarques : il faut construire et maîtriser la valeur du produit ; l'un des objectifs, mais aussi l'une des difficultés de l'AV est le chiffrage (coût en euro, réduction de poids, disponibilité de ressources, délais...) de la valeur d'un produit ou de l'une de ses fonctions.

3. Démarche générale d'une action analyse de la valeur

On peut résumer la démarche par les deux questions suivantes :

- Comment réaliser, avec un coût minimum, chacune des fonctions du produit envisagé ?
- Quelle valeur chaque partie caractéristique du produit apporte-t-elle à la réalisation de la fonction qu'elle doit satisfaire ?

La démarche ou la logique est à la fois :

- fonctionnelle : il faut cerner la valeur du produit à partir de ses fonctions,
- économique : référence aux coûts, avantages, impacts, ressources...
- et pluridisciplinaire : elle fait travailler en même temps tous les intervenants.

a) Démarche ou référence fonctionnelle

Le produit est considéré comme un ensemble fonctionnel, c'est-à-dire assurant un ensemble de fonctions, et non pas comme une liste de pièces ou de composants.

La capacité à identifier et classer les fonctions, à distinguer les fonctions principales des fonctions complémentaires est fondamentale en AV. La valeur est concentrée sur les fonctions principales ; parallèlement l'investissement doit aller en priorité sur ces fonctions. Une fonction complémentaire doit a priori coûter moins cher qu'une fonction principale.

b) Démarche économique

Une tâche essentielle de l'AV consiste à identifier les parties les plus coûteuses et focaliser l'attention dessus (principe de la loi de Pareto). La décision finale prise dépend en grande partie de l'évaluation des coûts, un grand soin doit donc y être apporté.

La dernière étape de l'AV consiste à déterminer la valeur finale du produit et son coût puis à comparer les deux. Un indice de valeur permet de comparer les solutions entre elles.

$$\text{Exemple: Valeur} = \frac{\text{Service rendu} + \text{Impacts positifs}}{\text{Ressources consommées} + \text{Impacts négatifs}} = \frac{\text{Satisfaction des besoins}}{\text{Consommation de ressources}}$$

c) Démarche pluridisciplinaire

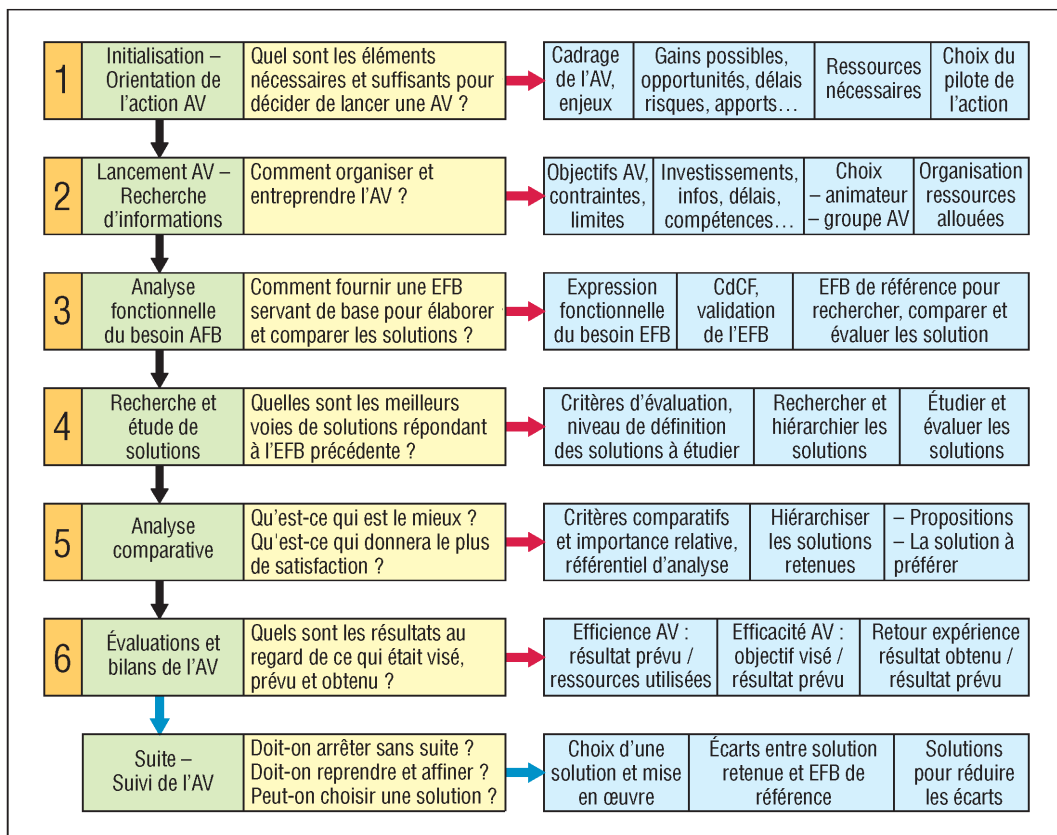
Dès la conception, l'AV fait intervenir en même temps et travailler en équipe l'ensemble des intervenants du projet : créateurs, gestionnaires, fabricants, vendeurs...

Cette démarche règle le maximum de problèmes dès la conception et limite les modifications aux phases suivantes.

4. Conduite d'une action d'analyse de la valeur

Le plan de travail se présente en six phases avec suite (ou non) et suivi (fig. 19).

- **Phase 1** : elle fixe le cadre de travail, les enjeux, et décide ou non de lancer l'AV.
- **Phase 2** : elle prépare l'AV, fixe l'objectif visé, les contraintes, les limites, les ressources allouées et choisie les intervenants (groupe et animateur).
- **Phase 3** : elle fournit une expression fonctionnelle du besoin (EFB) qui servira de référence.
- **Phases 4 et 5** : phases d'approfondissement permettant de trouver, élaborer, évaluer et comparer les solutions envisageables sur la base de l'EFB phase 3 et d'en retenir une.
- **Phase 6** : elle fait le bilan de l'AV réalisée (rapport objectif visé sur résultat prévu...).
- **Suite-suivi** : peut être la mise en œuvre d'une solution, l'abandon, ou l'affinage de l'AV.



19. Conduite ou plan de travail en 6 phases d'une action d'analyse de la valeur (AV). Voir aussi NFX 50-102.

5. Constitution du groupe chargé de l'analyse de la valeur

Le demandeur (donneur d'ordres) initie l'action (décisions, arbitrages) et choisit le pilote.

Le groupe, pluridisciplinaire, constitué d'un noyau dur (pilote, animateur et quelques experts) est à géométrie variable avec, selon les étapes, des experts complémentaires.

Le pilote, sorte de chef de projet, pilote l'action et manage les acteurs.

L'animateur s'occupe de l'aspect méthodologique de l'analyse de la valeur : démarches, choix d'outils, mises en œuvre, consensus...

Les experts réalisent les études et les analyses détaillées.

Un secrétariat prépare les réunions périodiques, diffuse les référentiels, met en forme le travail, rédige, distribue les comptes rendus, suit l'avancement des actions, etc.

6. Exemple d'application au choix d'un matériau

But de l'AV : reconcevoir un corps de moteur hydraulique en fonte GS (structure perlitique traitée thermiquement) à pistons radiaux afin d'en diminuer le prix de revient. Les principales étapes sont :

a) Orientation de l'action : objectif, réduire les coûts de fabrication du corps jugés trop élevés. Limites : le tracé et le processus d'origine doivent être globalement conservés, de légères modifications seront tolérées.

b) Collecte d'informations : l'analyse des coûts à chaque étape de la fabrication montre que l'usinage, rendu plus difficile par le traitement, représente l'essentiel du prix de revient du corps.

c) Analyse : l'analyse fonctionnelle montre que le corps a deux fonctions principales : servir de réservoir au fluide hydraulique, guider le va-et-vient des pistons. Ce guidage implique que le corps ait une résistance à l'usure suffisante et impose un traitement de surface.

Le travail est orienté vers des solutions entraînant une réduction des temps d'usinage.

d) Voies de solutions

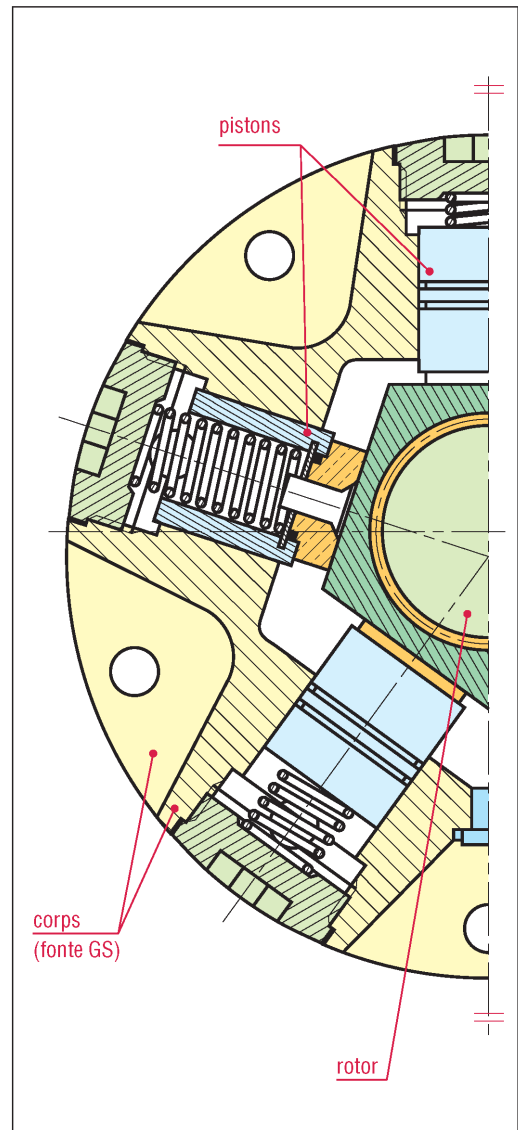
- Solution 1 : confier le guidage des pistons à une douille rapportée en acier traité chromé dur. Le corps n'ayant plus besoin d'être durci sera plus facile à usiner.
- Solution 2 : choisir une autre fonte GS avec structure ferritique ou variante plus facile à usiner (mais devant résister à l'usure).

e) Étude et évaluation des solutions : la solution 1 avec douille est rejetée, l'étude des coûts montre qu'elle revient plus cher que la solution d'origine.

Solution 2 : des essais sur pistons et alésages montrent que l'usure est significative au cours des 1 000 premiers cycles (aller-retour piston), ce qui suggère une troisième solution avec revêtement antifriction pour diminuer l'usure pendant cette période critique.

D'autres essais montrent qu'une structure uniquement ferritique ne permet pas d'obtenir un état de surface suffisamment bon.

f) Bilan et proposition d'une solution : le groupe propose de conserver la fonte GS d'origine, mais de modifier le traitement de façon à obtenir une structure à base de ferrite et de perlite sphéroïdisée permettant d'avoir à la fois une bonne usinabilité et une dureté suffisante. La réduction des coûts est chiffrée à 22 %. Inconvénient : l'état de surface est médiocre. Conditions d'application : l'usure en période de rodage devra être maîtrisée par dépôt, sur l'alésage, d'un revêtement antifriction à base de phosphate.



20. Dessin du corps du moteur hydraulique.

V - Analyses des modes de défaillance

1. AMDEC (NF EN 60812)

AMDEC : analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité.

C'est une méthode d'analyse préventive d'un système (matériel, procédé, logiciel), utilisée dans les premières étapes d'un projet pour identifier les modes de défaillance possibles, leurs causes mais aussi leurs effets sur l'aptitude du système à remplir sa fonction ou sa mission. Une AMDEC est précédée d'une décomposition hiérarchique du système en éléments de base (blocs-diagrammes...) et débute en traitant les modes de défaillance des éléments de niveau le plus bas (composant...) et leurs effets (sévérité) sur le système, niveau le plus élevé.

Les modes de défaillance sont classés par sévérité puis avec une analyse de criticité on évalue l'impact ou l'importance d'un mode de défaillance. La combinaison sévérité criticité permet de classer les défaillances (NPR) et dégager les priorités d'action (dispositifs redondants, système alternatif, surveillance, alarme...) pour en minimiser les effets.

| Exemples de modes de défaillance | | |
|--|---|--|
| 1. défaillance de fonctionnement | 2. défaillance de fonctionnement à un moment prescrit | 3. défaillance d'arrêt du fonctionnement à un moment prescrit 4. fonctionnement prématuré |
| Exemple de classification de la sévérité | | |
| Classe | Niveau de sévérité | Observations |
| IV | catastrophique | défaillance des fonctions de base du système entraînant des dommages sérieux au système et à son environnement et/ou des blessures aux personnes |
| III | critique | défaillance des fonctions de base du système entraînant des dommages sérieux au système sans constituer une menace aux personnes |
| II | marginal | défaillance dégradant les fonctions du système sans dommage notable au système et sans constituer une menace aux personnes |
| I | insignifiant | défaillance dégradant les fonctions du système sans dommage au système et sans menace pour les personnes |
| Autre exemple de classement (automobile) : 1. aucune ; 2. très mineure ; 3. mineure ; 4. très basse ; 5. basse ; 6. modérée ; 7. élevée ; 8. très haute ; 9. dangereuse avec avertissement ; 10. dangereuse sans avertissement. | | |
| Exemple de critère d'évaluation de la détection du mode de défaillance (D) | | |
| 1. quasi certain ; 2. très haut ; 3. élevé ; 4. modérément élevé ; 5. modéré ; 6. basse ; 7. très bas ; 8. éloigné ; 9. très éloigné ; 10. incertitude absolue. | | |

NPR (Nombre Prioritaire de Risque) : nombre qui permet de classer les défaillances.

$$NPR = S \cdot O \cdot D \quad (\text{ou RPN})$$

S : nombre estimant la sévérité ;

O : fréquence d'apparition d'un mode de défaillance pendant un temps donné ;

D : détection ou chance de détecter la défaillance avant toute dégradation.

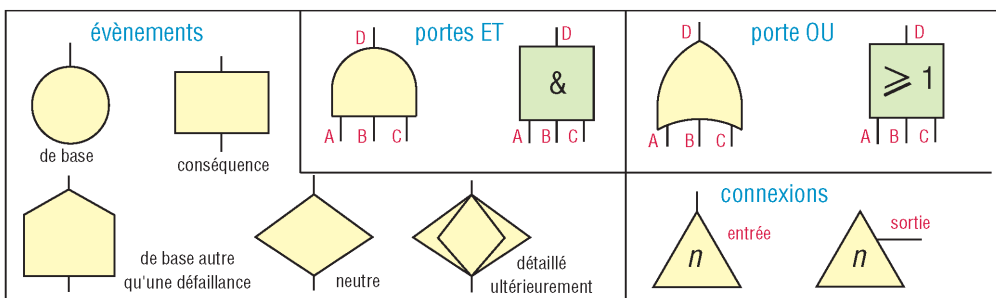
Des échelles allant de 1 à 4 ou 5 (ou 10 automobiles) sont assignées aux valeurs de *S*, *O* ou *D*.

| Exemple de présentation d'une analyse AMDEC | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|-----------|-------------------------------|-------------------------|----------------|----------|----------------|---------------------|-----------------|------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----|--------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-----|
| Système | | | Mode de défaillance potentiel | Effet de la défaillance | | SÉVÉRITÉ | CLASSIFICATION | Cause potentielle | Cause détaillée | APPARITION | Contrôle de prévention en conception | Contrôle de détection en conception | Détection | NPR | Action recommandée | Responsabilité et date... | Résultats de l'action | | | | |
| Sous-système | Assemblage | Composant | | Effet local | Effet final | | | | | | | | | | | | Actions prises | Sévérité <i>S</i> | Apparition <i>O</i> | Détection <i>D</i> | NPR |
| | | batterie | Court-circuit | + batterie à la masse | Batterie vidée | 10 | | Défaut du composant | Matériau claqué | 3 | Choix d'une qualité | Essai de validation | 1 | 30 | | | | | | | |

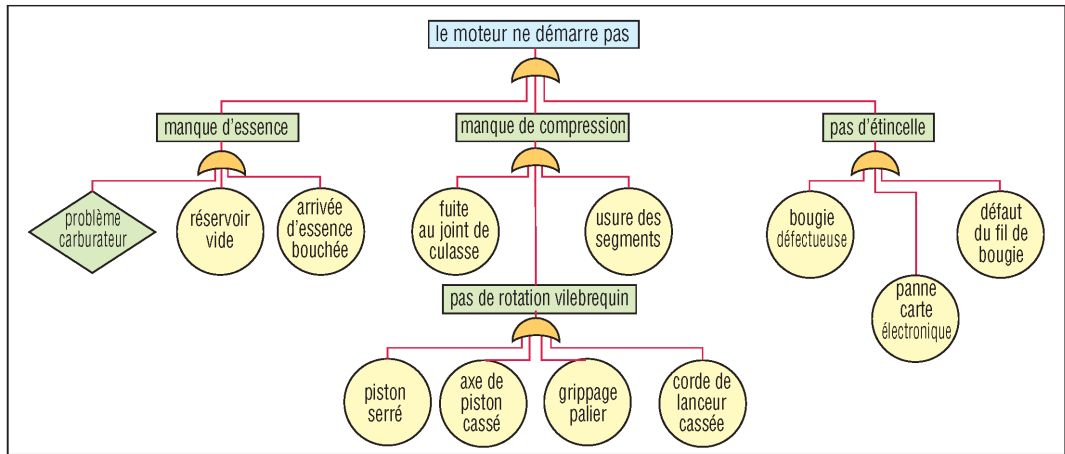
2. Arbre de défaillances

Souvent utilisé en conjonction avec une AMDEC, c'est une sorte d'organigramme permettant de savoir comment un dispositif peut être indisponible ou défaillant.

Il existe plusieurs variantes de représentation.



21. Exemples de symboles pour arbres de défaillance.



22. Exemple d'arbre de défaillance d'un moteur de tondeuse à gazon.

- Événement de base (indépendant de tout autre événement) : c'est le résultat d'une défaillance possible. Il est toujours situé à l'entrée d'une porte logique ET ou OU.
- Événement induit ou conséquence : il est la conséquence de plusieurs événements de base et est toujours situé à la sortie d'une porte logique.
- Événement neutre : événement sans conséquence sur la fiabilité du système.
- Connexion : permet de se connecter à un autre arbre de défaillance.
- Porte ET : l'événement D se produit si A, B et C se produisent en même temps.
- Porte OU : l'événement D se produit si au moins un seul des événements A, B ou C se produit.

VI – Cahier des charges fonctionnel (CdCF)

L'AFB permet d'établir l'EFB qui produit le CdCF qui engendre des STB (spécification technique du besoin) ; une STB par solution possible.

CdCF (définition) : document par lequel un demandeur exprime ses besoins (ou ceux qu'il a la charge d'exprimer) en termes de fonctions de service et de contraintes. Pour chacune d'elles, sont définis des critères d'appréciation ainsi que leurs niveaux, chacun d'entre eux étant assorti d'un certain degré de flexibilité. Voir aussi NF X 50-151.

1. Rôle du CdCF

Le CdCF, avec sa présentation structurée et détaillée du besoin, construit à partir de l'EFB, sert de base pour engager un dialogue ou une négociation entre un donneur d'ordres et des fournisseurs appelés à apporter une réponse à un besoin identifié et spécifié ; quatre intérêts :

- **Introduire et faciliter un dialogue compétitif** entre le donneur d'ordre et des fournisseurs développeurs internes ou externes ; cas de consultations, appels d'offre, adjudications...
- **Permettre au fournisseur (ou concepteur/réalisateur) de déployer des capacités d'innovation** au service du problème posé (laisser une large initiative à la recherche de solutions originales et performantes en termes de qualité, prix, délais, risques).
- **Faciliter si nécessaire les comparaisons** entre les solutions concurrentes.
- **Autoriser à terme une vérification** de la fourniture puisque les résultats effectifs de chaque exigence peuvent être mesurées (ou évaluées) par référence aux attentes exprimées.

2. Contenu d'un CdCF

- **Présentation générale et contexte d'emploi du CdCF** : situation du projet, limites de l'étude, études déjà faites, suites prévues, parties concernées, degré d'innovation, confidentialité...
- **Produit (objet du CdCF)** : domaine d'emploi, définition globale du besoin, concept général du produit, services attendus, débouchés, espérance de vie ; liste des fonctions (critères

d'appréciation, niveaux, flexibilités...) et inventaire des contraintes ; parties intéressées, cycle de vie ; interacteurs (éléments environnant le produit au cours de son cycle de vie : personnes, éléments matériels ou immatériels...) ; principes et concepts déjà retenus.

– **Cadre de réponse** (pour les offreurs) : codifie les réponses, facilite le dépouillement et l'évaluation des propositions ainsi que leur comparaison.

– **Autres rubriques** : appel à variantes, éléments d'EFB complémentaires, données économiques, glossaire précisant la terminologie utilisée.

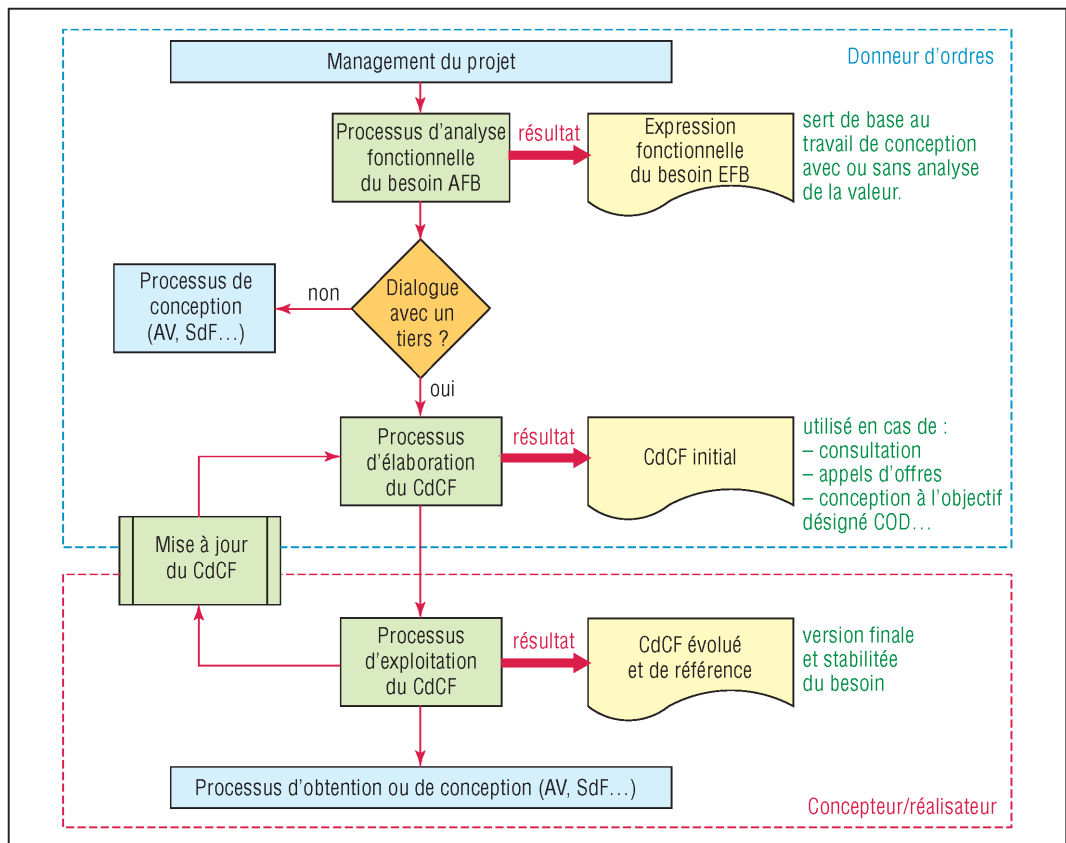
3. Organisation nécessaire à l'élaboration du CdCF

Demandeur : personne ou société responsable du financement élaborant le CdCF.

Décideur : en général le responsable du projet, celui qui suit le développement du produit.

Animateur : le responsable de l'élaboration du CdCF.

Concepteur/réalisateur : celui qui s'occupe de la conception et la fabrication du produit.



23. Processus d'élaboration du CdCF.

Exemple : extrait de « CdCF d'un moteur d'avion »

Fonction : « fournir une poussée à l'aéronef ».

Critères :

– niveau de poussée : 30 000 daN, limite d'acceptation : 28 000 daN ;

– niveau de consommation du carburant : 0,5 kg de carburant par heure et par unité de poussée à Mach 0,8 et altitude de 9 000 m ;

– masse nominale : 5 200 kg, limite d'acceptation : 5 500 kg.

Taux d'échange : un écart de masse de 1 kg s'échange avec un écart de consommation de carburant de 0,01 %. Cela veut dire que le client est prêt à accepter de manière équivalente un moteur dont la masse et la consommation de carburant seront de :

| | | | |
|--------------|----------|----------|----------|
| masse moteur | 5 190 kg | 5 200 kg | 5 210 kg |
| consommation | 0,500 5 | 0,5 | 0,499 5 |

38

NOTIONS SUR LA QUALITÉ

OBJECTIFS

- Définir les notions de qualité, de qualité totale, de gestion de la qualité et d'assurance qualité, plan d'amélioration de la qualité.
- Indiquer les conditions pour réussir la qualité ainsi que les principales méthodes et outils pour la maîtriser.

Le concept de qualité remonte à l'antiquité. Les Égyptiens (mesure des surfaces, des volumes, aire du cercle, nombre pi, division du temps, calendrier, système décimal, pyramides), les Grecs (qualité et standards en matière d'art, d'architecture, de littérature), les Romains (maçonnerie, béton, construction des villes, des routes, des ponts) ont tous réalisé des inventions, des découvertes et des monuments de haute qualité.

Le Moyen Âge permet d'établir des standards de qualité en matière de travail (guildes, etc.), de régulation économique, de conditions de travail, de gammes de fabrication. Il vit la création des monopoles commerciaux, assura une stabilité des prix...

Avec l'industrialisation et dans le courant du XX^e siècle, la qualité prend une autre dimension et devient scientifique. Le contrôle à partir de méthodes statistiques se développe vers 1935 aux USA. Les cartes de contrôle et les procédures normalisées suivent, le concept d'assurance qualité apparaît dans les années 50. La notion de qualité totale, de zéro défaut et les cercles de qualité font leur apparition dans les années 60 au Japon. La gestion de la qualité arrive dans les années 70. Au cours des années 80 la qualité se généralise en Europe, aujourd'hui elle est un concept mondial avec une normalisation internationale (ISO 9000...).

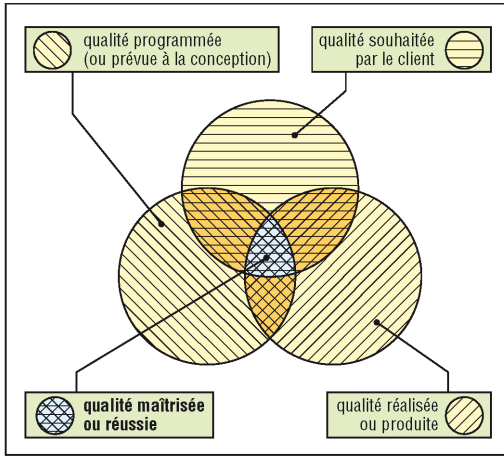
I - Définitions

Qualité : aptitude d'un produit ou d'un service à satisfaire complètement les besoins et les attentes des utilisateurs, clients et autres parties intéressées pertinentes.

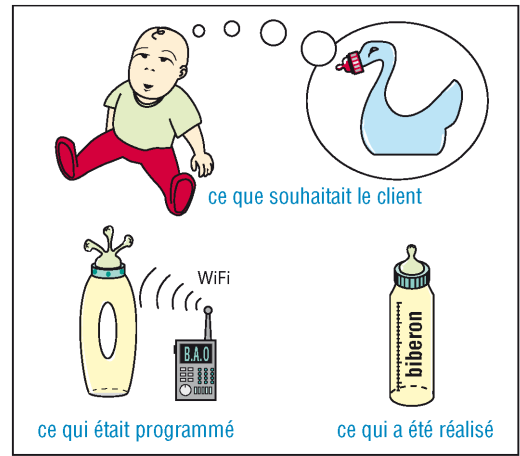
Remarque : la satisfaction des clients est l'objectif même de la qualité. Elle doit être évaluée régulièrement : enquêtes de satisfaction, étude de la concurrence, traitement des réclamations, analyse des retours... La qualité inclut la fonction, les performances prévues, la valeur et le bénéfice perçus.

Qualité maîtrisée :

À la qualité souhaitée par l'utilisateur, l'entreprise fait correspondre une qualité programmée ou prévue, puis obtient une qualité réalisée (celle du produit sortant). L'idéal est obtenu lorsque ces trois qualités sont confondues : c'est la qualité maîtrisée ou réussie.



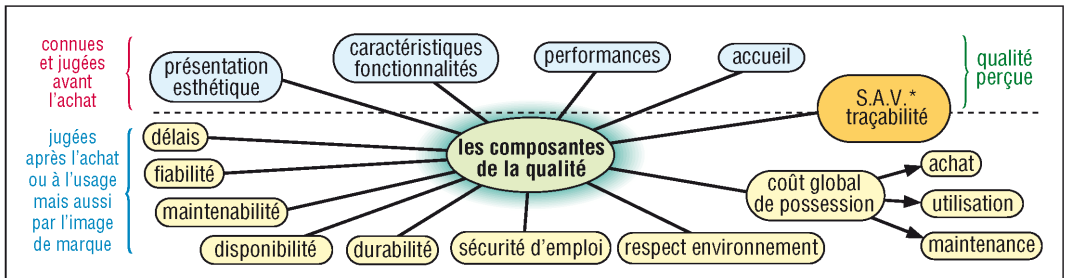
1. Qualité programmée, souhaitée, réalisée et maîtrisée.



2. Exemples de problèmes de conformité.

Conformité : la qualité d'un produit ou d'un service dépend en grande partie de sa conformité avec les besoins et les désirs du client.

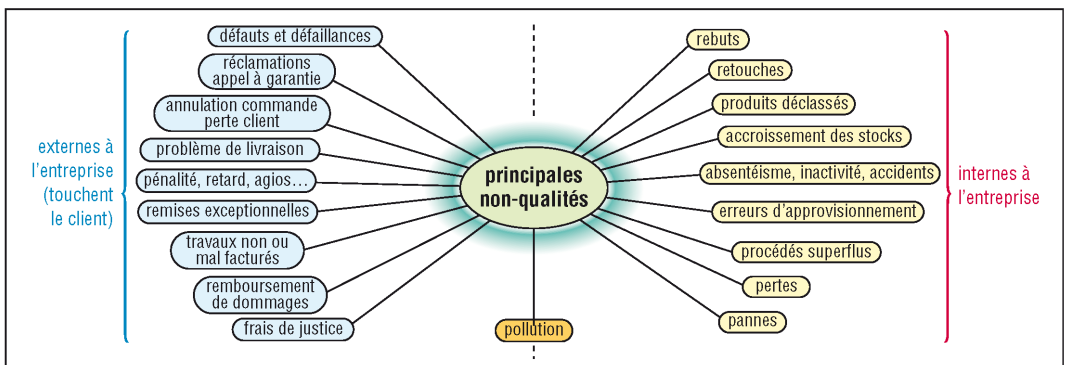
II - Principales composantes de la qualité



3. Principales composantes de la qualité. * service après-vente

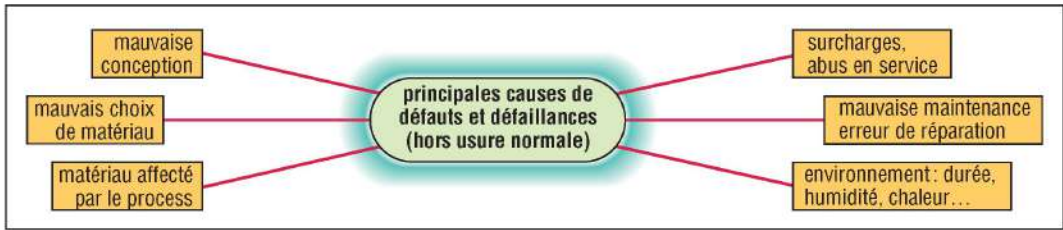
La qualité du produit dépend de nombreuses composantes. Si l'une ne donne pas satisfaction, il y a automatiquement non-qualité avec toutes les conséquences qui peuvent en résulter : réclamations, annulation de commande, image de marque altérée, perte de clientèle, procès...

III - Principales causes de non-qualité



4. Principales non-qualités.

Certaines sont internes à l'entreprise et ne concernent pas directement le client, sauf par le prix de revient du produit qui peut augmenter. D'autres touchent directement le client et ont des conséquences commerciales immédiates : annulation de commande...

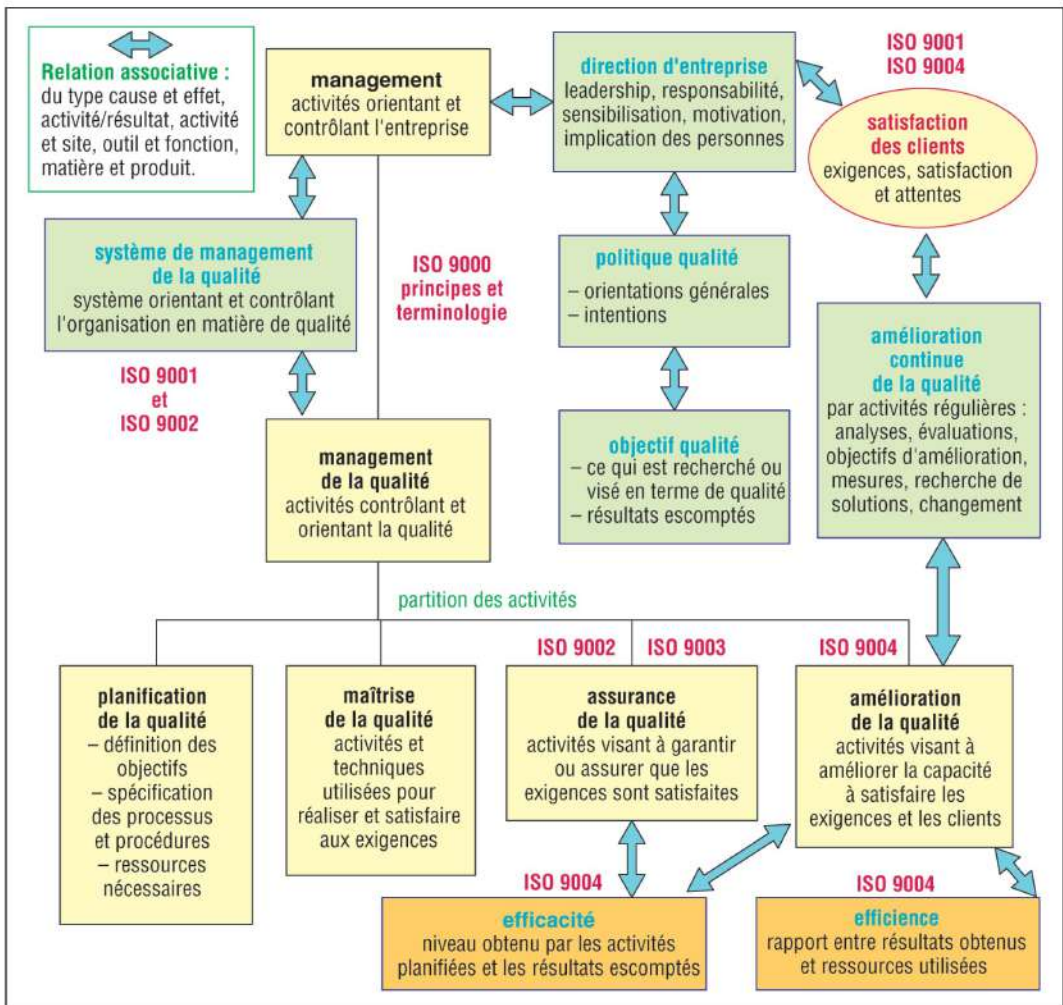


5. Principales causes de défaillance.

IV - Management de la qualité

La qualité totale est réalisée si la satisfaction du client est obtenue à tous les niveaux, de l'amont (marketing clientèle) à l'aval (suivi de produit et service après-vente). C'est l'objectif à atteindre. Elle suppose une recherche continue d'amélioration de la qualité.

L'organisation mise en place pour obtenir la qualité totale est souvent appelée système qualité. Dans le concept de qualité totale tous les secteurs de l'entreprise sont concernés : marketing, comptabilité, conception, production, achats, encadrement ou management...

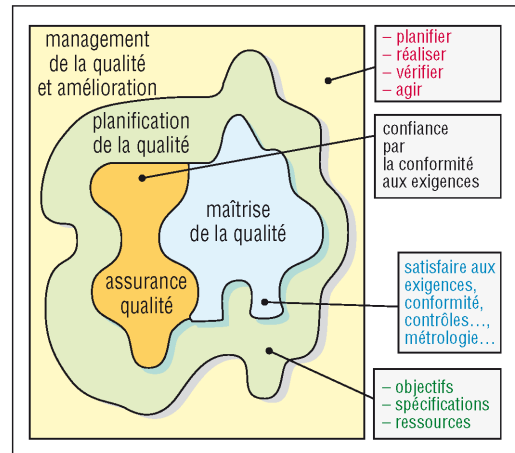


6. Concepts relatifs au management de la qualité (la satisfaction des clients est au cœur du système).

1. Management de la qualité

Il fait partie de la gestion générale de l'entreprise. Sa responsabilité appartient à la direction générale de l'entreprise. Son rôle est de concevoir, de mettre en place et de gérer une politique visant la qualité. À cette fin, il faut prévoir une organisation stratégique (système qualité), allouer des ressources et fixer des objectifs (fig. 6).

Remarque : la qualité est d'abord un choix, un état d'esprit, une philosophie voulue par la direction de l'entreprise puis étendue à tous les autres niveaux.



7. Imbrications des différents secteurs s'occupant de la qualité.

Amélioration continue de la qualité :

même obtenue, la qualité n'est pas figée ; des besoins nouveaux apparaissent, la concurrence progresse et les individus évoluent sans cesse. Gérer la qualité, c'est aussi repérer les insatisfactions, les besoins nouveaux, les possibilités d'évolution afin d'engager les actions d'amélioration nécessaires pour progresser.

2. Aspect historique : les 14 préceptes d'une politique visant la qualité totale, d'après W.E. Deming

W.E. Deming, économiste et scientifique américain, introduisit la notion de qualité au Japon dans les années 1950, aujourd'hui il y fait figure de prophète.

Il existe au Japon un prix Deming récompensant le produit de l'année ayant obtenu la meilleure qualité. W.E. Deming propose les 14 préceptes de management suivants :

- 1 – Toujours chercher à améliorer le produit ou le service et investir dans le futur. Être toujours compétitif.
- 2 – Adopter la philosophie de son temps : pas de défauts, pas de délais, pas d'erreurs, un personnel compétent et accueillant...
- 3 – Ne plus dépendre du contrôle de masse et préférer le contrôle ou la maîtrise du processus.
- 4 – Améliorer la qualité des matériaux, des composants et des équipements achetés.
- 5 – Rechercher continuellement les défauts (gaspillages...) et les insuffisances du système mis en place (conception, achats, qualification...) et toujours chercher à l'améliorer.
- 6 – Introduire et utiliser des méthodes modernes de travail, améliorer les qualifications.
- 7 – Introduire et utiliser des méthodes modernes de supervision ou d'encadrement.
- 8 – Éliminer la crainte et la peur : peur du changement, crainte des connaissances à acquérir, peur de s'informer, de justifier de mauvais résultats...
- 9 – Abattre les barrières et les cloisons entre les départements de l'entreprise.
- 10 – Éliminer l'usage des objectifs chiffrés, se débarrasser des slogans : des procédures, des investissements et de meilleurs outils sont plus efficaces que les affiches prônant le zéro défaut.
- 11 – Éliminer les standards de travail prescrivant des quotas numériques.
- 12 – Susciter et créer une satisfaction ou une fierté dans le travail.
- 13 – Réaliser des programmes d'éducation et de qualification.
- 14 – Créer une organisation appropriée à une politique visant la qualité.

3. Normalisation internationale ISO

L'ISO 9000 donne les principes et le vocabulaire concernant la qualité (notions de base). L'ISO 9001 indique et liste les exigences à satisfaire (définies et développées par l'ISO 9002 et l'ISO 9003) pour assurer la qualité du produit et la satisfaction des clients. L'ISO 9004 donne les lignes directrices pour améliorer les performances et la satisfaction des clients.

V – Système de management de la qualité SMQ

Démarche d'une entreprise dont le but est donner confiance dans la capacité de ses processus et la qualité de ses produits, tout en se dotant d'une base pour l'amélioration continue.

Principales étapes (cycle PRVA) : Planifier (actions à mettre en œuvre, objectifs, ressources...), Réaliser (activités opérationnelles...), Vérifier (surveiller et évaluer les performances : la satisfaction des clients...) et Agir (opportunités d'amélioration, entreprendre des actions, non conformité et action corrective...).

VI – Assurance de la qualité

L'assurance qualité est centrée sur le contrôle et les procédures à utiliser pour garantir la qualité. Son but, donner confiance en l'obtention de la conformité du produit aux exigences de la qualité, démontrer que l'on respecte les procédures, vérifier que le système est au point et l'effet positif des actions correctives.

L'entreprise doit s'organiser de façon à sortir des produits bons et sans défauts du premier coup et ne pas attendre les réactions et retours des clients mécontents. La qualité doit être obtenue de façon systématique et continue dans le temps.

Remarque : les normes ISO 9002 et ISO 9003 sont des modèles, sortes d'aide-mémoire, définissant les différents points à traiter et exigences (lister par l'ISO 9001) pour réaliser l'assurance qualité : responsabilités de la direction, maîtrise des achats, des procédés, du produit non conforme, du conditionnement, du stockage, de la livraison...

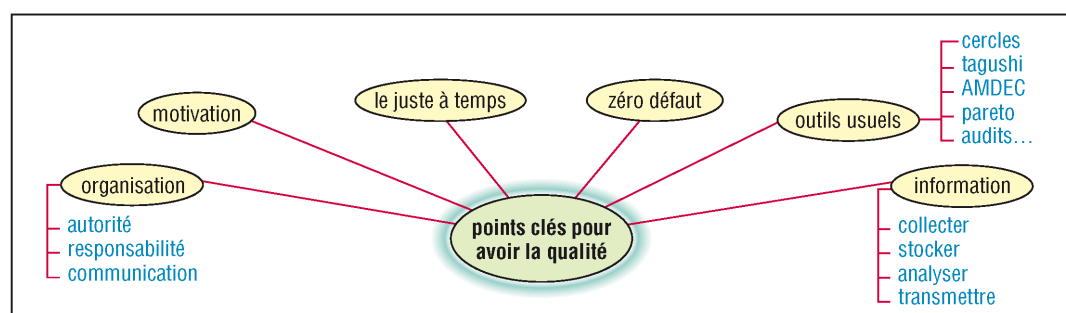
Les normes ISO 10001 à 10019 sont d'autres normes utilisées pour gérer la qualité.

VII – Maîtrise de la qualité

Étroitement liée à la notion d'assurance qualité, la maîtrise de la qualité regroupe l'ensemble des techniques et activités opérationnelles utilisées pour satisfaire aux exigences de la qualité (cahiers des charges, conformité du produit, contrôle opérationnel, pilotage des processus...). Elle veille à la conformité du produit sortant et vise à éliminer les non conformités.

VIII – Conditions pour réussir la qualité

La motivation de l'ensemble des intervenants, du P-DG à l'opérateur en bout de chaîne, un bon réseau de communication des informations (décisions prises...), une bonne organisation pour la mise en œuvre, une politique de zéro défaut, le juste à temps et des cercles de qualité sont les éléments fondamentaux pour réussir la qualité.



8. Les points indispensables pour réussir une politique de qualité.

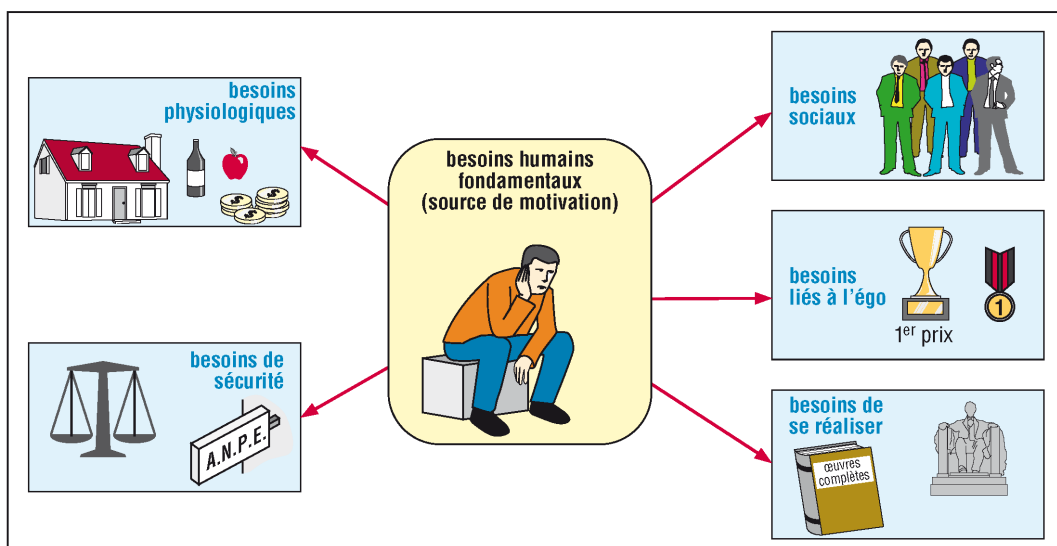
1. Motivation et organisation

Organisation : le système qualité mis en place a l'autorité, la responsabilité et doit assurer la communication dans toutes les directions de l'entreprise (horizontalement et verticalement) afin de faciliter l'accomplissement du travail et des objectifs.

Motivation : moteur de la qualité, elle influence le comportement des intervenants. Il faut tout faire pour la susciter, l'obtenir et la maintenir. Intérieure et personnelle, elle varie d'un individu à l'autre, dépend de ses besoins ou désirs et peut être influencée (gain, prime...).

Les besoins humains fondamentaux, sources de motivation

- Besoins physiologiques : nourriture, abri, salaires, primes suite à un travail bien fait, voyages...
- Besoin de sécurité : sauvegarder son emploi, habiter dans un quartier « calme »...
- Besoins sociaux : envie d'appartenir à un groupe et d'y rester (proposer à un individu de faire partie d'une équipe, une fois intégré il se produit un effet de corps...).
- Besoins liés à l'égo : besoin d'être respecté ou estimé (reconnaissance au travers de prix, de récompenses honorifiques). Valorisation par une formation complémentaire ...
- Besoin de se réaliser ou de s'accomplir : besoin de créer, d'inventer, de réaliser une œuvre qui reste, participer à la mise en place d'un grand projet...



9. Besoins humains fondamentaux, sources de motivation.

2. Juste à temps (JIT) - Méthode Tagushi

Le « Juste à temps », ou « flux tendu », diminue le prix global de la qualité en assurant une meilleure gestion des stocks à tous les niveaux de l'entreprise : achats, fabrication (Kanban...), produits finis sortants, etc. Il s'applique à toutes les formes de production.

Principe : en JIT, il ne doit pas y avoir de stocks, en permanence l'exacte quantité de biens ou d'articles nécessaires doit arriver et être livrée à l'endroit souhaité, au moment voulu, pour y être aussitôt utilisée.

Méthode Tagushi : la méthode repose sur trois concepts : le concept de « robustesse » ou de « qualité robuste » ; la notion de fonction « perte de qualité » (QLF : quality loss function) ; la recherche continue de la meilleure qualité possible.

Principe de la qualité robuste : il consiste à fabriquer de manière uniforme et en nombre suffisant, des produits ayant la qualité exigée, quelles que soient les conditions et les perturbations extérieures possibles (variations sur les matériaux...).

L'idée de Tagushi consiste à agir le plus rapidement possible sur les effets des perturbations plutôt que de chercher à en modifier les causes.

3. Cercles de qualité

Apparus en 1962 au Japon, leur succès peut être attribué à trois facteurs : l'usage de statistiques, la dynamique de groupe et la satisfaction dans le travail.

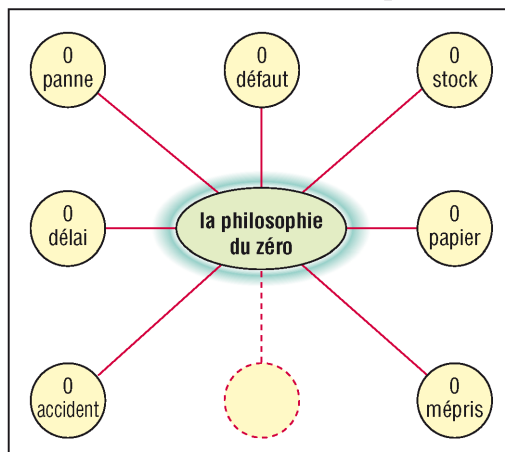
Composition : de 4 à 15 individus (adhésion volontaire) pouvant appartenir à des niveaux différents de l'entreprise, à un même service ou non. À la tête, un responsable ou un animateur principal, sorte de régulateur qui fixe les objectifs de travail, aidé par un animateur occasionnel, qui collecte les données et informations nécessaires à la résolution d'un problème particulier.

Mode de travail : les membres se rencontrent régulièrement pour définir, analyser, choisir et résoudre les problèmes concernant la qualité rencontrés dans leur travail. De tous les problèmes, le cercle retient le plus important et focalise son attention dessus (« brainstorming »).

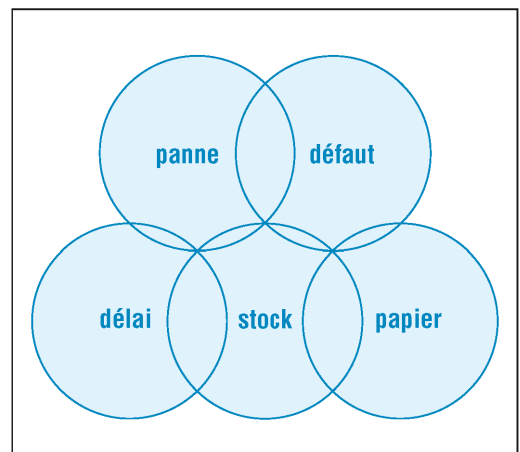
Philosophie : c'est réunir les personnes directement concernées par un problème donné afin d'en débattre. Connaissant leur travail mieux que quiconque, elles sont les mieux placées pour trouver les solutions et stopper les gaspillages.

| Principaux apports des cercles de qualité | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la qualité. - Réduction des gaspillages. - Modification des attitudes et des comportements. - Réduction des coûts. - Amélioration de la sécurité. - Collecte de données (histogrammes, diagrammes, Ishikawa). | <ul style="list-style-type: none"> - Plus grande productivité. - Augmentation de la satisfaction du travail réalisé. - Mise en place et cohésion des équipes. - Amélioration des compétences et des savoir-faire... - Amélioration de la communication. |

4. Zéro défaut - Philosophie du zéro



10. Philosophie du zéro.



11. Exemple d'affichage de la philosophie zéro.

La philosophie du zéro peut s'appliquer à de nombreuses non-qualités : défauts, pannes, délais, stocks...

Dans le cas d'un programme zéro défaut, l'objectif est d'éliminer les défauts ou erreurs dues aux intervenants. Ces défauts résultent d'une combinaison des causes ci-dessous :

- Ne pas savoir comment réaliser correctement l'opération demandée « se corrige par une formation ou une qualification complémentaire ».
- Ne pas avoir les moyens (équipements, machines...) pour réaliser correctement le travail envisagé « se corrige par un remplacement d'outils ou de machines ».
- Manquer d'attention ou de concentration pour réaliser correctement la tâche demandée. Ce point est le plus difficile à corriger car il dépend le plus souvent de l'attitude de la personne

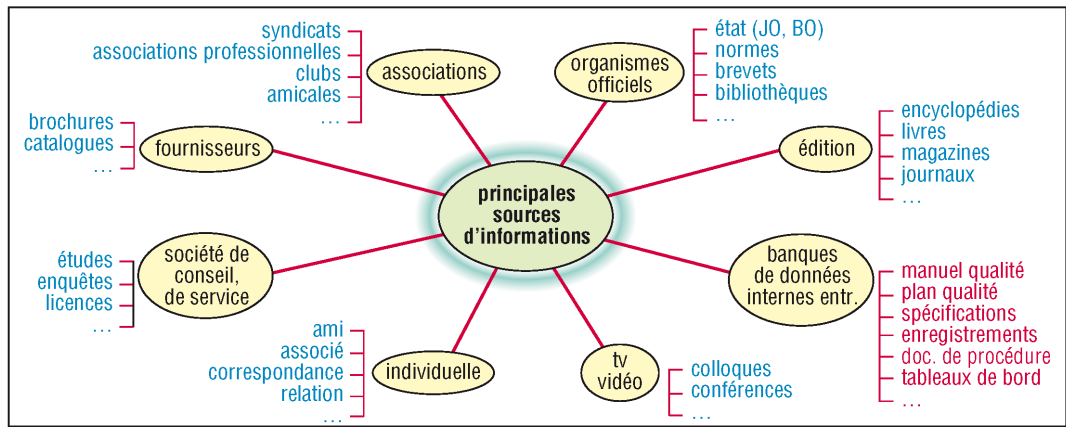
effectuant le travail. En général, ce changement d'attitude est l'objectif d'un programme zéro défaut.

L'auto-contrôle : c'est un mode de contrôle selon lequel une personne exerce son propre contrôle sur le résultat de son travail, à partir des règles définies par l'assurance qualité qui consiste à apprécier soi-même son travail.

Utilisé à tous les rangs hiérarchiques, l'auto-contrôle est une des conditions pour réussir le zéro défaut.

5. Information, communication et documentation

Il faut un système bien organisé pour collecter, stocker, analyser et transmettre les informations concernant la qualité afin d'assister les décisions qui doivent être prises à tous les niveaux de l'entreprise. Une bonne documentation permet la communication des desseins et la cohérence des objectifs.



12. Principales sources d'informations et de documentation.

| Principales informations concernant la qualité | | |
|---|--|---|
| Documents « management qualité » – manuels qualité – plans qualité – spécifications « exigences... » – lignes directrices « recommandation, ... » – procédures, instructions de travail, ... – enregistrements : traçabilité, conformité | Informations clients – enquêtes d'opinion à la conception – analyse réclamations et plaintes – garanties, services rendus – données d'essais, tests – résultats d'expériences... | Informations qualité en conception – données d'essais, tests – données fournisseurs – prédictions de fiabilité – modes de défaillances – coûts, ... |
| Tableau de bord qualité Résultats d'audits Résultats de diagnostics Résultats de revues | Informations après-vente – garanties – réclamations, plaintes – enquêtes | Informations production et achats – cahier des charges – contrôles (résultats, de réception...) – procédures, tests, essais, ... – coûts, enquêtes |

a) Tableau de bord qualité : affiché en permanence afin d'être facilement consulté par les personnes concernées, c'est la base de la gestion de la qualité au quotidien. Il permet de détecter rapidement les anomalies et de déclencher les actions nécessaires.

Il est établi à partir de relevés de synthèse réguliers et périodiques concernant les principaux indicateurs de niveau de la qualité : achats et fournisseurs, production, services, satisfaction des clients...

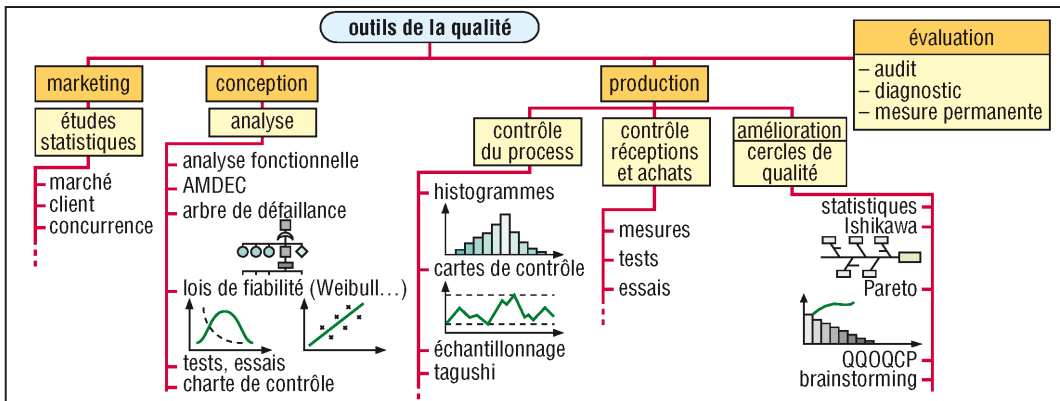
Sur le tableau sont inscrits le niveau de l'indicateur et la tendance.

Exemples : nombre de pannes 7 « en augmentation », pourcentage de livraisons en retard 5 % « en baisse »...

b) Manuel qualité : lorsqu'une entreprise a mis en place les procédures et les moyens nécessaires pour assurer la qualité, elle souhaite informer à la fois son personnel, ses clients (actuels ou potentiels), ses fournisseurs, d'autres entreprises (sous-traitance...) et éventuellement des organismes officiels dans le but d'obtenir à terme une certification.

À cette fin, le manuel qualité, mis à jour régulièrement, est à la fois un outil d'information mais aussi un document de référence à consulter. Il rassemble toutes les informations importantes concernant tout ce qui est mis en œuvre pour maîtriser la qualité dans l'entreprise : cahiers des charges, procédures, moyens à utiliser, données...

IX - Méthodes et outils utilisés pour maîtriser la qualité



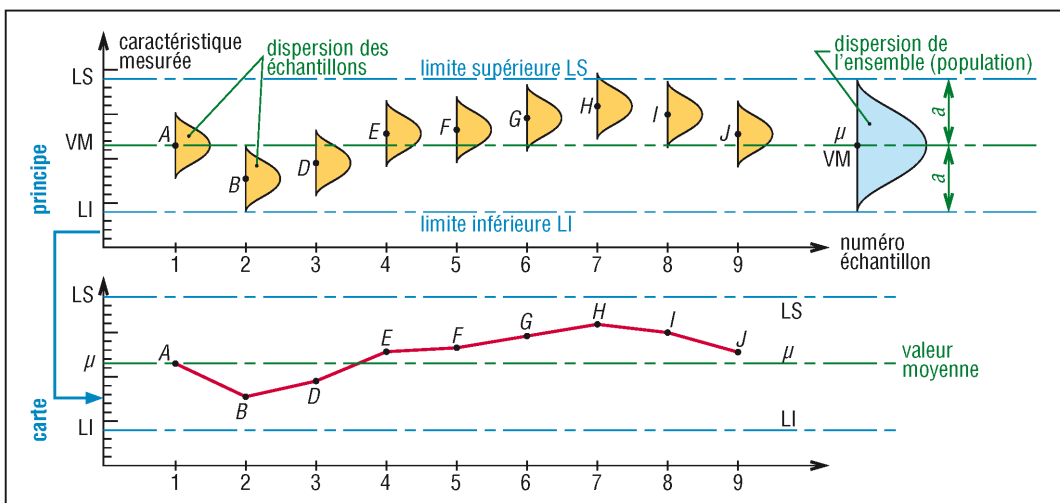
13. Principaux outils pour maîtriser la qualité.

1. Cartes de contrôle

Cet outil statistique est utilisé pour maîtriser, contrôler et observer les variations d'une production ou d'un processus. Voir détails NF ISO 7870-1...

Lorsque des variations anormales sont détectées (caractéristiques en dehors des limites) les causes doivent être déterminées et des corrections apportées avant qu'une grande quantité d'objets non conformes soit fabriquée.

L'observation de ces cartes permet aussi d'évaluer la capacité du processus utilisé mais vise également son amélioration, l'objectif étant de réduire les variations autour de la valeur moyenne VM.

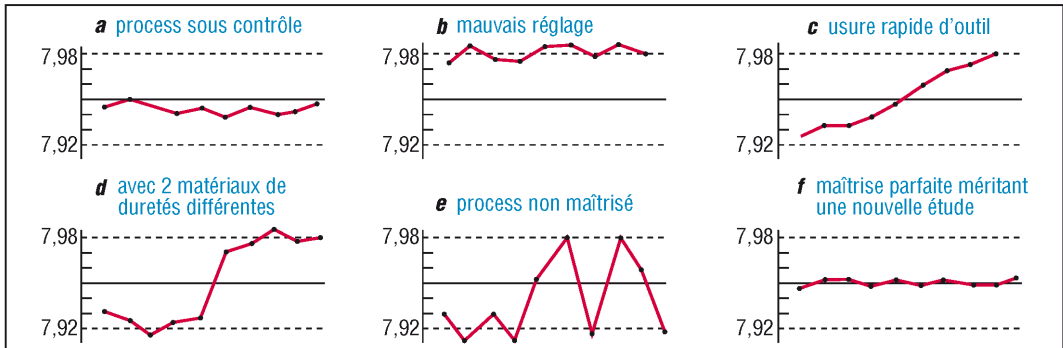


14. Principe des cartes de contrôle.

a) Principe : les caractéristiques, portées point par point sur les cartes (points A, B...), sont mesurées ou calculées à partir d'échantillons de population successifs (tailles usuelles : 5, 10, 15 individus) prélevés dans la ligne de production. Les valeurs doivent être situées dans les limites prévues (entre LS et LI) et rester aussi proches que possible de la valeur moyenne (VM ou μ).

b) Caractéristiques mesurées : la valeur moyenne des échantillons « est employée pour détecter les variations de la valeur moyenne du procédé ». Les dispersions ou les écarts-types des échantillons « permettent de détecter les changements dans la dispersion du procédé... »

Exemples : cartes typiques obtenues en usinage (VM = 7,95 mm ; LS = 7,98 et LI = 7,92).

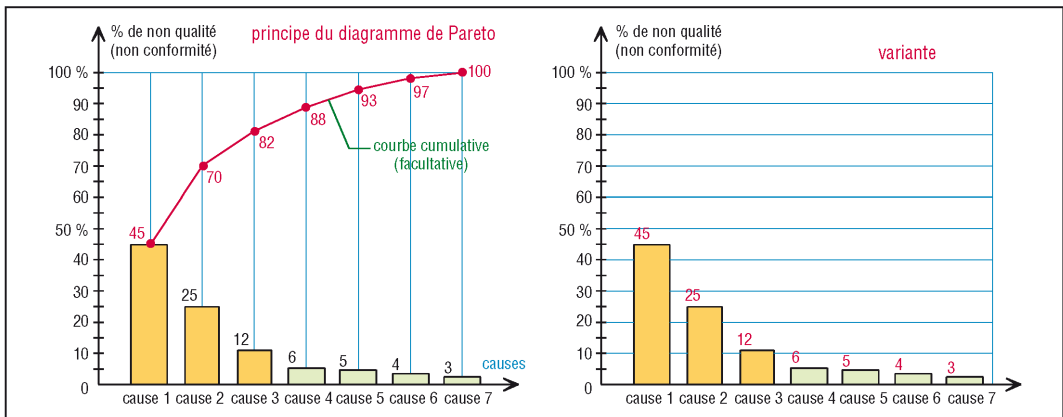


15. Exemples de cartes de contrôle d'un usinage.

2. Diagramme de Pareto

Ce diagramme à barres verticales particulier, connu aussi sous le nom de règle des 80/20 ou de méthode ABC, peut s'appliquer à tous les domaines et observations.

D'après Pareto, on estime qu'environ 80 % des coûts de non-qualité proviennent de 20 % seulement des fonctions, d'où loi des 80/20. Le diagramme fait clairement apparaître la ou les causes principales à l'origine du plus grand nombre d'effets (défauts, non-qualité...). Il peut servir pour établir des priorités afin d'améliorer la qualité.



16. Exemples de diagrammes de Pareto.

3. Diagramme cause-effet (Ishikawa ou arête de poisson)

Adapté à presque tous les types de processus, il convient bien au travail de groupe ; il peut être le résultat d'un cercle de qualité ou d'un brainstorming. Son analyse peut être réalisée à partir d'autres outils : Pareto...

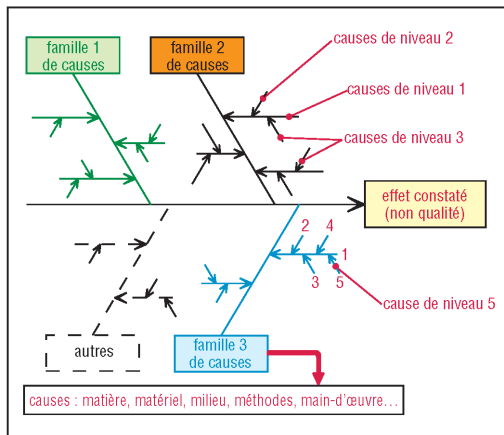
Cette forme de présentation et d'analyse permet de visualiser les causes, réelles ou supposées, pouvant provoquer un effet (défaut, non-qualité) que l'on cherche à comprendre.

Les causes sont groupées par famille dont le nombre varie en général entre 3 et 10, valeurs usuelles : 5 et 6. **Exemples** : rebuts, retouches, retours, réclamations, main-d'œuvre...

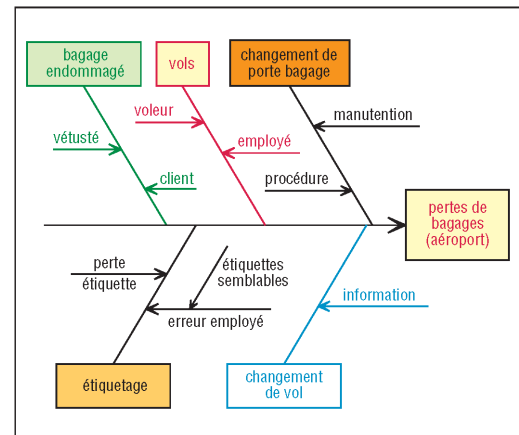
a) Forme générale, cas d'une non-qualité ou dysfonctionnement : plusieurs formes variantes et plusieurs familles (souvent 5) de causes sont possibles (principe : **fig. 17**).

Exemple : l'effet constaté, perte des bagages dans un aéroport, est tracé à droite du diagramme. Après un travail de groupe, les principales familles de causes identifiées sont portées à l'extrémité des arêtes principales et les causes retenues sur les arêtes intermédiaires (**fig. 18**).

Des subdivisions sont toujours possibles, pour l'étiquetage, les erreurs des employés peuvent être de plusieurs natures : confusion entre étiquettes semblables, inattention...



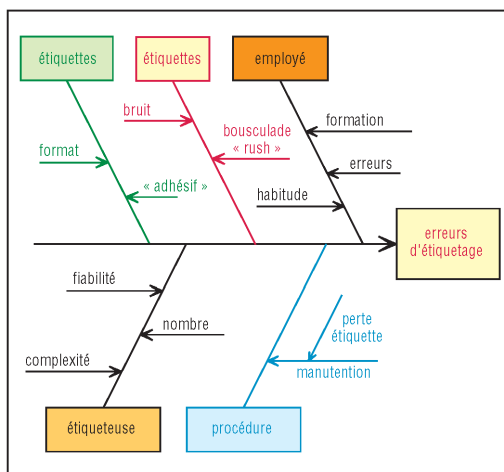
17. Forme générale et exemples de causes.



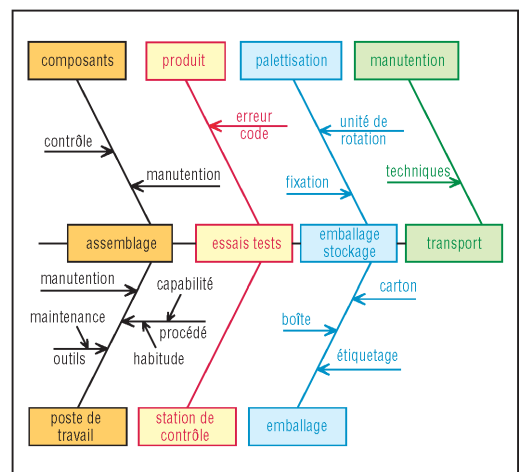
18. Exemple d'application du diagramme cause-effet.

b) Application à l'analyse d'une cause particulière : le diagramme peut aussi servir à centrer ou focaliser l'analyse sur un domaine ou une famille précise jugée importante du diagramme principal.

Exemple : diagramme des erreurs d'étiquetage correspondant à la perte des bagages (**fig. 19**).



19. Application à l'étude d'une cause particulière.



20. Application à l'analyse d'un processus.

c) Application à l'analyse d'un processus : le diagramme peut également être utilisé pour suivre un produit à travers son processus. Les causes rencontrées (défauts, etc.) à chaque étape sont notées sur le diagramme, ce qui permet la prévention en mettant en évidence les problèmes possibles (**fig. 20**).

4. AMDEC

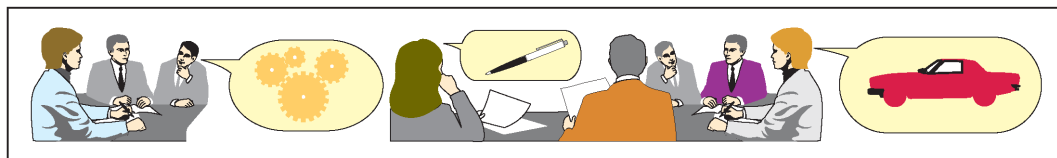
Utilisée au moment de la conception du produit pour assurer la qualité, c'est une méthode d'analyse des modes de défaillances, de leurs effets, de leur gravité et de leur criticité (voir le chapitre 37 page 439 : méthodes d'analyse)

5. Brainstorming ou « remue-méninges »

Liée à la créativité, cette technique de travail de groupe est utilisée pour rechercher des idées ou des voies nouvelles.

Les membres du groupe sont conviés, par un animateur qui note tout, à dire tout ce qui leur vient à l'esprit sur un sujet donné, sans se soucier de réalisme, rationalité, triage, critiques...

Une fois terminé, les idées sont classées, regroupées, analysées, stockées puis exploitées.



21. Le brainstorming.

6. QQQQCP ou QQQQCPCPQ

(Qui ? Quoi ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ? / Combien ? Pourquoi ?)

On peut utiliser cette sorte de questionnaire type lorsque l'on veut décrire une situation ou une action. Il peut servir d'introduction ou sert pour démarrer un brainstorming (début de séance).

7. Audit qualité

Il permet d'apprécier la situation et se traite sous forme d'examen méthodique, éventuellement noté, concernant la qualité d'un produit, d'une organisation ou d'un processus. L'audit suppose l'existence d'une référence en matière de qualité. Différents cas peuvent se présenter :

- **Audit interne** : par exemple réalisé par un responsable du service qualité de l'entreprise.
- **Audit externe** : réalisé par un client, une société de conseil ou par un organisme officiel extérieur à l'entreprise (VERITAS, AFNOR...).
- **Audit d'habilitation** : réalisé lorsque l'on souhaite obtenir une certification, un label...
- **Audit périodique** : réalisé à intervalles réguliers, il vérifie qu'il n'y a pas de dérive.

8. Diagnostic qualité

Il est utilisé pour faire un bilan général sur la qualité et ne présuppose pas que l'entreprise soit malade. Il évalue le niveau de qualité du produit aux différentes étapes de la réalisation, les coûts de non-qualité, l'organisation mise en place. Il permet aussi de dégager les points forts, les insuffisances et des propositions d'actions.

Examen méthodique de la situation, il consiste à attribuer une appréciation (note, indice global, tendance) aux points clés de la qualité du produit : performances, coûts, satisfaction des clients...

Il est réalisé en collaboration avec les intervenants de l'entreprise par un expert extérieur ou non (entretiens, réunions de groupe, visites...).

9. Certification, homologation et label

Après avoir mis en place les procédures, les moyens nécessaires pour assurer la qualité et rédiger son manuel qualité une entreprise souhaite ensuite obtenir une certification.

La certification est la reconnaissance par un organisme agréé de la qualité d'un produit, d'un service ou de l'entreprise elle-même, sorte de diplôme garantissant la qualité. Sa valeur dépend de la notoriété de l'organisme l'attribuant.

Exemple : en France l'AFAQ, dépendant de l'AFNOR, délivre une certification nationale d'assurance qualité aux entreprises.

39

FIABILITÉ MAINTENABILITÉ DISPONIBILITÉ DURABILITÉ

OBJECTIFS

- Définir la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la durabilité.
- Donner des éléments de calcul concernant la fiabilité de composants montés en série et en parallèle.
- Proposer des exercices d'application.

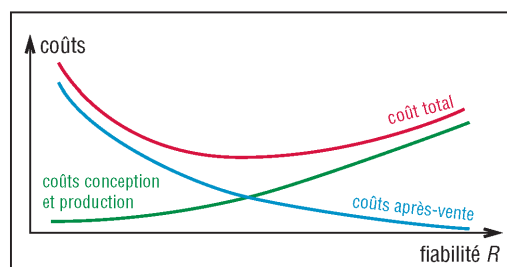
Fiabilité, maintenabilité, disponibilité et durabilité sont des composantes essentielles de la qualité d'un produit. Elles sont retenues comme critères fondamentaux pour leur élaboration et sont prises en considération dès le début des projets : définition du besoin, conceptualisation et avant-projet.

I - Notions de fiabilité

1. Généralités

La fiabilité caractérise l'aptitude d'un système ou d'un matériel à fonctionner sans incidents pendant un temps donné.

La non-fiabilité augmente les coûts d'après-vente : applications des garanties, frais judiciaires, etc. Construire plus fiable augmente les coûts de conception et de production. En pratique, le coût total d'un produit prend en compte ces deux tendances.



1. Évolution des coûts en fonction de l'augmentation de la fiabilité.

Remarques :

- La fiabilité d'une machine a tendance à diminuer avec le nombre de ses composants. Plus les composants sont nombreux ou complexes et plus la fiabilité est difficile à maîtriser.
- Une très haute qualité pour chaque composant n'entraîne pas nécessairement une grande fiabilité. Après assemblage, les interactions qui se produisent entre les composants diminuent la capacité de l'ensemble.
- Une grande fiabilité sous certaines conditions n'implique pas une grande fiabilité sous d'autres conditions. Exemple : une huile moteur prévue pour climats très froids ne convient pas forcément sous les climats tropicaux.

2. Définitions

a) Fiabilité (R) : c'est la probabilité ($0 \leq R \leq 1$) qu'a un produit d'accomplir de manière satisfaisante une fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donnée.

Exemple : $R = 0,86$ au bout de 75 heures, signifie que le produit à 86 chances sur 100 (86 % de chances) de fonctionner correctement pendant les 75 premières heures.

b) Indicateurs de fiabilité (λ) et (MTBF)

Taux de défaillances ou taux d'avaries (λ) : il représente le pourcentage de défaillances pendant un temps donné (caractérise la vitesse de variation de la fiabilité).

$$\lambda = \frac{\text{nombre total de défaillances pendant le service}}{\text{durée totale de bon fonctionnement}}$$

Les unités sont : le nombre de défaillances par heure, le pourcentage de défaillances pour 1 000 heures...

Remarque : la durée de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances.

Un produit ayant $10^{-7} < \lambda < 10^{-5}$ pour 1 000 heures (ou $10^{-4} < \lambda < 10^{-2}$ par heure) présente un bon niveau commercial de fiabilité.

MTBF (*Mean Time Between Failures*) temps moyen de fonctionnement entre défaillances :

$$\text{MTBF} = \frac{\text{somme des temps de fonctionnement entre les } n \text{ défaillances}}{\text{nombre des temps de bon fonctionnement}}$$

Si λ est constant : $\text{MTBF} = 1/\lambda$

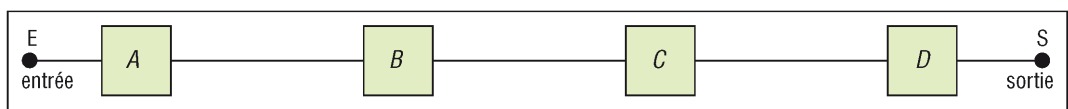
Exemple : une pompe industrielle a fonctionné pendant 10 000 heures en service continu avec sept pannes dont les durées respectives sont : 4 - 2,5 - 6 - 12 - 1,5 - 36 - 3,5 heures. Calculez son MTBF.

$$\text{MTBF} = \frac{10\,000 - (4 + 2,5 + 6 + 12 + 1,5 + 36 + 3,5)}{7}$$

$$\text{MTBF} = \frac{10\,000 - 65,5}{7} = \frac{9\,934,5}{7} = 1\,419,2 \text{ heures}$$

$$\lambda = \frac{7}{9\,934,5} = \frac{1}{\text{MTBF}} = 0,000\,7 \text{ défaillance par heure}$$

3. Fiabilité d'un système constitué de plusieurs composants montés en série



2. Cas de 4 composants connectés en série.

a) Cas général : la fiabilité R_s d'un ensemble de n constituants connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives R_1, R_2, \dots, R_N de chaque composant.

$$R_s = (R_1) \cdot (R_2) \cdot (R_3) \cdot \dots \cdot (R_N)$$

Si les n composants sont identiques et tous de même fiabilité R :

$$R_s = (R)^n$$

Exemples :

– Un poste de radio est constitué des quatre composants suivants montés en série : alimentation ($R = 0,95$), récepteur ($R = 0,99$), amplificateur ($R = 0,97$) et haut-parleur ($R = 0,98$). Quelle est la fiabilité globale ?

$$R_s = 0,95 \times 0,99 \times 0,97 \times 0,98 = 0,894 \text{ (89,4 \%)}$$

– Une machine à écrire est constituée de 2 000 composants montés en série ayant tous la même fiabilité (très élevée) $R = 0,9999$. Quelle est la fiabilité globale ?

$$R_s = (R)^n = (0,9999)^{2000} = 0,8187 \text{ (}\approx 82\% \text{)}$$

Si le nombre de composants est divisé par 2 : $R_s = 0,9999^{1000} = 0,9048 \text{ (90,5 \%)}$

La valeur de R si on souhaite une fiabilité de 90 % avec les 2 000 composants est de :

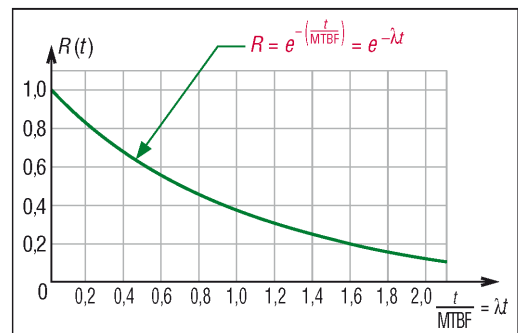
$$R_s = (R)^{2000} = 0,9$$

$$\ln(R_s) = 2000 \cdot \ln(R) = \ln(0,9)$$

$$R = 0,99995$$

b) Cas de taux de défaillances ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$) constants

| cas de composants différents | cas de composants identiques |
|--|--------------------------------|
| $R_s = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n) \cdot t}$ | $R_s = e^{-n \lambda t}$ |
| $MTBF_s = \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N)}$ | $MTBF_s = \frac{1}{n \lambda}$ |
| $\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$ | $\lambda_s = n \lambda$ |



3. Allure de la fiabilité dans le cas d'une distribution exponentielle.

Exemple : Soit quatre composants en série dont les taux de pannes constants respectifs pour 1 000 heures sont : 0,052 - 0,056 - 0,042 et 0,047.

a) Quelle est la probabilité pour que le système survive jusqu'à 5 000 heures ?

À 5 000 heures correspond $t = 5$ (λ est exprimé pour 1 000 heures)

$$R(5) = e^{-(0,052 + 0,056 + 0,042 + 0,047) \cdot t} = e^{-0,197 \cdot 5} = e^{-0,985} = 0,373 \text{ (37,3 \%)}$$

$$\lambda = 0,052 + 0,056 + 0,042 + 0,047 = 0,197 \text{ (19,7 \% de défaillances pour 1 000 heures)}$$

b) Quelle est la valeur du $MTBF_s$ de l'ensemble ?

$$MTBF_s = \frac{1}{0,052 + 0,056 + 0,042 + 0,047} = \frac{1}{0,197} = 5,08$$

(soit un temps moyen entre défaillances de 5 000 heures environ).

4. Fiabilité d'un système constitué de composants montés en parallèle (redondances)

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant les composants en parallèle. Un dispositif constitué de n composants en parallèle ne peut tomber en panne que si les n composants tombent en panne au même moment.

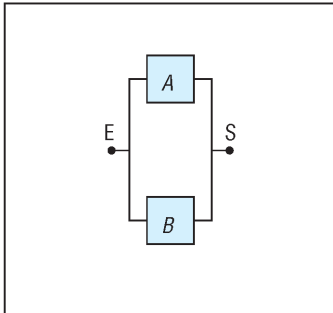
a) Cas général

Si F_i est la probabilité de panne d'un composant, la fiabilité associée R_i est son complémentaire : $F_i = 1 - R_i$.

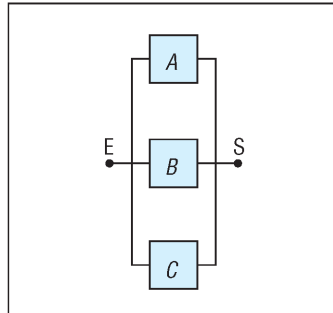
Pour n composants connectés en parallèle ayant des probabilités de panne $[F_1, F_2, \dots, F_N]$ et des fiabilités associées $[R_1, R_2, \dots, R_N]$, la probabilité de panne F_p et la fiabilité R_p de l'ensemble des n composants en parallèle sont :

$$F_p = (F_1) \cdot (F_2) \dots (F_n) = (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n); R_p = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n)$$

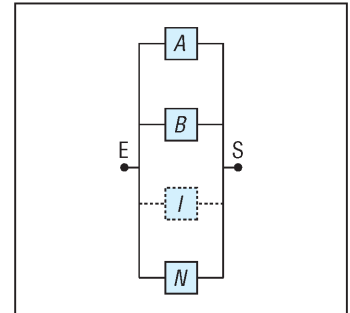
Si les n composants sont identiques et tous de même fiabilité R : $R_p = 1 - (1 - R)^n$



4. Deux composants en parallèle.



5. Trois composants en parallèle.



6. n composants en parallèle.

Exemple : soit trois composants identiques de même fiabilité ($R = 0,75$) connectés en parallèle, quelle est la fiabilité globale ?

$$R_p = 1 - (1 - 0,75)^3 = 1 - (0,25)^3 = 1 - 0,0156 = 0,984$$

Si on souhaite une fiabilité globale de 99 %, quelle doit être la fiabilité R' de chaque composant ?

$$R_p = 0,990 = 1 - (1 - R')^3$$

$$(1 - R')^3 = 0,010$$

$$3 \cdot \ln(1 - R') = \ln(0,010)$$

$$R' = 0,7846 \text{ (78,5 \%)}$$

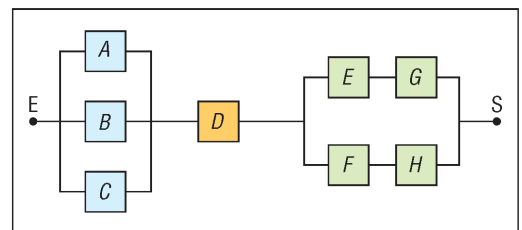
b) Cas de taux de défaillances ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$) constants

Cas général: $R_p(t) = 1 - (1 - e^{\lambda_1 t})(1 - e^{\lambda_2 t}) \dots (1 - e^{\lambda_n t})$
 Cas de n composants identiques (tous de même taux de pannes λ) :
 $R_p(t) = 1 - (1 - e^{\lambda t})^n$
 $MTBF_s = \frac{1}{\lambda} \left[1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right]$

5. Combinaisons de composants en série et en parallèle

C'est la combinaison des deux cas précédents.

Exemple : les trois composants A, B et C étant identiques, déterminons la fiabilité R_e de l'ensemble (fig. 7). Les fiabilités respectives des composants sont indiquées dans le tableau ci-dessous.



7. Combinaisons de composants en parallèle et en série.

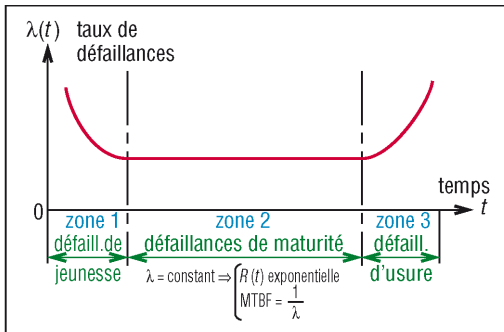
| Composants | A | B | C | D | E | F | G | H |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| Fiabilités | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,96 | 0,92 | 0,89 | 0,87 | 1 |

$$R_e = [1 - (1 - 0,65)^3] \cdot [0,96] \cdot [1 - (1 - 0,92 \cdot 0,87)(1 - 0,89 \cdot 1)] = 0,957 \cdot 0,96 \cdot 0,978 = 0,909 \text{ (environ 90 \%)}$$

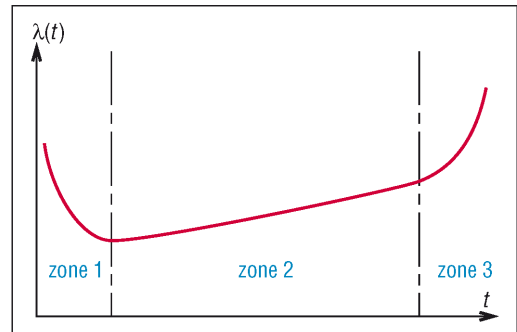
| Fiabilité : autres cas usuels (extraits NF EN 61078) | |
|---|---|
| systèmes connectés en parallèle et dits en attente | cas où m composants sur n sont nécessaires au succès |
| <p>A est actif et B en attente. Si A est défaillant, B le remplace aussitôt. Si A et B sont identiques de fiabilité λ, fiabilité de l'ensemble :</p> $R(t) = e^{-\lambda t} [1 + \lambda t]$ <p>avec n composants identiques :</p> $R(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^n}{n!} \right]$ | <p>avec n composants tous de fiabilité R, s'il doit y avoir au moins m composants toujours actifs sur les n, fiabilité de l'ensemble :</p> $R_s = \sum_{i=m}^n \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i}$ <p>avec 2 composants actifs sur 3 on a :</p> $R_s = R^3 + 3R^2(1-R) = 3R^2 - 2R^3$ |

6. Allures typiques du taux de défaillance λ

Plusieurs fonctions ou modèles statistiques peuvent être utilisés pour représenter $\lambda(t)$ qui peut être constant, croissant ou décroissant au cours du temps t .



8. Allure typique des composants électroniques.



9. Allure typique des composants mécaniques.

Pour la majorité des produits industriels, les variations de $\lambda(t)$ au cours du temps (sortes de « courbes en baignoire ») présentent trois zones typiques :

a) Zone 1 (début de la vie du produit) : les défaillances sont dites de jeunesse (composants neufs avec défauts de fabrication). $\lambda(t)$ décroît avec le temps.

b) Zone 2 (maturité ou pleine activité du produit) : $\lambda(t)$ est sensiblement constant. C'est le domaine des défaillances imprévisibles ou aléatoires. Si λ est constant ($\lambda(t) = \lambda$) alors $R = e^{-\lambda t}$.

c) Zone 3 (vieillesse du produit) : les défaillances sont dues à l'âge ou à l'usure des composants. $\lambda(t)$ croît avec le temps du fait de la dégradation du matériel (usures mécaniques, fatigue, dérive des composants électroniques...). Les lois de fiabilité utilisables sont : loi normale, Gamma, log normale ou Weibull. La durée de vie usuelle d'un produit s'arrête au début de la zone 3.

Remarque : la courbe 1 est typique des équipements électroniques. Dans le cas des équipements mécaniques $\lambda(t)$ est légèrement croissant dans la zone 2 (courbe 2). Modèles variants usuels : zones 1 et 2 confondues et λ constant ; zone 2 et 3 confondues avec λ constant ; modèle sans zones 1 et 3 avec λ constant ou croissant...

II - Maintenabilité et maintenance

1. Définitions

a) Maintenance : cette fonction consiste à faire revenir (dépannage ou réparation) ou à maintenir (action préventive) tout dispositif dans son état de fonctionnement normal. Elle s'exprime au moyen de la maintenabilité.

b) Maintenabilité : elle traduit la probabilité de remettre un système en état de fonctionner, en un temps donné, dans des conditions données et en retrouvant la fiabilité initiale. Elle s'exprime à l'aide du MTTR. Augmenter la maintenabilité d'un produit c'est le rendre plus facilement réparable.

2. Indicateurs ou critères de maintenabilité (MTTR) et (μ)

a) MTTR (Mean Time To Repair) moyenne des temps de remise à disposition

$$\text{MTTR} = \frac{\text{somme des temps de réparation}}{\text{nombre de réparations}} = \text{temps moyen d'une réparation}$$

b) Taux de réparation μ : si μ est constant au cours du temps alors $\mu = 1/\text{MTTR}$.

Exemple : une pompe industrielle a fonctionné pendant 10 000 heures avec sept pannes dont les durées (ou temps de réparation) respectives sont : 4 - 2,5 - 6 - 12 - 1,5 - 36 et 3,5 heures. Calculez la valeur du MTTR.

$$\text{MTTR} = \frac{4 + 2,5 + 6 + 12 + 1,5 + 36 + 3,5}{7} = \frac{65,5}{7} = 9,357 \text{ heures}$$

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}} = \frac{1}{9,357} = 0,1069$$

Différents types de maintenance sont possibles :

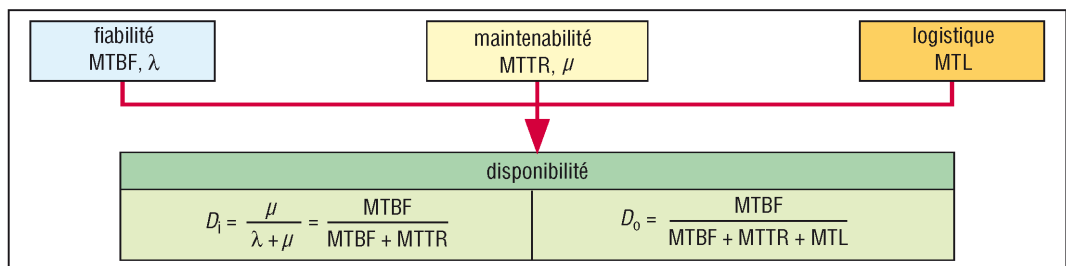
- Maintenance corrective : effectuée après une défaillance ou une panne.
- Maintenance préventive : effectuée dans le but de réduire la probabilité de défaillance d'un produit, avant qu'une panne de plus en plus probable ne se produise.
- Maintenance systématique : maintenance préventive effectuée selon un calendrier établi.
- Maintenance conditionnelle : maintenance préventive dépendant d'une mesure (usure...) ou d'une information (capteur...) révélateur de l'état de dégradation du produit.

Exemples : nettoyage, graissage, réglage, étalonnage, réparation, remplacement...

III - Disponibilité

Elle traduit l'aptitude d'un dispositif à être en état de fonctionner dans des conditions données. Elle met en évidence l'aptitude à la réparation d'un dispositif en mesurant l'efficacité de la maintenance.

Une haute disponibilité exige une excellente fiabilité (peu de défaillances), une bonne maintenabilité (une grande rapidité de réparation ou de remise en état) et une bonne logistique de maintenance (bonnes procédures d'entretien et de réparations, des moyens en personnel, des stocks de composants...).



10. Fiabilité, maintenabilité, logistique et disponibilités intrinsèque D_1 et opérationnelle D_0 .

1. Définitions

a) Taux de disponibilité (D)

$$D = \frac{\text{temps d'utilisation et d'attente}}{\text{temps d'utilisation et d'attente} + \text{temps de maintenance}}$$

b) Disponibilité intrinsèque D_i

Elle exclut la maintenance préventive, les délais logistiques (attentes fournitures...) et les délais administratifs.

$$D_i = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

c) Disponibilité opérationnelle D_0

Elle prend en compte les délais logistiques avec le MTL (moyenne des temps logistiques de maintenance).

$$D_0 = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR} + \text{MTL}}$$

2. Disponibilité de dispositifs connectés en série et en parallèle

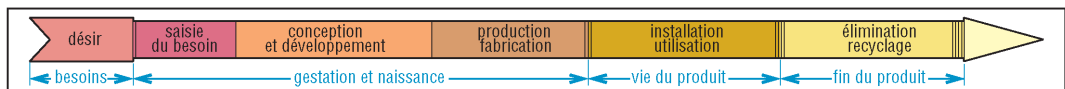
La démarche est la même qu'en fiabilité. Si D_s est la disponibilité globale et $[D_1, D_2, \dots, D_N]$ les disponibilités respectives de chaque composant sont :

$$\begin{aligned} \text{En série : } D_s &= (D_1)(D_2)\dots(D_N) \\ \text{En parallèle : } D_g &= 1 - (1 - D_1)(1 - D_2)\dots(1 - D_N) \end{aligned}$$

IV - Durabilité, durée de vie et cycle de vie d'un produit

1. Cycle de vie d'un produit

Il correspond à l'ensemble de toutes les étapes de la vie du produit, depuis les besoins qui ont amené sa création, jusqu'à sa mort.



11. Cycle de vie d'un produit.

2. Durabilité et durée de vie

a) Durabilité : elle représente la durée de fonctionnement potentielle, attendue ou probable, d'un dispositif pour la fonction ou la mission qui lui a été confiée dans des conditions d'utilisation et de maintenance données.

Remarque : elle dépend de la fiabilité, de la maintenabilité, de la maniabilité, de la qualité de fabrication, du conditionnement, de la logistique, du service après-vente, du marché...

b) Durée de vie

Pour un produit, elle présente les trois aspects suivants :

La durabilité : qui est la durée de fonctionnement probable ou attendue du produit dans les conditions normales d'utilisation.

La durée effective d'utilisation : pour un produit donné, appartenant à une famille de produits identiques, c'est la durée mesurée à partir de la première mise en circulation jusqu'à la cessation d'activité (recyclage ou élimination). Cette durée oscille ou varie de manière statistique autour de la valeur de durabilité précédente.

La durée de présence sur le marché : correspond à la période pendant laquelle un produit d'un type ou modèle donné peut être acquis à l'état neuf.

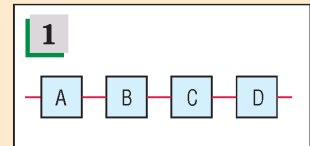
Exemple : durée de présence sur le marché d'un modèle de voiture.

| Durée de vie moyenne de quelques produits usuels | | | | |
|--|------------------------------|------------------------------|------------|---------------|
| automobile | lave-linge lave-vaisselle | réfrigérateur congélateur | téléviseur | machine-outil |
| 10 à 13 ans | 8 à 11 ans | 10 à 15 ans | 7 à 18 ans | 10 à 25 ans |

V - Exercices

Exercice 1

Un dispositif est formé de quatre composants connectés en série et de fiabilités respectives : 0,97 - 0,84 - 0,87 et 0,89. Calculer la fiabilité de l'ensemble.

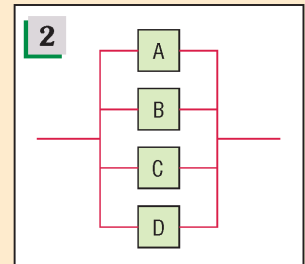


Exercice 2

Reprenre l'énoncé de l'exercice 1 mais avec quatre composants en parallèle. Comparer les résultats des deux exercices.

Exercice 3

Le système de réservation d'une agence de voyage se compose de trois micro-ordinateurs en parallèle. Quelle doit être la fiabilité de chaque appareil si l'on souhaite une fiabilité globale du système de 0,999 ?



Exercice 4

Une photocopieuse se compose de 3 000 composants, connectés en série. Tous les composants ont la même fiabilité ($R = 0,9998$). Calculer la fiabilité de l'ensemble. Refaire le calcul avec un nombre de composants divisé par 2 ?

Exercice 5

Un système est formé de quatre composants en série dont les taux de défaillances (constants) pour 1 000 heures sont respectivement : 0,052 - 0,059 - 0,044 et 0,048. Quelle est la probabilité pour que le système survive jusqu'à 4 000 heures ? Calculer le MTBF du système.

Exercice 6

Reprenre l'énoncé de l'exercice 5 mais avec quatre composants en parallèle.

Exercice 7

Un système est formé de n composants identiques en parallèle ayant chacun un taux de défaillances (constant) de 0,05 pour 1 000 heures. Calculer le MTBF du système lorsque n varie de 1 à 8. Quelles conclusions en tirez-vous ?

Exercice 8

Un dispositif est formé de cinq composants montés en série dont les MTBF respectifs en heures sont : 9 540, 15 220, 85 000, 11 200 et 2 600. Calculer la probabilité de survie de l'ensemble pour une durée de 1 000 heures si λ est supposé constant.

Exercice 9

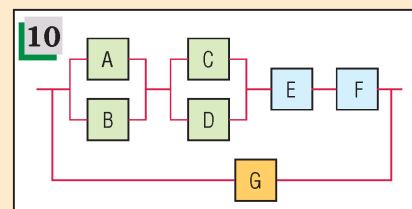
Si λ est constant, quelle est la fiabilité d'un dispositif travaillant pendant une période de temps égale au MTBF ?

Exercice 10

Calculer la fiabilité du dispositif proposé si : $R_A = 0,87$; $R_B = 0,85$; $R_C = R_D = 0,89$; $R_E = 0,94$; $R_F = 0,96$ et $R_G = 0,97$.

Les fiabilités sont indiquées pour 1 000 heures.

Calculer le taux de défaillances de l'ensemble.



40

TECHNOLOGIE ET STATISTIQUES

OBJECTIFS

- Donner des notions de probabilité, de population, d'échantillon, d'individu, de variable discrète et de variable continue, de distribution et de fréquence.
- Définir moyenne arithmétique et écart-type.
- Indiquer les caractéristiques et les propriétés des lois statistiques usuelles et de la régression linéaire.
- Application à la cotation fonctionnelle et exercices.

Les statistiques et les probabilités sont l'un des outils mathématiques les plus utiles à la technologie et à ses applications. Elles permettent de prendre des décisions là où les activités et les phénomènes sont pleins d'incertitudes.

Avec elles, de nombreuses données (observations, mesures expérimentales, contrôles, etc.) peuvent être observées, classées, présentées, analysées, estimées, comparées et interprétées.

I - Notion de probabilité

La probabilité est une grandeur qui mesure ou estime les chances de succès, ou d'insuccès, d'événements dont le caractère est aléatoire : possible et non certain.

Probabilité d'un événement : c'est un nombre, compris entre 0 et 1, qui mesure les chances ou les possibilités qu'à un événement (A) de se produire.

Notation $P(A)$.

Propriétés

$$P(A) = \frac{\text{nombre de cas favorables}}{\text{nombre de cas possibles}}$$

$$P(A) = \frac{\text{nombre de fois que l'on a l'événement } A \text{ en } n \text{ tentatives}}{n \text{ (nombre total de tentatives ou d'essais)}}$$

$$0 \leq P(A) \leq 1$$

$P(A) = 0$ si l'événement ne peut pas se produire ;

$P(A) = 1$ si l'événement est certain de se produire.

Inversement, la probabilité que l'événement A ne se produise pas est :

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A) \quad \text{ou} \quad P(A) + P(\bar{A}) = 1$$

Exemple : au jeu pile ou face avec une pièce de monnaie, la probabilité d'avoir le côté face est de 0,5 (1 chance sur 2). On peut écrire :

$P(\text{côté face}) = P(f) = 0,5$ (de chance),

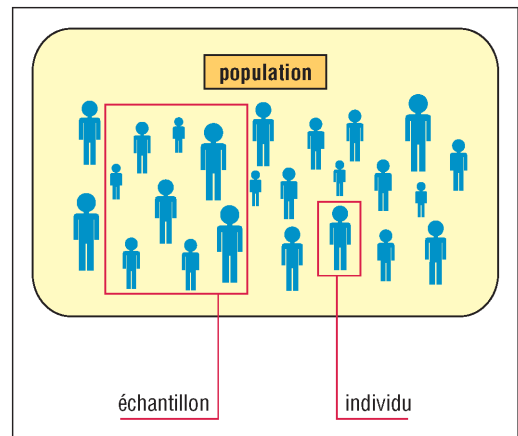
et la même chose avec le côté pile : $P(\text{côté pile}) = P(p) = 0,5$.

II – Populations, échantillons et individus

Les études statistiques sont réalisées sur des populations, composées d'un nombre plus ou moins élevé d'individus, ou sur des échantillons de population.

Individus : ils peuvent être des personnes (consommateurs, électeurs, etc.), des objets d'une même famille (automobiles, TV, etc.), des mesures expérimentales ou observations (masses, longueurs, temps, contrôles de qualité, nombre de défaillances, etc.), des événements (rencontres sportives, etc.)...

Échantillon : comme il est souvent difficile ou impossible de mesurer ou contrôler en même temps tous les individus d'une même population, les estimations sont réalisées à partir de prélèvements appelés échantillons. Chaque échantillon doit contenir un nombre suffisant d'individus suffisamment variés pour être représentatif de la population étudiée.



1. Exemple de population, d'échantillon et d'individu.

III – Variable discrète et variable continue

Deux types de variables sont utilisées dans les études statistiques pour représenter individus et population : les variables discrètes et les variables continues.

1. Variable discrète

Si une variable ne peut prendre qu'un nombre fini de valeurs, elle est appelée variable discrète. Dans ce cas, il est toujours possible de faire la liste de toutes les valeurs (x_1, x_2, \dots, x_n) prises par la variable, même si cette liste continue indéfiniment.

Exemples : variable associée au jeu pile ou face : deux valeurs possibles, « pile » ou « face » ; variable associée au jeu de dé : six valeurs possibles.

Un nombre de voitures passant à un endroit donné, en un intervalle de temps connu, est aussi une variable discrète, même si ce nombre est élevé.

Les contrôles de qualité (pièce bonne ou pièce mauvaise, nombre de défauts de tel type, etc.) sont à l'origine de nombreuses variables discrètes.

2. Variable continue

Si une variable peut prendre n'importe quelle valeur dans un intervalle donné entre une valeur minimale et une valeur maximale, elle est dite continue.

Dans ce cas, le nombre des valeurs possibles est infini et la liste impossible à réaliser (analogie avec la variable x de la fonction $y = ax + b$).

Exemple : mesures physiques (temps, température, intensité...).

Remarque : sous certaines conditions, il est parfois préférable d'utiliser une variable continue pour schématiser ou faire l'approximation d'une variable discrète ; elle permet de remplacer de nombreux calculs fastidieux par des formules connues et des tables de valeurs faciles d'emploi.

IV – Notion de distribution et de fréquence

Lorsqu'un ensemble de données statistiques vient d'être collecté, le premier travail consiste à classer les valeurs par intervalles successifs. Une fois le classement terminé, il est avantageux d'en donner une représentation graphique.

1. Histogrammes

Régulièrement utilisés, ils donnent une estimation et une bonne image de la distribution des valeurs : répartition des valeurs entre elles, position des zones les plus peuplées, densités, étalement...

| Recommandations d'Ishikawa pour le tracé des histogrammes | |
|---|--|
| nombre d'observations ou de mesures dans l'échantillon | nombre d'intervalles recommandés pour tracer l'histogramme |
| < 50 | 5 à 7 |
| 50 à 100 | 6 à 10 |
| 100 à 250 | 7 à 12 |
| > 500 | 10 à 20 |

a) Exemple : un dispositif d'usinage automatisé réalise (tournage + rectification) 3 000 cylindres de diamètre 30 mm, par jour. Afin de contrôler le processus on prélève, à intervalle régulier, un échantillon de 50 pièces.

Population étudiée = les milliers de cylindres produit chaque jour.

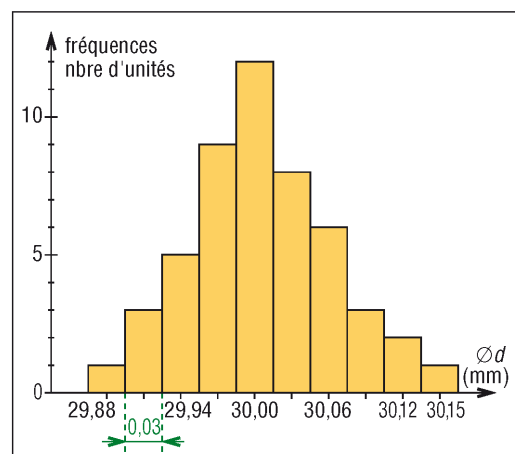
Échantillon = 50 cylindres prélevés dans la production.

Individu = chaque cylindre de la production.

| Tableau 1 | | | | Tableau 2 : classement des valeurs du tableau 1 | | | |
|--|--------|--------|--------|---|--------------------|---------------|----------------------------|
| résultats des mesures de diamètres d'un échantillon de 50 cylindres $\varnothing d$ (mm) | | | | intervalles de à | fréquence f_i | | f_{cl} fréquence cumulée |
| | | | | | en nombre d'unités | en % du total | |
| 30,009 | 29,946 | 30,021 | 30,039 | 29,865-29,894 | 1 | 1/50 = 0,02 | 0,02 |
| 29,961 | 30,075 | 30,063 | 29,928 | 29,895-29,924 | 3 | 3/50 = 0,06 | 0,08 |
| 30,045 | 29,988 | 29,994 | 30,057 | 29,925-29,954 | 5 | 5/50 = 0,10 | 0,18 |
| 30,003 | 30,018 | 29,973 | 29,979 | 29,955-29,984 | 9 | 9/50 = 0,18 | 0,36 |
| 29,961 | 29,961 | 30,045 | 30,078 | 29,985-30,014 | 12 | 12/50 = 0,24 | 0,60 |
| 30,051 | 29,910 | 30,009 | 30,018 | 30,015-30,044 | 8 | 8/50 = 0,16 | 0,76 |
| 30,030 | 29,970 | 30,105 | 29,991 | 30,045-30,074 | 6 | 6/50 = 0,12 | 0,88 |
| 30,012 | 29,967 | 29,925 | 30,069 | 30,075-30,104 | 3 | 3/50 = 0,06 | 0,94 |
| 29,973 | 29,991 | 30,036 | 29,937 | 30,105-30,134 | 2 | 2/50 = 0,04 | 0,98 |
| 30,144 | 30,123 | 29,925 | 29,889 | 30,135-30,164 | 1 | 1/50 = 0,02 | 1,00 |
| 30,000 | 30,030 | 29,979 | 29,904 | total | $\Sigma f_i = 50$ | 50/50 = 1,00 | |
| 29,994 | 29,910 | 30,021 | | | | | |
| 29,988 | 30,003 | 30,084 | | | | | |

Remarque : les valeurs des résultats de mesures sont classées par intervalles successifs de 0,030 mm à partir de 30 mm. Dix intervalles sont nécessaires pour couvrir l'ensemble des valeurs de la distribution.

b) Fréquence f_i : elle permet de chiffrer les densités de population, c'est-à-dire comment la population se répartit. Principe : il s'agit de regrouper les individus de même caractéristique, même mesure, même taille... Unités : nombre d'unités (nombre d'individus de même taille...) ou pourcentage (pourcentage des individus de même taille dans la population totale).



2. Histogramme des valeurs du tableau ci-dessus.

Définition pour un échantillon ou pour une population :

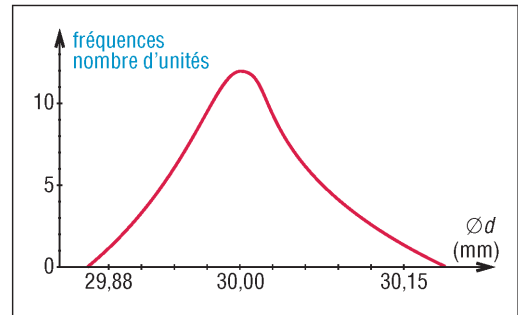
$$f_i = \text{fréquence en \%} = \frac{\text{nombre des mesures dans le même intervalle } i}{\text{nombre total des mesures ou observations}}$$

2. Courbes de fréquences de distribution

a) Fréquences de distribution

Si pour l'exemple précédent on augmente le nombre des mesures ou le nombre d'individus de l'échantillon, il devient possible de diminuer la largeur ou la taille des intervalles tout en augmentant leur nombre.

L'allure de la distribution peut ainsi devenir de plus en plus précise jusqu'à obtention d'une courbe continue et régulière, appelée courbe de fréquence de distributions ou courbe de densité de population (fig. 3).



3. Courbe de fréquence de distribution (tableau 2, page 465).

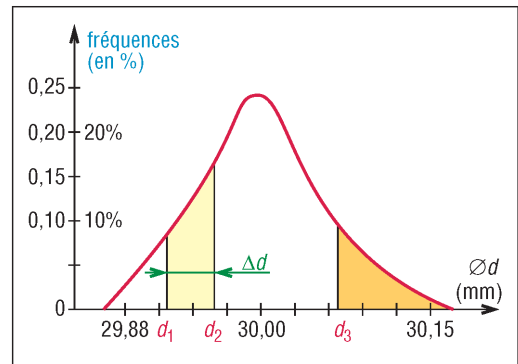
b) Fréquences de distribution pour estimation de probabilités

Si, toujours pour le même exemple, on exprime la fréquence en pourcentage du nombre total des observations, au lieu du nombre d'unités, on obtient une courbe permettant de faire des estimations de probabilité.

Propriétés : l'aire sous toute la courbe est égale à l'unité ou à 1 et représente la population totale soit 100 % (fig. 4).

L'aire colorée, limitée par la courbe et les verticales passant par d_1 et d_2 , représente le pourcentage de cylindres situé entre d_1 et d_2 .

De même, l'aire limitée par la courbe et par la verticale d_3 représente le pourcentage de cylindres dont le diamètre est supérieur à d_3 .



4. Fréquence de distribution en % (tableau 2, page 465).

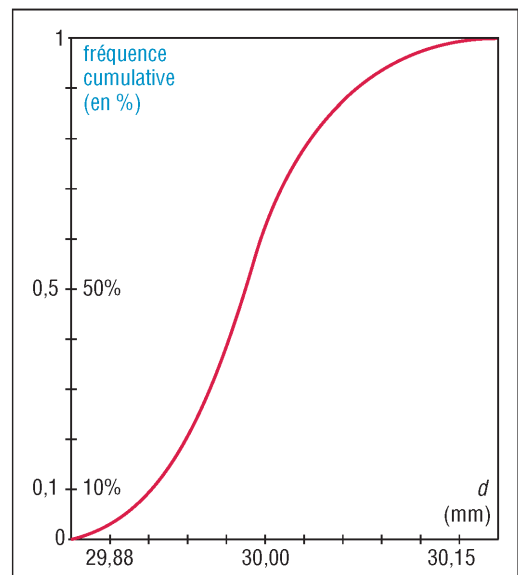
c) Fréquences de distribution cumulatives

C'est une autre manière de présenter des données. Les fréquences sont rassemblées de manière cumulative. À la fréquence obtenue normalement à chaque intervalle est ajoutée la somme de toutes les fréquences des intervalles immédiatement précédents (voir fig. 5 pour le cas de l'exemple précédent).

d) Courbes de fréquences usuelles

Un grand nombre de mesures ou d'observations statistiques suivent des densités de population ou des fréquences de distribution types (lois normale, binomiale, Poisson, exponentielle, lognormale, Weibull...).

Ces cas types permettent de faire rapidement, grâce à des formulaires, tables de valeurs ou logiciels, tous les calculs et estimations concernant les données collectées.



5. Courbe des fréquences cumulatives (tableau 2, page 465).

V - Moyenne arithmétique - Écart-type - Coefficient de dispersion

Les distributions sont le plus souvent caractérisées par une valeur moyenne, qui indique la valeur centrale de la répartition, et par une dispersion ou écart-type, qui précise comment les valeurs de la distribution s'étalent autour de la valeur moyenne.

| Symboles utilisés | échantillon | population |
|----------------------|-------------|------------|
| moyenne arithmétique | \bar{x} | μ |
| écart-type | S | σ |

1. Valeur moyenne arithmétique

Pour une population de n individus, elle est égale à la moyenne arithmétique de toutes les valeurs collectées.

$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Remarque : la définition est la même pour un échantillon de n individus (symbole \bar{x} à la place de μ).

Exemple : dans le cas des 50 diamètres du tableau des résultats des mesures, page 465, la valeur moyenne arithmétique est égale au diamètre moyen (d_m) de l'échantillon.

$$\bar{x} = d_m = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} x_i = 30,003 \text{ mm}$$

2. Écart-type et variance V

L'écart-type est de loin la plus importante mesure de dispersion ou d'étalement d'un ensemble de données statistiques.

a) Variance V, ou fluctuation : elle est définie comme le carré de l'écart-type ($V = S^2 = \sigma^2$). Pour une population de n individus de valeur moyenne μ :

$$V = \sigma^2 = \frac{(x_1 - \mu)^2 + (x_2 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \quad (\text{cas général})$$

$$V = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1} \quad \text{utilisable pour } n < 30 ; \text{ voir remarque}$$

$(x_i - \mu)$ = déviation de l'observation x_i par rapport à la valeur moyenne μ

b) Écart-type : il est égal à la racine carré de la variance.

$$\sigma = \sqrt{V} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (\text{cas général})$$

$$\sigma = \sqrt{V} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1} \right]^{1/2} \quad \text{utilisable pour } n < 30 ; \text{ voir remarque}$$

Remarques :

– La définition est la même pour un échantillon de n individus (symbole S à la place de σ).

Exemple : cas de l'échantillon des 50 diamètres du tableau, page 465.

$$S^2 = \frac{1}{50} \left[\sum (x_i - d_m)^2 \right] = \frac{1}{50} \left[\sum (x_i - 30,003)^2 \right] \approx 0,003 28$$

À titre de comparaison, la valeur moyenne de la population correspondante (les milliers de cylindres produits) est $\mu = 30,000$ et l'écart type $\sigma = 0,0570$ mm ($\sigma^2 = 0,003 25$).

– Pour les petites valeurs de n ($n < 30$), les statisticiens ont montré que l'utilisation de $n - 1$ à la place de n permet une meilleure estimation de la variance. Pour les grandes valeurs, l'utilisation de n ou $n - 1$ ne change rien. Pour $n = 30$, l'utilisation de n à la place de $n - 1$ entraîne une différence de 2 %.

– Pour des raisons de calculs, notamment avec les calculatrices de poche (avec touches ou fonctions : $\sum x$, $\sum x^2$, S_x , σ_x , $\sum y$, $\sum y^2$, S_y , $\sigma_y \dots$), la formule suivante est plus facile à exploiter.

$$S = \left[\frac{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{n(n-1)} \right]^{1/2}$$

3. Coefficient de dispersion C_x

Il est égal au rapport, ou quotient, de l'écart-type par la moyenne arithmétique. C'est un nombre souvent exprimé en pourcentage.

$$C_x = \frac{\sigma}{\mu}$$

VI - Loi normale ou distribution de Gauss

La distribution de Gauss est la distribution la plus connue et la plus utilisée. Un grand nombre de mesures et d'observations (mesures répétitives de longueurs et de diamètres, dispersions d'usinage, distributions de contraintes, contrôles de qualité, etc.) suivent son allure symétrique en forme de cloche.

1. Équation de la distribution - Forme $f(x)$

Elle donne la fréquence, la répartition ou la densité de la population.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot (2\pi)^{0,5}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left[\frac{x - \mu}{\sigma} \right]^2 \right]$$

$[-\infty < x < \infty]$

μ = moyenne arithmétique de la population

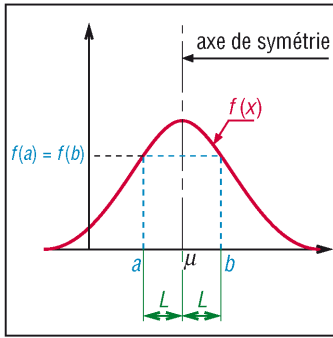
σ = écart-type de la population

Remarques :

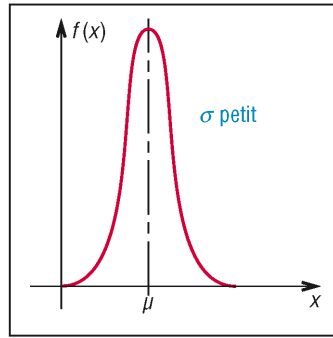
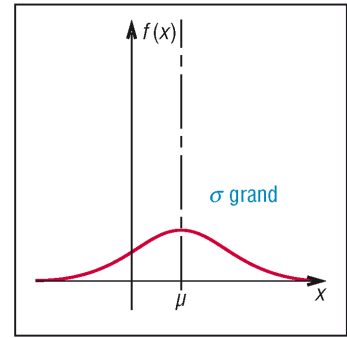
– La forme de la courbe dépend de la valeur des paramètres σ et μ .

– Elle est toujours symétrique par rapport à la valeur moyenne μ (fig. 6).

– L'étalement ou la dispersion de la courbe dépend de σ (fig. 7 et 8).



6. Symétrie de la loi normale.

7. Loi normale avec σ petit.8. Loi normale avec σ grand.

2. Équation $f(Z)$

Pour faire les estimations de probabilités, la distribution d'origine $f(x)$ doit être remplacée par $f(Z)$, fonction connue, tabulée et faisant intervenir les pourcentages de population. À cette fin, il faut utiliser le changement de variable ci-contre.

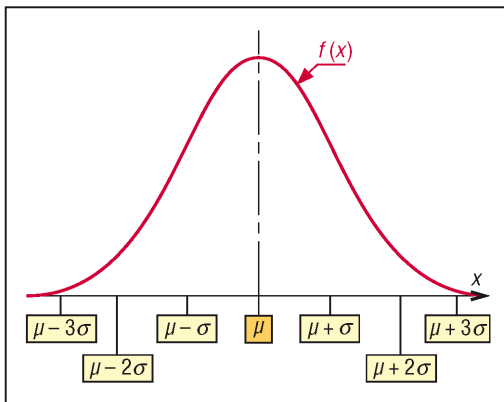
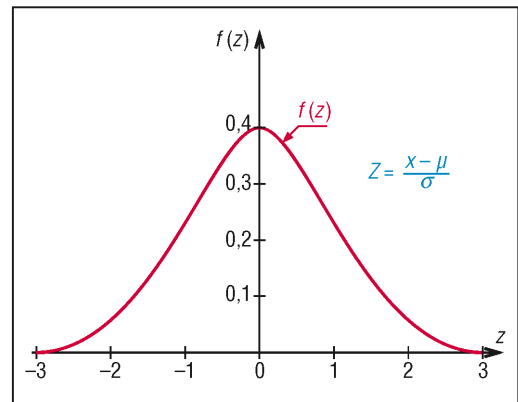
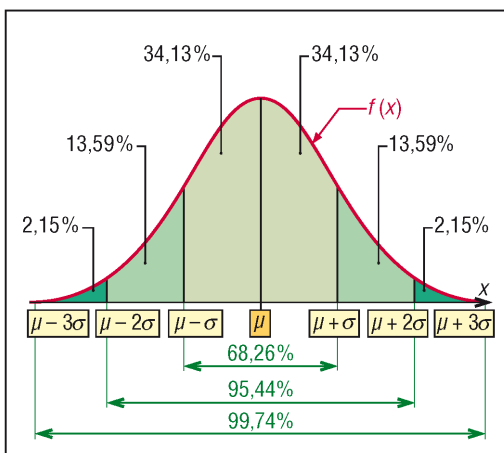
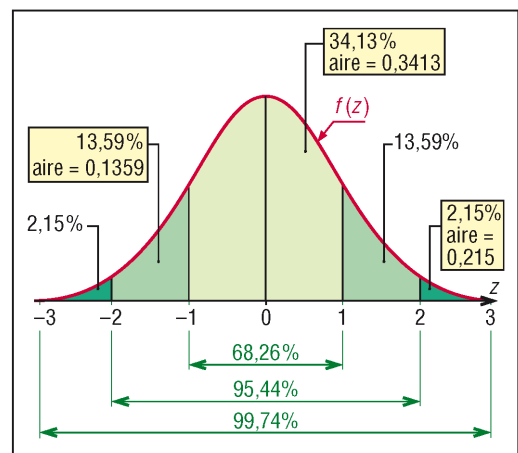
Distribution normale - Forme $f(Z)$

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad \text{et} \quad f(z) = \frac{1}{(2\pi)^{0.5}} \cdot \exp\left[-\frac{Z^2}{2}\right]$$

Propriétés : l'aire sous toute la courbe $f(Z)$ est égale à 1 (ou 100 %) et représente, en pourcentage, l'ensemble de la population.

Entre $Z = 0$ et $Z = 1$ sont rassemblés 34,13 % de la population (aire de 0,341 3), entre $Z = -3$ et $Z = 3$ (6 fois l'écart type σ) on trouve 99,74 % de la population (aire de 0,997 4).

Les proportions sont parfaitement identiques sous la courbe $f(x)$.

9. Loi normale distribution $f(x)$.10. Distribution $f(z)$ déduite de $f(x)$.11. Répartition de la population sous $f(x)$.12. Répartition de la population sous $f(z)$.

3. Fonction de probabilité cumulative $\phi(Z)$

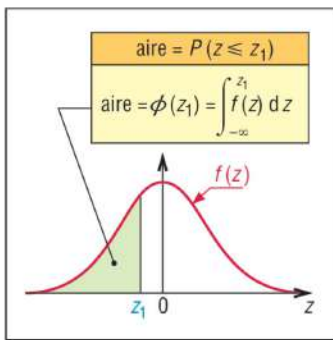
Pour calculer la valeur des aires sous la courbe $f(Z)$ (donc pour connaître les probabilités) on utilise la fonction $\phi(Z)$.

$\phi(Z)$ mesure l'aire ou le pourcentage de population sous la courbe $f(Z)$ située entre les valeurs négatives les plus éloignées ($-\infty$) et Z . Les valeurs de $\phi(Z)$ sont connues et tabulées (voir page 472).

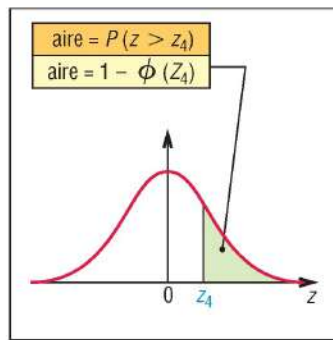
a) Probabilité d'avoir Z inférieure ou égale à une valeur donnée Z_1 [$P(Z \leq Z_1)$] : $\phi(Z_1)$ donne directement la probabilité cherchée en mesurant l'aire (ou le % de population) sous $f(Z)$ entre $-\infty$ et Z_1 (aire colorée fig. 13).

b) Probabilité d'avoir Z supérieure à une valeur donnée Z_4 [$P(Z > Z_4)$] : elle est donnée par $1 - \phi(Z_4)$ (aire colorée fig. 14). Dans la mesure où le graphe est symétrique : $1 - \phi(Z_4) = \phi(-Z_4)$

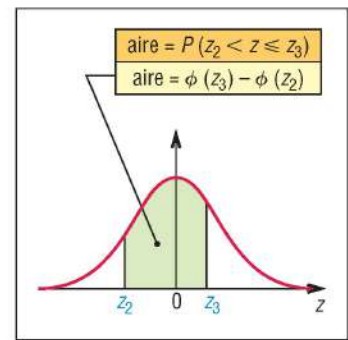
c) Probabilité d'avoir Z comprise entre deux valeurs données Z_2 et Z_3 [$P(Z_2 < Z \leq Z_3)$] : c'est la combinaison des deux cas précédents, obtenue en calculant $\phi(Z_3) - \phi(Z_2)$ (aire colorée fig. 15).



13. Probabilité d'avoir Z inférieur à Z_1 .



14. Probabilité d'avoir Z supérieur à Z_4 .



15. Probabilité d'avoir $Z_2 < Z \leq Z_3$.

| Valeurs typiques de $f(Z)$ et $\phi(Z)$ | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Z | -3 | -2 | -1 | -0,5 | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 3 |
| $f(Z)$ | 0,004 | 0,054 | 0,242 | 0,352 | 0,399 | 0,352 | 0,242 | 0,054 | 0,004 |
| $\phi(Z)$ | 0,0013 | 0,0228 | 0,1587 | 0,3085 | 0,5 | 0,6915 | 0,8413 | 0,9772 | 0,9987 |
| % population | 0,13 | 2,28 | 15,87 | 30,85 | 50 | 69,15 | 84,13 | 97,72 | 99,87 |
| % population | 0,1 | 0,5 | 1 | 2,5 | 5 | 95 | 97,5 | 99 | 99,5 |
| Z | -3,090 | -2,576 | -2,326 | -1,960 | -1,645 | 1,645 | 1,960 | 2,326 | 2,576 |
| $\phi(Z)$ | 0,001 | 0,005 | 0,010 | 0,025 | 0,050 | 0,950 | 0,975 | 0,990 | 0,995 |

d) Exemple : l'échantillon des 50 diamètres du tableau paragraphe IV.1 est supposé suivre la loi normale avec $\mu = 30,00$ mm et un écart type $\sigma = 0,057$ mm.

1) Probabilité d'avoir $d \leq 30,10$ mm (fig. 13)

à $d = 30,1$ correspond $Z_1 = (30,1 - 30,00)/0,057 = 1,755$

$P(d \leq 30,10) = \phi(Z_1) = \phi(1,755)$

$= [\phi(1,75) + \phi(1,760)]/2$ (tableau p. 472)

$= (0,9599 + 0,9608)/2 \approx 0,9604$ ($\approx 96\%$ des diamètres)

2) Probabilité d'avoir $d > 29,95$ mm (fig. 14)

à $d = 29,95$ correspond $Z_4 = (29,95 - 30,00)/0,057 = -0,877$

$P(d \leq 29,95) = \phi(Z_4) = 0,1916$

$P(d > 29,95) = 1 - P(d \leq 29,95) = 1 - \phi(Z_4)$

$= 1 - 0,1916 = 0,8084$ ($\approx 81\%$)

3) Probabilité d'avoir $29,95 < d \leq 30,05$ (fig. 15)

$$Z_2 = Z_4 = -0,877 \text{ et } \phi(Z_2) = 0,1916$$

Z_3 est symétrique de Z_2 par rapport μ (30,00)

$$\text{d'où } Z_3 = -Z_2 = 0,877 \text{ et } \phi(Z_3) = 1 - \phi(Z_2).$$

$$P(29,95 < d \leq 30,05) = \phi(Z_3) - \phi(Z_2) = 1 - \phi(Z_2) - \phi(Z_2)$$

$$= 1 - 2\phi(Z_2) = 1 - 2 \cdot 0,1916 = 0,6168 \text{ (} \approx 62 \% \text{ des diamètres)}$$

4. Méthode pour vérifier qu'un ensemble de données suit la loi normale

La méthode la plus pratique consiste à utiliser un logiciel ou un graphe prévu pour cet usage. En ordonnée on porte la probabilité cumulée (échelle logarithmique) et en abscisse la variable x (échelle arithmétique).

a) Méthode : exemple fig. 16.

Calculer la moyenne arithmétique et l'écart-type de l'ensemble des données.

Tracer le point A correspondant à la moyenne (probabilité $P = 0,5$).

Tracer le point B correspondant à la moyenne plus l'écart-type ; la probabilité (cumulative) de ce cas est $P = 0,84$.

Tracer la droite AB passant par les deux points. Elle servira de référence.

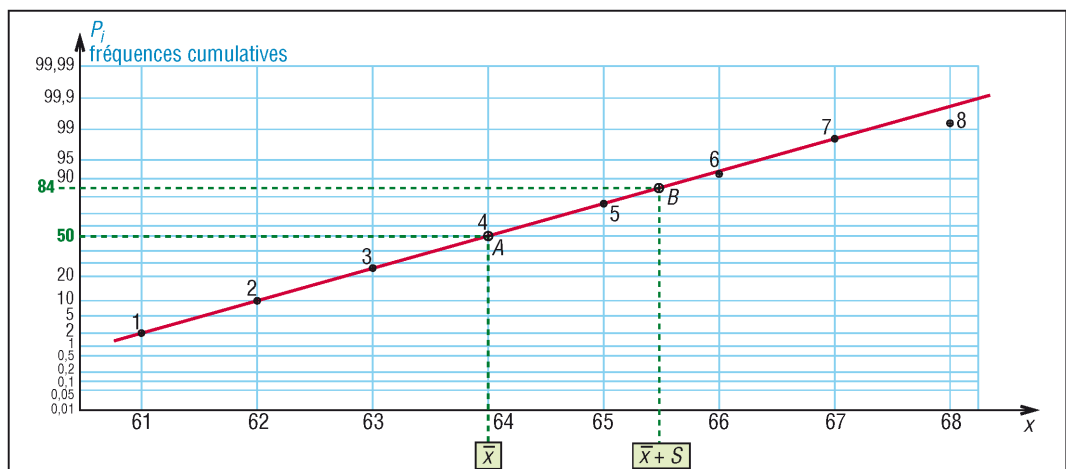
Tracer les autres points sachant que pour chacun :

$$\text{probabilité } P_i = \frac{f_{ci}}{n+1} = \frac{\text{fréquences cumulées jusqu'au point } i}{\text{nombre total des valeurs} + 1}$$

Si les points restent proches de la droite de référence AB , alors la distribution étudiée suit la loi normale.

b) Exemple : prélèvement d'un échantillon de 89 objets dans une production dont on contrôle périodiquement la masse, en grammes.

| Données échantillon : $n = 89$; $S = 1,52$ g ; masse moyenne 63,95 g | | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| intervalles des valeurs : de à (non inclus) | 60 61 | 61 62 | 62 63 | 63 64 | 64 65 | 65 66 | 66 67 | 67 68 |
| fréquences f_i (nbre d'unités) | 2 | 7 | 15 | 21 | 22 | 15 | 5 | 2 |
| fréquences cumulées f_{ci} | 2 | 9 | 24 | 45 | 67 | 82 | 87 | 89 |
| $P_i = \frac{f_{ci}}{n+1}$ | 0,022 2 | 0,100 | 0,266 | 0,500 | 0,744 | 0,911 | 0,967 | 0,989 |
| numéro du point (fig. 16) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |



16. Exemple de graphe permettant de vérifier qu'un ensemble de données suit la loi normale.

| Loi normale (Gauss) - Distribution ou probabilité cumulative - Fonction $\phi(Z)$ | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Z | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| -6 | 0,0 ⁹ 987 | 0,0 ⁹ 530 | 0,0 ⁹ 282 | 0,0 ⁹ 149 | 0,0 ⁹ 78 | 0,0 ⁹ 40 | 0,0 ⁹ 21 | 0,0 ⁹ 10 | 0,0 ⁹ 152 | 0,0 ⁹ 126 |
| -5 | 0,0 ⁸ 287 | 0,0 ⁸ 170 | 0,0 ⁸ 996 | 0,0 ⁸ 733 | 0,0 ⁸ 579 | 0,0 ⁸ 433 | 0,0 ⁸ 310 | 0,0 ⁸ 210 | 0,0 ⁸ 132 | 0,0 ⁸ 82 |
| -4 | 0,0 ⁷ 317 | 0,0 ⁷ 207 | 0,0 ⁷ 133 | 0,0 ⁷ 854 | 0,0 ⁷ 541 | 0,0 ⁷ 340 | 0,0 ⁷ 211 | 0,0 ⁷ 130 | 0,0 ⁷ 793 | 0,0 ⁷ 479 |
| -3 | 0,00135 | 0,0 ⁰ 968 | 0,0 ⁰ 687 | 0,0 ⁰ 483 | 0,0 ⁰ 337 | 0,0 ⁰ 233 | 0,0 ⁰ 159 | 0,0 ⁰ 108 | 0,0 ⁰ 723 | 0,0 ⁰ 481 |
| Z | 0,0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
| -3,5 | 0,00023 | 0,00022 | 0,00022 | 0,00021 | 0,00020 | 0,00019 | 0,00019 | 0,00018 | 0,00017 | 0,00017 |
| -3,4 | 0,00034 | 0,00033 | 0,00031 | 0,00030 | 0,00029 | 0,00028 | 0,00027 | 0,00026 | 0,00025 | 0,00024 |
| -3,3 | 0,00048 | 0,00047 | 0,00045 | 0,00043 | 0,00042 | 0,00040 | 0,00039 | 0,00038 | 0,00036 | 0,00035 |
| -3,2 | 0,00069 | 0,00066 | 0,00064 | 0,00062 | 0,00060 | 0,00058 | 0,00056 | 0,00054 | 0,00052 | 0,00050 |
| -3,1 | 0,00097 | 0,00094 | 0,00090 | 0,00087 | 0,00085 | 0,00082 | 0,00079 | 0,00076 | 0,00074 | 0,00071 |
| -3,0 | 0,00135 | 0,00131 | 0,00126 | 0,00122 | 0,00118 | 0,00114 | 0,00111 | 0,00107 | 0,00104 | 0,00100 |
| -2,9 | 0,0019 | 0,0018 | 0,0017 | 0,0017 | 0,0016 | 0,0016 | 0,0015 | 0,0015 | 0,0014 | 0,0014 |
| -2,8 | 0,0026 | 0,0025 | 0,0024 | 0,0023 | 0,0023 | 0,0022 | 0,0021 | 0,0021 | 0,0020 | 0,0019 |
| -2,7 | 0,0035 | 0,0034 | 0,0033 | 0,0032 | 0,0031 | 0,0030 | 0,0029 | 0,0028 | 0,0027 | 0,0026 |
| -2,6 | 0,0047 | 0,0045 | 0,0044 | 0,0043 | 0,0041 | 0,0040 | 0,0039 | 0,0038 | 0,0037 | 0,0036 |
| -2,5 | 0,0062 | 0,0060 | 0,0059 | 0,0057 | 0,0055 | 0,0054 | 0,0052 | 0,0051 | 0,0049 | 0,0048 |
| -2,4 | 0,0082 | 0,0080 | 0,0078 | 0,0075 | 0,0073 | 0,0071 | 0,0069 | 0,0068 | 0,0066 | 0,0064 |
| -2,3 | 0,0107 | 0,0104 | 0,0102 | 0,0099 | 0,0096 | 0,0094 | 0,0091 | 0,0089 | 0,0087 | 0,0084 |
| -2,2 | 0,0139 | 0,0136 | 0,0132 | 0,0129 | 0,0125 | 0,0122 | 0,0119 | 0,0116 | 0,0113 | 0,0110 |
| -2,1 | 0,0179 | 0,0174 | 0,0170 | 0,0166 | 0,0162 | 0,0158 | 0,0154 | 0,0150 | 0,0146 | 0,0143 |
| -2,0 | 0,0228 | 0,0222 | 0,0217 | 0,0212 | 0,0207 | 0,0202 | 0,0197 | 0,0192 | 0,0188 | 0,0183 |
| -1,9 | 0,0287 | 0,0281 | 0,0274 | 0,0268 | 0,0262 | 0,0256 | 0,0250 | 0,0244 | 0,0239 | 0,0233 |
| -1,8 | 0,0359 | 0,0351 | 0,0344 | 0,0336 | 0,0329 | 0,0322 | 0,0314 | 0,0307 | 0,0301 | 0,0294 |
| -1,7 | 0,0446 | 0,0436 | 0,0427 | 0,0418 | 0,0409 | 0,0401 | 0,0392 | 0,0384 | 0,0375 | 0,0367 |
| -1,6 | 0,0548 | 0,0537 | 0,0526 | 0,0516 | 0,0505 | 0,0495 | 0,0485 | 0,0475 | 0,0465 | 0,0455 |
| -1,5 | 0,0668 | 0,0655 | 0,0643 | 0,0630 | 0,0618 | 0,0606 | 0,0594 | 0,0582 | 0,0571 | 0,0559 |
| -1,4 | 0,0808 | 0,0793 | 0,0778 | 0,0764 | 0,0749 | 0,0735 | 0,0721 | 0,0708 | 0,0694 | 0,0681 |
| -1,3 | 0,0968 | 0,0951 | 0,0934 | 0,0918 | 0,0901 | 0,0885 | 0,0869 | 0,0853 | 0,0838 | 0,0823 |
| -1,2 | 0,1151 | 0,1131 | 0,1112 | 0,1093 | 0,1075 | 0,1057 | 0,1038 | 0,1020 | 0,1003 | 0,0985 |
| -1,1 | 0,1357 | 0,1335 | 0,1314 | 0,1292 | 0,1271 | 0,1251 | 0,1230 | 0,1210 | 0,1190 | 0,1170 |
| -1,0 | 0,1587 | 0,1562 | 0,1539 | 0,1515 | 0,1492 | 0,1469 | 0,1446 | 0,1423 | 0,1401 | 0,1379 |
| -0,9 | 0,1841 | 0,1814 | 0,1788 | 0,1762 | 0,1736 | 0,1711 | 0,1685 | 0,1660 | 0,1635 | 0,1611 |
| -0,8 | 0,2119 | 0,2090 | 0,2061 | 0,2033 | 0,2005 | 0,1977 | 0,1949 | 0,1922 | 0,1894 | 0,1867 |
| -0,7 | 0,2420 | 0,2389 | 0,2358 | 0,2327 | 0,2297 | 0,2266 | 0,2236 | 0,2207 | 0,2177 | 0,2148 |
| -0,6 | 0,2743 | 0,2709 | 0,2676 | 0,2643 | 0,2611 | 0,2578 | 0,2546 | 0,2514 | 0,2483 | 0,2451 |
| -0,5 | 0,3085 | 0,3050 | 0,3015 | 0,2981 | 0,2946 | 0,2912 | 0,2877 | 0,2843 | 0,2810 | 0,2776 |
| -0,4 | 0,3446 | 0,3409 | 0,3372 | 0,3336 | 0,3300 | 0,3264 | 0,3228 | 0,3192 | 0,3156 | 0,3121 |
| -0,3 | 0,3821 | 0,3783 | 0,3745 | 0,3707 | 0,3669 | 0,3632 | 0,3594 | 0,3557 | 0,3520 | 0,3483 |
| -0,2 | 0,4207 | 0,4168 | 0,4129 | 0,4090 | 0,4052 | 0,4013 | 0,3974 | 0,3936 | 0,3897 | 0,3859 |
| -0,1 | 0,4602 | 0,4562 | 0,4522 | 0,4483 | 0,4443 | 0,4404 | 0,4364 | 0,4325 | 0,4286 | 0,4247 |
| -0,0 | 0,5000 | 0,4960 | 0,4920 | 0,4880 | 0,4840 | 0,4801 | 0,4761 | 0,4721 | 0,4681 | 0,4641 |
| Z | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
| +0,0 | 0,5000 | 0,5040 | 0,5080 | 0,5120 | 0,5160 | 0,5199 | 0,5239 | 0,5279 | 0,5319 | 0,5359 |
| +0,1 | 0,5398 | 0,5438 | 0,5478 | 0,5517 | 0,5557 | 0,5596 | 0,5636 | 0,5675 | 0,5714 | 0,5753 |
| +0,2 | 0,5793 | 0,5832 | 0,5871 | 0,5910 | 0,5948 | 0,5987 | 0,6026 | 0,6064 | 0,6103 | 0,6141 |
| +0,3 | 0,6179 | 0,6217 | 0,6255 | 0,6293 | 0,6331 | 0,6368 | 0,6406 | 0,6443 | 0,6480 | 0,6517 |
| +0,4 | 0,6554 | 0,6591 | 0,6628 | 0,6664 | 0,6700 | 0,6736 | 0,6672 | 0,6808 | 0,6844 | 0,6879 |
| +0,5 | 0,6915 | 0,6950 | 0,6985 | 0,7019 | 0,7054 | 0,7088 | 0,7123 | 0,7157 | 0,7190 | 0,7224 |
| +0,6 | 0,7257 | 0,7291 | 0,7324 | 0,7357 | 0,7389 | 0,7422 | 0,7454 | 0,7486 | 0,7517 | 0,7549 |
| +0,7 | 0,7580 | 0,7611 | 0,7642 | 0,7673 | 0,7704 | 0,7734 | 0,7764 | 0,7794 | 0,7823 | 0,7852 |
| +0,8 | 0,7881 | 0,7910 | 0,7939 | 0,7967 | 0,7995 | 0,8023 | 0,8051 | 0,8079 | 0,8106 | 0,8133 |
| +0,9 | 0,8159 | 0,8186 | 0,8212 | 0,8238 | 0,8264 | 0,8289 | 0,8315 | 0,8340 | 0,8365 | 0,8389 |
| +1,0 | 0,8413 | 0,8438 | 0,8461 | 0,8485 | 0,8508 | 0,8531 | 0,8554 | 0,8577 | 0,8599 | 0,8621 |
| +1,1 | 0,8643 | 0,8665 | 0,8686 | 0,8708 | 0,8729 | 0,8749 | 0,8770 | 0,8790 | 0,8810 | 0,8830 |
| +1,2 | 0,8849 | 0,8869 | 0,8888 | 0,8907 | 0,8925 | 0,8944 | 0,8962 | 0,8980 | 0,8997 | 0,9015 |
| +1,3 | 0,9032 | 0,9049 | 0,9066 | 0,9082 | 0,9099 | 0,9115 | 0,9131 | 0,9147 | 0,9162 | 0,9177 |
| +1,4 | 0,9192 | 0,9207 | 0,9222 | 0,9236 | 0,9251 | 0,9265 | 0,9279 | 0,9292 | 0,9306 | 0,9319 |
| +1,5 | 0,9332 | 0,9345 | 0,9357 | 0,9370 | 0,9382 | 0,9394 | 0,9406 | 0,9418 | 0,9429 | 0,9441 |
| +1,6 | 0,9452 | 0,9463 | 0,9474 | 0,9484 | 0,9495 | 0,9505 | 0,9515 | 0,9525 | 0,9535 | 0,9545 |
| +1,7 | 0,9554 | 0,9564 | 0,9573 | 0,9582 | 0,9591 | 0,9599 | 0,9608 | 0,9616 | 0,9625 | 0,9633 |
| +1,8 | 0,9641 | 0,9649 | 0,9656 | 0,9664 | 0,9671 | 0,9678 | 0,9686 | 0,9693 | 0,9699 | 0,9706 |
| +1,9 | 0,9713 | 0,9719 | 0,9726 | 0,9732 | 0,9738 | 0,9744 | 0,9750 | 0,9756 | 0,9761 | 0,9767 |
| +2,0 | 0,9773 | 0,9778 | 0,9783 | 0,9788 | 0,9793 | 0,9798 | 0,9803 | 0,9808 | 0,9812 | 0,9817 |
| +2,1 | 0,9821 | 0,9826 | 0,9830 | 0,9834 | 0,9838 | 0,9842 | 0,9846 | 0,9850 | 0,9854 | 0,9857 |
| +2,2 | 0,9861 | 0,9864 | 0,9868 | 0,9871 | 0,9875 | 0,9878 | 0,9881 | 0,9884 | 0,9887 | 0,9890 |
| +2,3 | 0,9893 | 0,9896 | 0,9898 | 0,9901 | 0,9904 | 0,9906 | 0,9909 | 0,9911 | 0,9913 | 0,9916 |
| +2,4 | 0,9918 | 0,9920 | 0,9922 | 0,9925 | 0,9927 | 0,9929 | 0,9931 | 0,9932 | 0,9934 | 0,9936 |
| +2,5 | 0,9938 | 0,9940 | 0,9941 | 0,9943 | 0,9945 | 0,9946 | 0,9948 | 0,9949 | 0,9951 | 0,9952 |
| +2,6 | 0,9953 | 0,9955 | 0,9956 | 0,9957 | 0,9959 | 0,9960 | 0,9961 | 0,9962 | 0,9963 | 0,9964 |
| +2,7 | 0,9965 | 0,9966 | 0,9967 | 0,9968 | 0,9969 | 0,9970 | 0,9971 | 0,9972 | 0,9973 | 0,9974 |
| +2,8 | 0,9974 | 0,9975 | 0,9976 | 0,9977 | 0,9977 | 0,9978 | 0,9979 | 0,9979 | 0,9980 | 0,9981 |
| +2,9 | 0,9981 | 0,9982 | 0,9983 | 0,9983 | 0,9984 | 0,9984 | 0,9985 | 0,9985 | 0,9986 | 0,9986 |
| +3,0 | 0,99865 | 0,99869 | 0,99874 | 0,99878 | 0,99882 | 0,99886 | 0,99889 | 0,99893 | 0,99896 | 0,99900 |
| +3,1 | 0,99903 | 0,99906 | 0,99910 | 0,99913 | 0,99915 | 0,99918 | 0,99921 | 0,99924 | 0,99926 | 0,99929 |
| +3,2 | 0,99931 | 0,99934 | 0,99936 | 0,99938 | 0,99940 | 0,99942 | 0,99944 | 0,99946 | 0,99948 | 0,99950 |
| +3,3 | 0,99952 | 0,99953 | 0,99955 | 0,99957 | 0,99958 | 0,99960 | 0,99961 | 0,99962 | 0,99964 | 0,99965 |
| +3,4 | 0,99966 | 0,99967 | 0,99969 | 0,99970 | 0,99971 | 0,99972 | 0,99973 | 0,99974 | 0,99975 | 0,99976 |
| +3,5 | 0,99977 | 0,99978 | 0,99978 | 0,99979 | 0,99980 | 0,99981 | 0,99981 | 0,99982 | 0,99983 | 0,99983 |

VII - Distribution binomiale

Utilisée avec des variables discrètes, non continues, la loi binomiale est souvent employée en contrôle de qualité lorsque la taille de la population est grande comparativement à celle de l'échantillon.

1. Équation de la distribution (fréquence ou densité de population)

En faisant n tentatives ou essais, la probabilité d'avoir exactement x chances ou succès ($x = 0, 1, 2, \dots$ ou n), pour un événement dont la probabilité de se produire est p (p étant constante), est donnée par :

$$P(x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x}$$

avec $0 \leq x \leq n$

| valeur moyenne | écart-type |
|-----------------------------------|---|
| $\bar{x} = n \cdot p$ (ou μ) | $S = [n \cdot p(1-p)]^{0,5}$ (ou σ) |

Remarques :

Il y a n tentatives ou essais.

Les essais répétés sont indépendants les uns des autres.

Chaque essai a seulement deux résultats possibles : succès ou échec, bon ou mauvais...

La probabilité p de l'événement reste constante d'essai en essai ; elle n'est pas conditionnée par l'essai précédent. $(1-p)$ représente la probabilité contraire.

Exemple : au jeu pile ou face, quelle est la probabilité d'avoir 3 fois le côté face en lançant 5 fois la pièce ?

$p = 0,5$ (on a une chance sur deux d'avoir le côté face à chaque lancer)

$x = 3$ (on veut avoir trois fois le côté face)

$n = 5$ (5 tentatives car on lance 5 fois la pièce)

$$P(3) = \frac{5!}{3!(5-3)!} \cdot 0,5^3 \cdot (1-0,5)^{5-3}$$

$$= 10 \cdot 0,03125 = 0,3125 \quad (31,25 \% \text{ de chances})$$

La probabilité d'avoir 2 fois le côté face est $P(2) = P(3) = 0,3125$.

2. Allure de la distribution binomiale

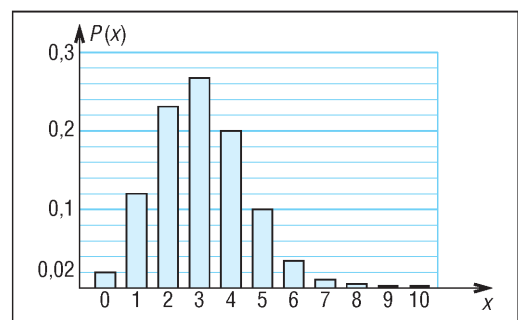
Exemple :

cas $n = 10$ avec $p = 0,3$ ($1-p = 0,7$). Les valeurs de la distribution sont indiquées ci-dessous (allure fig. 17).

La somme de toutes les valeurs $P(x)$ du tableau ($0,0282 + 0,1211 + \dots$) est égale à 1.

Écart-type : $\sigma = [10 \cdot 0,3 \cdot 0,7]^{0,5} = 1,449$

Moyenne : $np = 10 \cdot 0,3 = 3$



17. Distribution de la loi binomiale avec $n = 10$ et $p = 0,3$.

| x | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| $P(x)$ | 0,028 2 | 0,121 1 | 0,233 5 | 0,266 8 | 0,200 1 | 0,102 9 | 0,036 8 | 0,009 0 | 0,001 4 | 0,000 1 | ≈ 0 |

3. Approximation de la loi binomiale par la loi normale

La loi normale présente l'avantage de n'avoir qu'un paramètre et d'être tabulée (tableau p. 472).

L'approximation est bonne si $n.p > 10$ et $p < 0,5$.
La précision est acceptable si $0,1 \leq p \leq 0,9$.

Exemple : un grossiste en fruits reçoit 3 200 melons dont 22 % ne sont pas encore mûrs. Les melons sont répartis dans des caisses pouvant contenir 50 melons. Quelle est la probabilité d'avoir de 10 à 13 melons non mûrs par caisse ?

Chaque caisse représente un échantillon de 50 melons. On peut selon les cas avoir 10, 11, 12 ou 13 melons non mûrs par caisse (4 cas possibles accumulés).

1) Avec la loi binomiale ($n = 50$; $p = 0,22$; $1 - p = 0,78$) on obtient :

$$P(10 \leq x \leq 13) = P(10) + P(11) + P(12) + P(13) = \sum_{i=10}^{13} \frac{50!}{x!(50-x)!} \cdot 0,22^x \cdot 0,78^{50-x}$$

$$= 0,1317 + 0,1351 + 0,1238 + 0,1021 = 0,4917$$

2) Avec la loi normale ($np = 50 \cdot 0,22 = 11$) :

$$\text{Écart-type} = [np(1-p)]^{0,5} = [50 \cdot 0,22 \cdot 0,78]^{0,5} = 2,929$$

$$\text{Moyenne} = np = 11$$

$$P(10 \leq x \leq 13) = \Phi\left(\frac{(13 + 0,5) - 11}{2,929}\right) - \Phi\left(\frac{(10 - 0,5) - 11}{2,929}\right)$$

$$= \Phi(0,853) - \Phi(-0,512) = 0,8031 - 0,3043$$

$$= 0,4988 \text{ (49,88 \% , résultat très proche du précédent)}$$

Remarque : les valeurs de 0,5 ajoutées à 13 et retranchées à 10 permettent de faire les corrections nécessaires de continuité entre intervalles.

Forme générale des corrections de continuité

$$\text{avec } \mu = np \text{ et } \sigma = [np(1-p)]^{0,5}$$

$$P(a) = \Phi\left(\frac{(a + 0,5) - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{(a - 0,5) - \mu}{\sigma}\right)$$

$$P(a \leq x \leq b) = \Phi\left(\frac{(b + 0,5) - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{(a - 0,5) - \mu}{\sigma}\right)$$

VIII - Loi ou distribution de Poisson

C'est l'une des distributions les plus utilisées avec les variables discrètes (non continues). Elle est souvent utilisée comme approximation de la loi binomiale lorsque n est grand et p petit. Principal avantage : un seul paramètre (μ) qui la rend facilement tabulable et exploitable (voir tableau p. 476).

1. Caractéristiques de la distribution

n est le nombre de tentatives, x le nombre de chances ou de succès, p la probabilité de l'événement et $\mu = np$ le paramètre.

Exemple 1 : des échantillons de 100 objets sont régulièrement prélevés dans une production pour passer un contrôle final de qualité. La moyenne des défauts est de 2 %. Quelle est la probabilité d'avoir 3 défauts dans l'un des échantillons ?

| Équation générale [0 ≤ x ≤ ∞] (densité de population) | Valeur moyenne | Écart-type |
|---|----------------|--|
| $P(x) = \frac{\mu^x \cdot e^{-\mu}}{x!}$ | $\mu = n.p$ | $\sigma = \mu^{0,5}$ $\sigma = [n.p]^{0,5}$ |

$$n = 100 ; p = 0,02 ; \mu = np = 2 \text{ et } x = 3$$

$$P(3) = \frac{2^3 \cdot e^{-2}}{3!} = 0,1804 \text{ (soit } 18,04 \%)$$

$$\text{Avec le tableau page 476 : } (\mu = 2) : P(3) = P_c(3) - P_c(2) = 0,857 - 0,677 = 0,180$$

Exemple 2 : le nombre des défauts concernant les connexions des composants d'une carte électronique suit la loi de Poisson avec $\mu = 2$. Quelle est la probabilité qu'une carte prise au hasard puisse avoir deux défauts ou moins ?

Une carte peut avoir 0, 1 ou 2 défauts, les trois cas s'accumulent.

$$P(x \leq 2) = P(0) + P(1) + P(2)$$

$$= \frac{2^0 \cdot e^{-2}}{0!} + \frac{2^1 \cdot e^{-2}}{1!} + \frac{2^2 \cdot e^{-2}}{2!}$$

$$= 0,1353 + 0,2707 + 0,2707 = 0,6766 \text{ (67,66\%)}$$

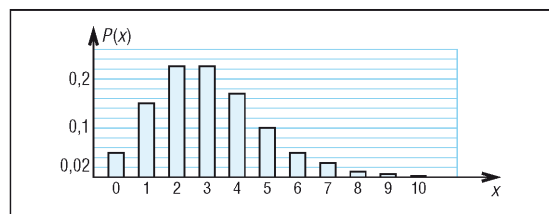
$$\text{Avec le tableau page 476, } (\mu = 2 \text{ et } x = 2) : P(x \leq 2) = P_c(2) = 0,677$$

2. Allure de la distribution de Poisson

Exemple : allure de la distribution pour $\mu = 3$. À noter pour la figure 18 la forme dissymétrique avec une sorte de queue sur la droite.

| Valeurs de la distribution de Poisson pour $\mu = 3$ | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| x | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| P(x) | 0,050 | 0,149 | 0,224 | 0,224 | 0,168 | 0,101 | 0,050 | 0,022 | 0,008 | 0,003 | 0,001 |

Remarque : aux grandes valeurs de μ ($\mu \geq 10$) la distribution devient symétrique et semblable à la loi normale. Pour ces valeurs, la distribution de Poisson est souvent approximée par la loi normale.



18. Distribution de la loi de Poisson.

3. Approximation de la loi de Poisson par la loi normale ($\mu \geq 10$)

Exemple : le nombre d'ouragans par an dans certains départements français d'outre mer suit la loi de Poisson avec pour moyenne $\mu = 12$. Quelle est la probabilité d'avoir entre 10 et 14 ouragans dans l'année ?

1) Par la loi de Poisson et en utilisant le tableau page 476

($\mu = 12$) :

$$P(10 \leq x \leq 14) = P_c(14) - P_c(9) = 0,772 - 0,242 = 0,530 \text{ (53,0 \% de chances)}$$

2) À partir de la loi normale

$$\mu = np = 12 ; \sigma = [np]^{1/2} = [12]^{1/2} = 3,464$$

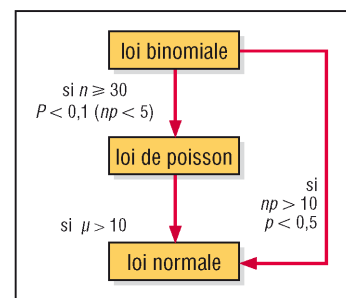
En tenant compte de la continuité (0,5 ajouté à 14 et 0,5 retranché à 10)

$$P(10 \leq x \leq 14) = \Phi\left(\frac{(14 + 0,5) - 12}{3,464}\right) - \Phi\left(\frac{(10 - 0,5) - 12}{3,464}\right)$$

$$= \Phi(0,7217) - \Phi(-0,7217)$$

$$= 0,7647 - 0,2353 = 0,530 \text{ (53,0 \% de chances)}$$

(même résultat que précédemment)

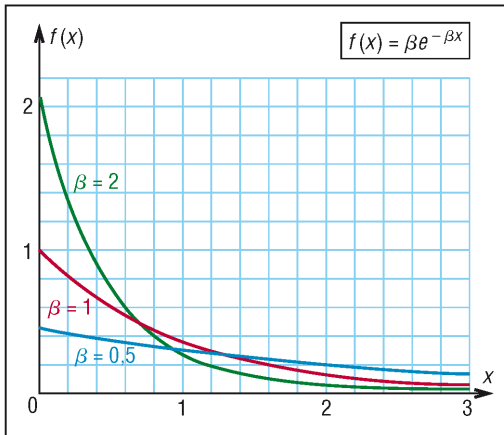
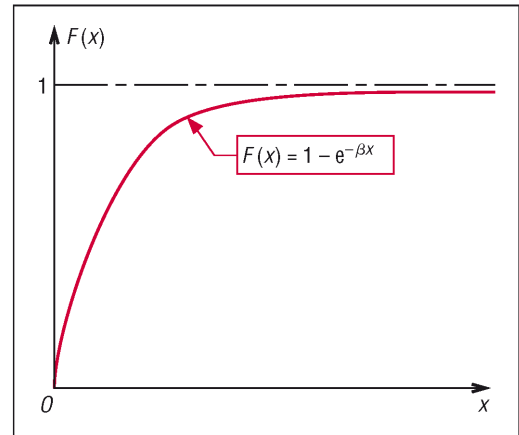


19. Approximation entre les lois...

| Valeurs cumulatives $P_c(x)$ de la distribution de Poisson | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| X | μ | 0,01 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 0 | | 0,990 | 0,951 | 0,905 | 0,819 | 0,741 | 0,670 | 0,607 | 0,549 | 0,497 | 0,449 | 0,407 |
| 1 | | 1,000 | 0,999 | 0,995 | 0,982 | 0,963 | 0,938 | 0,910 | 0,878 | 0,844 | 0,809 | 0,772 |
| 2 | | | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,996 | 0,992 | 0,986 | 0,977 | 0,966 | 0,953 | 0,937 |
| 3 | | | | | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,998 | 0,997 | 0,994 | 0,991 | 0,987 |
| 4 | | | | | | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,998 |
| 5 | | | | | | | | | | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0 | μ | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 |
| 0 | | 0,368 | 0,333 | 0,301 | 0,273 | 0,247 | 0,223 | 0,202 | 0,183 | 0,165 | 0,150 | 0,135 |
| 1 | | 0,736 | 0,699 | 0,663 | 0,627 | 0,592 | 0,558 | 0,525 | 0,493 | 0,463 | 0,434 | 0,406 |
| 2 | | 0,920 | 0,900 | 0,879 | 0,857 | 0,833 | 0,809 | 0,783 | 0,757 | 0,731 | 0,704 | 0,677 |
| 3 | | 0,981 | 0,974 | 0,966 | 0,957 | 0,946 | 0,934 | 0,921 | 0,907 | 0,891 | 0,875 | 0,857 |
| 4 | | 0,996 | 0,995 | 0,992 | 0,989 | 0,986 | 0,981 | 0,976 | 0,970 | 0,964 | 0,956 | 0,947 |
| 5 | | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 0,998 | 0,997 | 0,996 | 0,994 | 0,992 | 0,990 | 0,987 | 0,983 |
| 6 | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 0,997 | 0,997 | 0,995 |
| 7 | | | | | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| 8 | | | | | | | | | | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0 | μ | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 3,0 | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 3,8 | 4,0 | 4,2 |
| 0 | | 0,111 | 0,091 | 0,074 | 0,061 | 0,050 | 0,041 | 0,033 | 0,027 | 0,022 | 0,018 | 0,015 |
| 1 | | 0,355 | 0,308 | 0,267 | 0,231 | 0,199 | 0,171 | 0,147 | 0,126 | 0,107 | 0,092 | 0,078 |
| 2 | | 0,623 | 0,570 | 0,518 | 0,469 | 0,423 | 0,380 | 0,340 | 0,303 | 0,269 | 0,238 | 0,210 |
| 3 | | 0,819 | 0,779 | 0,736 | 0,692 | 0,647 | 0,603 | 0,558 | 0,515 | 0,473 | 0,433 | 0,395 |
| 4 | | 0,928 | 0,904 | 0,877 | 0,848 | 0,815 | 0,781 | 0,744 | 0,706 | 0,668 | 0,629 | 0,590 |
| 5 | | 0,975 | 0,964 | 0,951 | 0,935 | 0,916 | 0,895 | 0,871 | 0,844 | 0,816 | 0,785 | 0,753 |
| 6 | | 0,993 | 0,988 | 0,983 | 0,976 | 0,966 | 0,955 | 0,942 | 0,927 | 0,909 | 0,889 | 0,867 |
| 7 | | 0,998 | 0,997 | 0,995 | 0,992 | 0,988 | 0,983 | 0,977 | 0,969 | 0,960 | 0,949 | 0,936 |
| 8 | | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 0,996 | 0,994 | 0,992 | 0,988 | 0,984 | 0,979 | 0,972 |
| 9 | | | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 0,997 | 0,996 | 0,994 | 0,992 | 0,989 |
| 10 | | | | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 0,997 | 0,996 |
| 11 | | | | | | | | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| 12 | | | | | | | | | | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0 | μ | 4,4 | 4,6 | 4,8 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 | 9,0 |
| 0 | | 0,012 | 0,010 | 0,008 | 0,007 | 0,004 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | | |
| 1 | | 0,066 | 0,056 | 0,048 | 0,040 | 0,027 | 0,017 | 0,011 | 0,007 | 0,005 | 0,003 | 0,001 |
| 2 | | 0,185 | 0,163 | 0,143 | 0,125 | 0,088 | 0,062 | 0,043 | 0,030 | 0,020 | 0,014 | 0,006 |
| 3 | | 0,359 | 0,326 | 0,294 | 0,265 | 0,202 | 0,151 | 0,112 | 0,082 | 0,059 | 0,042 | 0,021 |
| 4 | | 0,551 | 0,513 | 0,476 | 0,440 | 0,358 | 0,285 | 0,224 | 0,173 | 0,132 | 0,100 | 0,055 |
| 5 | | 0,720 | 0,686 | 0,651 | 0,616 | 0,529 | 0,446 | 0,369 | 0,301 | 0,241 | 0,191 | 0,116 |
| 6 | | 0,844 | 0,818 | 0,791 | 0,762 | 0,686 | 0,606 | 0,527 | 0,450 | 0,378 | 0,313 | 0,207 |
| 7 | | 0,921 | 0,905 | 0,887 | 0,867 | 0,809 | 0,744 | 0,673 | 0,599 | 0,525 | 0,453 | 0,324 |
| 8 | | 0,964 | 0,955 | 0,944 | 0,932 | 0,894 | 0,847 | 0,792 | 0,729 | 0,662 | 0,593 | 0,456 |
| 9 | | 0,985 | 0,980 | 0,975 | 0,968 | 0,946 | 0,916 | 0,877 | 0,830 | 0,776 | 0,717 | 0,587 |
| 10 | | 0,994 | 0,992 | 0,990 | 0,986 | 0,975 | 0,957 | 0,933 | 0,901 | 0,862 | 0,816 | 0,706 |
| 11 | | 0,998 | 0,997 | 0,996 | 0,995 | 0,989 | 0,980 | 0,966 | 0,947 | 0,921 | 0,888 | 0,803 |
| 12 | | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 0,996 | 0,991 | 0,984 | 0,973 | 0,957 | 0,936 | 0,876 |
| 13 | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,998 | 0,996 | 0,993 | 0,987 | 0,978 | 0,966 | 0,926 |
| 14 | | | | | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,997 | 0,994 | 0,990 | 0,983 | 0,959 |
| 15 | | | | | | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 0,995 | 0,992 | 0,978 |
| 16 | | | | | | | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,998 | 0,996 | 0,989 |
| 17 | | | | | | | | | 1,000 | 0,999 | 0,998 | 0,995 |
| 18 | | | | | | | | | | 1,000 | 0,999 | 0,998 |
| 19 | | | | | | | | | | | 1,000 | 0,999 |
| 20 | | | | | | | | | | | | 1,000 |
| 2 | μ | 10,0 | 11,0 | 12,0 | 13,0 | 14,0 | 15,0 | 16,0 | 17,0 | 18,0 | 19,0 | 20,0 |
| 2 | | 0,003 | 0,001 | 0,001 | | | | | | | | |
| 3 | | 0,010 | 0,005 | 0,002 | 0,001 | | | | | | | |
| 4 | | 0,029 | 0,015 | 0,008 | 0,004 | 0,002 | 0,001 | | | | | |
| 5 | | 0,067 | 0,038 | 0,020 | 0,011 | 0,006 | 0,003 | 0,001 | 0,001 | | | |
| 6 | | 0,130 | 0,079 | 0,046 | 0,026 | 0,014 | 0,008 | 0,004 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | |
| 7 | | 0,220 | 0,143 | 0,090 | 0,054 | 0,032 | 0,018 | 0,010 | 0,005 | 0,003 | 0,002 | 0,001 |
| 8 | | 0,333 | 0,232 | 0,155 | 0,100 | 0,062 | 0,037 | 0,022 | 0,013 | 0,007 | 0,004 | 0,002 |
| 9 | | 0,458 | 0,341 | 0,242 | 0,166 | 0,109 | 0,070 | 0,043 | 0,026 | 0,015 | 0,009 | 0,005 |
| 10 | | 0,583 | 0,460 | 0,347 | 0,252 | 0,176 | 0,118 | 0,077 | 0,049 | 0,030 | 0,018 | 0,011 |
| 11 | | 0,697 | 0,579 | 0,462 | 0,353 | 0,260 | 0,185 | 0,127 | 0,085 | 0,055 | 0,035 | 0,021 |
| 12 | | 0,792 | 0,689 | 0,570 | 0,463 | 0,358 | 0,268 | 0,193 | 0,135 | 0,092 | 0,061 | 0,039 |
| 13 | | 0,864 | 0,781 | 0,682 | 0,573 | 0,464 | 0,363 | 0,275 | 0,201 | 0,143 | 0,098 | 0,066 |
| 14 | | 0,917 | 0,854 | 0,772 | 0,675 | 0,570 | 0,466 | 0,368 | 0,281 | 0,208 | 0,150 | 0,105 |
| 15 | | 0,951 | 0,907 | 0,844 | 0,764 | 0,669 | 0,568 | 0,467 | 0,371 | 0,287 | 0,215 | 0,157 |
| 16 | | 0,973 | 0,944 | 0,899 | 0,835 | 0,756 | 0,664 | 0,566 | 0,468 | 0,375 | 0,292 | 0,221 |
| 17 | | 0,986 | 0,968 | 0,937 | 0,890 | 0,827 | 0,749 | 0,659 | 0,564 | 0,469 | 0,378 | 0,297 |
| 18 | | 0,993 | 0,982 | 0,963 | 0,930 | 0,883 | 0,819 | 0,742 | 0,655 | 0,562 | 0,469 | 0,381 |
| 19 | | 0,997 | 0,991 | 0,979 | 0,957 | 0,923 | 0,875 | 0,812 | 0,736 | 0,651 | 0,561 | 0,470 |
| 20 | | 0,998 | 0,995 | 0,988 | 0,975 | 0,952 | 0,917 | 0,868 | 0,805 | 0,731 | 0,647 | 0,559 |
| 21 | | 0,999 | 0,998 | 0,994 | 0,986 | 0,971 | 0,947 | 0,911 | 0,861 | 0,799 | 0,725 | 0,644 |
| 22 | | 1,000 | 0,999 | 0,997 | 0,992 | 0,983 | 0,967 | 0,942 | 0,905 | 0,855 | 0,793 | 0,721 |
| 23 | | | 1,000 | 0,999 | 0,996 | 0,991 | 0,981 | 0,963 | 0,937 | 0,899 | 0,849 | 0,787 |
| 24 | | | | 0,999 | 0,998 | 0,995 | 0,989 | 0,978 | 0,959 | 0,932 | 0,893 | 0,843 |
| 25 | | | | 1,000 | 0,999 | 0,997 | 0,994 | 0,987 | 0,975 | 0,955 | 0,927 | 0,888 |
| 26 | | | | | 1,000 | 0,999 | 0,997 | 0,993 | 0,985 | 0,972 | 0,951 | 0,922 |
| 27 | | | | | | 0,999 | 0,998 | 0,996 | 0,991 | 0,983 | 0,969 | 0,948 |
| 28 | | | | | | 1,000 | 0,999 | 0,998 | 0,995 | 0,990 | 0,980 | 0,966 |
| 29 | | | | | | | 1,000 | 0,999 | 0,997 | 0,994 | 0,988 | 0,978 |
| 30 | | | | | | | | 0,999 | 0,999 | 0,997 | 0,993 | 0,987 |
| 31 | | | | | | | | | 1,000 | 0,999 | 0,998 | 0,992 |
| 32 | | | | | | | | | | 1,000 | 0,999 | 0,995 |
| 33 | | | | | | | | | | | 1,000 | 0,999 |
| 34 | | | | | | | | | | | | 0,999 |
| 35 | | | | | | | | | | | | 0,999 |
| 36 | | | | | | | | | | | | 1,000 |

IX - Distribution exponentielle

Le modèle exponentiel est souvent utilisé dans les études de fiabilité, β étant le taux de pannes. Il permet aussi de représenter des durées de vie...
La distribution dépend du seul paramètre β :

20. Allure de la distribution exponentielle en fonction de β .

21. Allure des fréquences cumulatives de la distribution exponentielle.

| Équation générale [$x \geq 0$] (densité de population) | Valeur moyenne | Écart-type |
|--|-------------------------|----------------------------|
| $f(x) = \beta \cdot e^{-\beta \cdot x}$ | $\mu = \frac{1}{\beta}$ | $\sigma = \frac{1}{\beta}$ |
| Fréquence de distribution cumulative Équation générale: $F(x) = 1 - e^{-\beta \cdot x}$ (allure fig. 21) | | |

Exemple : la durée de vie de composants électroniques de puissance, en milliers d'heures, a une forme exponentielle ; le taux de défaillance est $\beta = 0,333 = 1/3$: une défaillance chaque 3 000 heures.

1) Quelle est la probabilité qu'un composant dépasse 3 000 heures ?

$$P(X > 3) = 1 - P(X \leq 3) = 1 - F(3) = 1 - (1 - e^{-3 \cdot 0,333}) = e^{-1} = 0,368$$

(36,8 % de chances, résultat indépendant de β).

2) Quelle est la probabilité que le composant dure entre 1 000 et 3 000 heures ?

$$P(1 \leq X \leq 3) = F(3) - F(1) = (1 - e^{-3 \cdot 0,333}) - (1 - e^{-1 \cdot 0,333})$$

$$= -0,3678 + 0,7168 = 0,3490 \text{ (34,9 \% de chances)}$$

3) Quelle est la probabilité que le composant dure 1 000 heures de plus après 3 000 heures de fonctionnement ?

C'est une probabilité conditionnelle.

$$\text{Forme générale : } P(X > b/X > a) = P(X > b - a)$$

$$P(X > 4/X > 3) = P(X > 1) = e^{-1 \cdot 0,333} = 0,7168.$$

C'est aussi la probabilité qu'un composant neuf dure 1 000 heures.

Remarque : avec un taux de panne β constant, les chances d'avoir une défaillance restent toujours les mêmes. Que le composant soit neuf ou non, qu'il ait déjà servi longtemps ou non, la fiabilité reste la même.

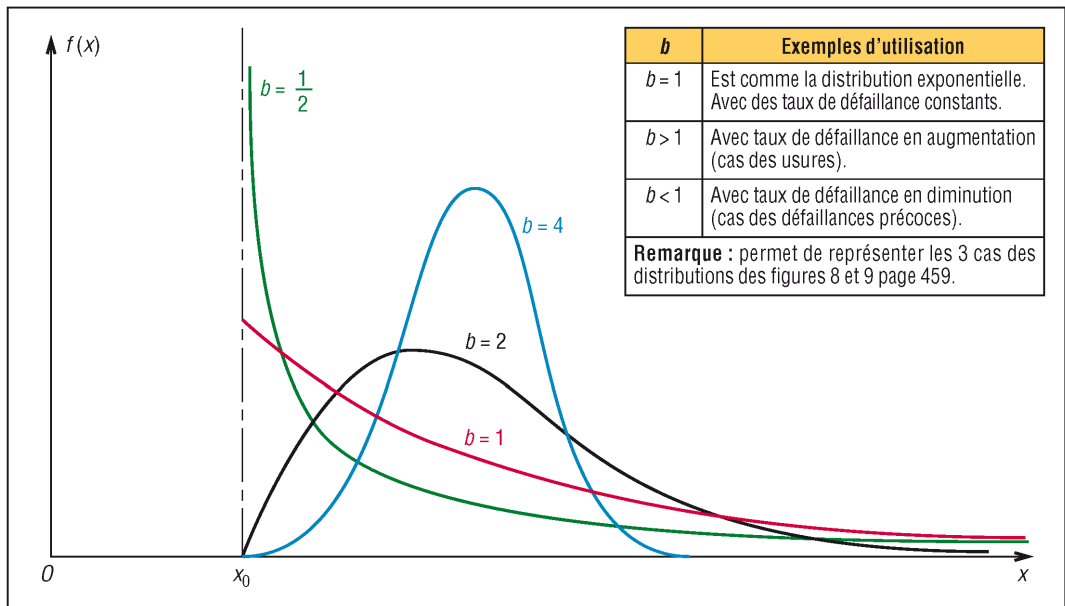
X - Distribution ou loi de Weibull

C'est une sorte de loi caméléon grâce à ses trois paramètres, très souple, qui peut s'ajuster à un grand nombre de données statistiques : elle peut suivre une distribution non symétrique, faire l'approximation de la loi normale, devenir une distribution exponentielle...

Elle fut, à l'origine, utilisée pour décrire les phénomènes de fatigue. Elle est aujourd'hui employée pour décrire des durées de vie (roulements, engrenages, composants électroniques, etc.), des probabilités de rupture sous charge de certains matériaux... Analyse : NF EN 61649.

1. Caractéristiques de la loi de Weibull à trois paramètres

| Équation générale [$x \geq X_0$] (allure fig. 22) | Écart-type |
|---|---|
| $f(x) = \frac{b}{\alpha} \left[\frac{x - X_0}{\alpha} \right]^{b-1} \cdot \exp \left[- \left[\frac{x - X_0}{\alpha} \right]^b \right]$ | $\alpha \cdot \left[\Gamma \left[\frac{2}{b} + 1 \right] - \Gamma^2 \left[\frac{1}{b} + 1 \right] \right]^{0,5}$ |
| Paramètres X_0 est le paramètre de position ($-\infty \leq X_0 \leq \infty$) α est le paramètre d'échelle ($\alpha > 0$) b est le paramètre de forme ($b > 0$), sans unité Γ est la fonction Gamma (tableau ci-dessous) | Valeur moyenne |
| | $\eta = X_0 + \alpha \cdot \Gamma \left[\frac{1}{b} + 1 \right]$ |



22. Allure de la distribution de Weibull pour différentes valeurs de b.

| Fonction $\Gamma(x)$ | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| si k est un nombre entier (1, 2 ...): $\Gamma(k) = (k-1)!$ (avec $k \geq 1$) | | | | | | | | | | | |
| x | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | |
| $\Gamma(x)$ | 1,000 | 0,951 | 0,918 | 0,897 | 0,887 | 0,886 | 0,893 | 0,908 | 0,931 | 0,961 | |
| x | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 |
| $\Gamma(x)$ | 1,000 | 1,046 | 1,101 | 1,166 | 1,242 | 1,329 | 1,429 | 1,544 | 1,676 | 1,827 | 2,00 |

2. Fréquence de distribution cumulative $F(x)$

La loi de Weibull est la plus utilisée sous cette forme.

Remarque : en fiabilité, x représente le temps t , $F(t)$ la fonction défaillance, et $R(t)$ la fonction fiabilité.

Exemple : un composant mécanique possède une durée de vie qui suit la loi de Weibull avec $X_0 = 0$, $b = 0,25$ (1/4) et $\alpha = 120$ heures.

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x - X_0}{\alpha}\right)^b\right) \quad (\text{si } x \geq X_0)$$

$$R(x) = 1 - F(x) = \exp\left(-\left(\frac{x - X_0}{\alpha}\right)^b\right)$$

1) Déterminons le temps moyen entre les défaillances :

$$t_{\text{moyen}} = \mu = X_0 + \alpha \cdot \Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right) = 0 + 120 \cdot \Gamma(4 + 1) = 120 \cdot (4!) = 2\,880 \text{ heures.}$$

2) Quelle est la probabilité que le composant tombe en panne avant 3 600 heures :

$$F(t) = F(3\,600) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{3\,600}{120}\right)^{0,25}\right) = 1 - e^{-2,34} = 1 - 0,096 = 0,904 \text{ (soit } 90,4 \%)$$

3. Caractéristiques de la loi de Weibull à deux paramètres

C'est la loi précédente avec $X_0 = 0$ (cas où l'origine est connue). Si $x = \alpha$, $F(x) = 0,632$.

| Équation générale ($x > 0$) | Fréquence cumulative |
|---|--|
| $f(x) = \frac{b}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{b-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^b\right)$ | $F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^b\right)$ |

α : paramètre d'échelle ou durée de vie ; b : paramètre de forme.

XI - Combinaisons de distributions (addition, soustraction...)

Il est fréquent qu'une grandeur F soit la combinaison de une, deux ou plusieurs variables indépendantes, chacune de ces variables ayant sa propre distribution statistique avec moyenne et écart-type. Quelques cas usuels sont indiqués dans le tableau ci-dessous, des combinaisons de ces cas sont également possibles.

| Moyenne et écart-type de quelques combinaison de fonctions | | | |
|--|-------------------------|---|---------------------------------|
| fonction F | moyenne μ_f | écart-type σ_f | coefficient de dispersion C_f |
| $F = \text{constante} = K$ | K | 0 | 0 |
| $F = x$ | \bar{x} | σ_x | $\sigma_x / \bar{x} = Cx$ |
| $F = K \cdot x$ | $K \cdot \bar{x}$ | $K \cdot \sigma_x$ | σ_x / \bar{x} |
| $F = x + K$ | $\bar{x} + K$ | σ_x | σ_x / μ_f |
| $F = x + y$ | $\bar{x} + \bar{y}$ | $[\sigma_x^2 + \sigma_y^2]^{0,5}$ | σ_f / μ_f |
| $F = x - y$ | $\bar{x} - \bar{y}$ | $[\sigma_x^2 + \sigma_y^2]^{0,5}$ | σ_f / μ_f |
| $F = \frac{1}{x}$ | $1/\bar{x}$ | σ_x^2 / \bar{x}^2 | Cx |
| $F = x \cdot y$ | $\bar{x} \cdot \bar{y}$ | $[\bar{x}^2 \cdot \sigma_y^2 + \bar{y}^2 \cdot \sigma_x^2]^{0,5}$ | $[Cx^2 + Cy^2]^{0,5}$ |
| $F = \frac{x}{y}$ | \bar{x} / \bar{y} | $(1/\bar{y}^2) \cdot [\bar{x}^2 \cdot \sigma_y^2 + \bar{y}^2 \cdot \sigma_x^2]^{0,5}$ | $[Cx^2 + Cy^2]^{0,5}$ |
| $F = x^2$ | \bar{x}^2 | $\sqrt{2} \cdot \bar{x} \cdot \sigma_x = 2 \cdot Cx \cdot \bar{x}^2$ | $2 \cdot Cx$ |
| $F = x^3$ | \bar{x}^3 | $\sqrt{3} \cdot \bar{x}^2 \cdot \sigma_x = 3 \cdot Cx \cdot \bar{x}^3$ | $3 \cdot Cx$ |
| $F = x^4$ | \bar{x}^4 | $2 \cdot \bar{x}^3 \cdot \sigma_x = 4 \cdot Cx \cdot \bar{x}^4$ | $4 \cdot Cx$ |

a) Exemple 1 : dans la formule de traction $\sigma = F/S$, si la force F et la section S sont des variables aléatoires ou statistiques, alors la contrainte σ est aussi une variable aléatoire ou statistique. De plus, les erreurs ou incertitudes provenant de F et S se propagent sur σ .

b) Propriétés

Si on ajoute, ou on retranche, deux variables dont les distributions suivent la loi normale, le résultat est encore une distribution normale.

Si on multiplie deux variables x et y dont les distributions suivent la loi normale, le résultat est approximativement une distribution normale.

L'approximation est convenable si :

$$0,1 \leq \mu_x/\mu_y \leq 10 ; 0,005 \leq C_x \leq 0,20 ; 0,005 \leq C_y \leq 0,20$$

L'approximation est bonne si $C_x \leq 0,075$ et $C_y \leq 0,075$

Le quotient de deux distributions normales x et y est approximativement normale si les conditions précédentes sont vérifiées.

c) Exemple 2 : une barre ronde de diamètre moyen $d_m = 30$ mm est soumise à une charge de flexion. L'écart-type sur le diamètre est de 0,03 mm. Déterminons la moyenne arithmétique et l'écart-type du module de flexion $I_z/v = \pi d^3/32$.

D'après le tableau page 479 (ligne $F = x^3$), le module de flexion moyen s'écrit :

$$(I_z/v)_{\text{moy}} = \pi \cdot d_m^3/32 = \pi \cdot 30^3/32 = 2\,650,72 \text{ mm}^3$$

$$\text{écart-type} : \sigma_I = \sqrt{3} \cdot d_m^2 \cdot \sigma_d = 3^{0,5} \cdot 30^2 \cdot 0,03 = 46,77 \text{ mm}^3$$

Remarque : si la distribution suit la loi normale 99,7 % de la population est situé dans l'intervalle :

$$(I_z/v)_{\text{moy}} - 3 \cdot \sigma_I \leq (99,7 \% \text{ des } I_z/v) \leq (I_z/v)_{\text{moy}} + 3 \cdot \sigma_I$$

$$2\,510,41 \leq I_z/v \leq 2\,791,03$$

XII – Régression ou ajustement linéaire

L'analyse de régression est souvent utilisée en expérimentation ou en cours d'analyse pour savoir s'il existe une relation ou un rapport entre deux ou plusieurs séries de données collectées. De même, pour des raisons diverses (moyens de mesure ou de contrôle imprécis, etc.), la représentation entre deux séries de données peut être imprécise (graphe avec des points plus ou moins dispersés, exemple **fig. 23**).

L'analyse de régression permet alors de trouver le meilleur ajustement possible pour une droite de proportionnalité ou pour toute autre courbe.

La plus simple des régressions, et la plus largement utilisée, est la régression linéaire basée sur l'équation de la droite : $y = ax + b$.

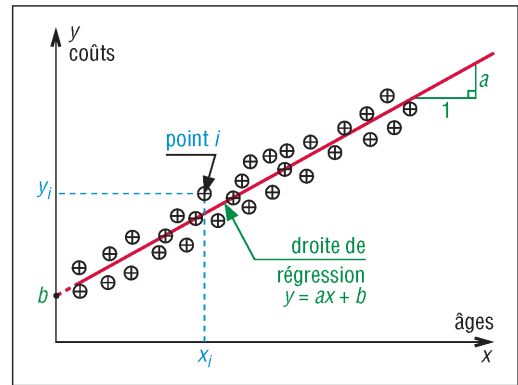
1. Méthode de travail

Première étape : collecter et classer les données des deux séries statistiques.

Par exemple, pour déterminer le rapport qui peut exister entre l'âge d'une voiture et son coût de maintenance, il faut commencer par collecter des données à partir d'un échantillon significatif de voitures. Les âges des différents véhicules seront repérés par x_1, x_2, \dots, x_n et les coûts par y_1, y_2, \dots, y_n .

Deuxième étape : représentation graphique. Tracer les données précédentes sur un repère cartésien de type (x, y) . Le résultat donne un graphe de dispersion (graphe avec un nuage de points, **fig. 23**).

Troisième étape : tracer la droite de régression qui sépare le nuage de points en deux zones sensiblement égales. Déterminer les paramètres caractéristiques a (pente de la droite), b (constante) et r (coefficient de corrélation). r permet d'apprécier la qualité de l'approximation.

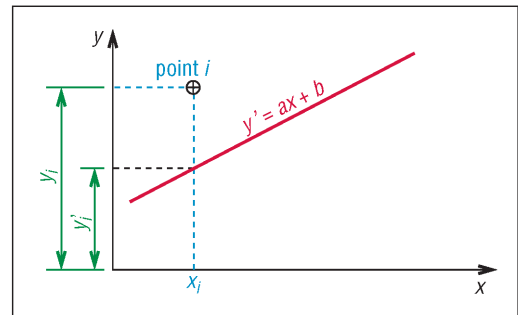


23. Principe de la régression linéaire.

2. Calculs de a , b et r - Méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés part du principe que la somme $\sum(y_i - y'_i)^2$ de l'ensemble des points i du nuage ($i = 1$ à n) doit être aussi petite que possible, y'_i étant un point de la droite cherchée (**fig. 24**).

La somme peut s'écrire $\sum[y_i - (ax_i + b)]^2$, après calculs de minimisation on obtient les formules usuelles :



24. Principe de la méthode des moindres carrés.

| | |
|----------|---|
| a | $a = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} = \frac{n\sum xy - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2}$ (pente de la droite) |
| b | $b = \frac{\sum y_i - a \cdot (\sum x_i)}{n} = \frac{\sum y - a \cdot \sum x}{n}$ (constante de position) |
| r | $r = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{[n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2]^{0.5} \cdot [n(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2]^{0.5}} = \frac{n\sum xy - \sum x \sum y}{[n(\sum x^2) - (\sum x)^2]^{0.5} \cdot [n\sum y^2 - (\sum y)^2]^{0.5}}$ |

Propriétés du coefficient de corrélation r :

- La valeur de r est toujours comprise entre -1 et 1 ($-1 \leq r \leq 1$).
- Si $r < 0$, la pente de la droite est négative, et inversement.
- Si $r = 0$, il n'y a pas de corrélation, c'est-à-dire pas de droite possible.
- Si $r = 1$ ou $r = -1$, la corrélation est dite parfaite. Autrement dit, tous les points des données collectés s'alignent parfaitement sur la droite.

On admet que l'on a une bonne corrélation lorsque $r < 0,87$ ou $r < -0,87$

Exemple : on réalise le test d'un ressort à spires. Les résultats de l'essai sont rassemblés dans le tableau suivant :

| | | | | | | | |
|---------------------|-----|----|----|----|----|----|-----|
| charge F (en daN) | 7 | 16 | 24 | 32 | 40 | 50 | 60 |
| flèche x (en mm) | 4,5 | 24 | 40 | 56 | 70 | 90 | 110 |
| numéro du point | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |

Remarque : toutes les valeurs calculées s'obtiennent facilement avec les calculatrices usuelles (touches de fonction ou librairie).

Calculs intermédiaires :

$$\sum x_i = 4,5 + 24 + 40 + 56 + 70 + 90 + 110 = 394,5$$

$$\sum y_i = 7 + 16 + 24 + 32 + 40 + 50 + 60 = 229$$

$$\sum x_i^2 = 4,5^2 + 24^2 + 40^2 + 56^2 + 70^2 + 90^2 + 110^2 = 30\,432,25$$

$$\sum y_i^2 = 7^2 + 16^2 + 24^2 + 32^2 + 40^2 + 50^2 + 60^2 = 9\,605$$

$$\sum x_i y_i = 7 \cdot 4,5 + 16 \cdot 24 + 24 \cdot 40 + 32 \cdot 56 + 40 \cdot 70 + 50 \cdot 90 + 60 \cdot 110 = 17\,067,5$$

$$(\sum x_i)^2 = 394,5^2 = 155\,630,25$$

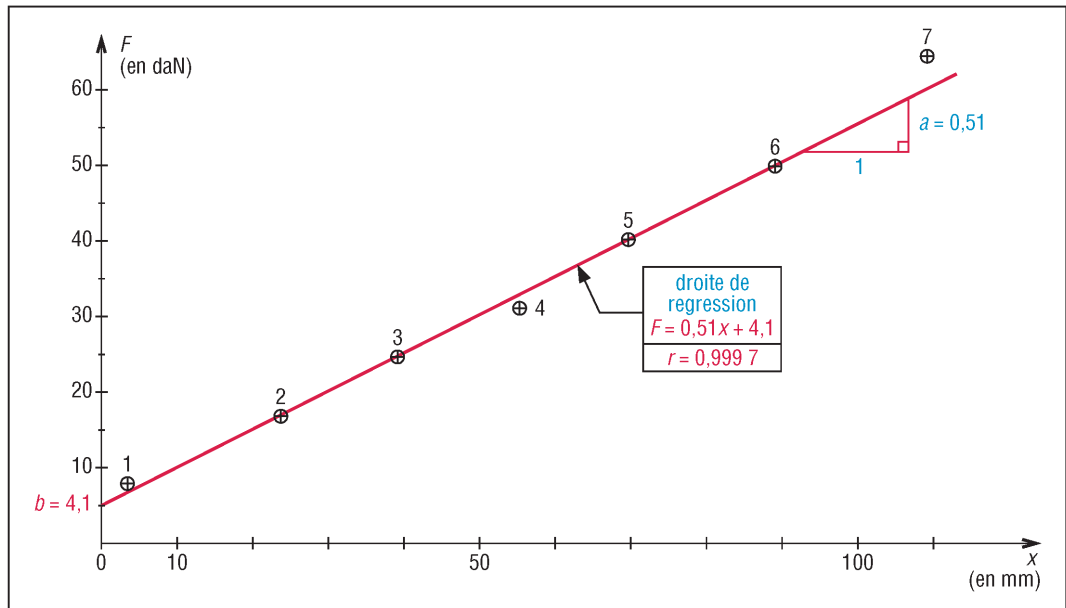
$$(\sum y_i)^2 = 229^2 = 52\,441$$

$$a = \frac{(7 \times 17\,067,5) - (394,5 \times 229)}{(7 \times 30\,432,25) - 155\,630,25} = 0,507\,6 \approx 0,51$$

$$b = \frac{229 - 0,507\,6 \times 394,5}{7} = 4,170\,4 \approx 4,1$$

$$r = \frac{7 \times 17\,067,5 - 394,5 \times 229}{[7 \times 30\,432,25 - 155\,630,25]^{0,5} [7 \times 9\,605 - 52\,441]^{0,5}} = \frac{29\,132}{239,574 \times 121,63} = 0,999\,7$$

r est très proche de 1 ($> 0,87$) ce qui indique une très bonne régression.



25. Droite de régression des valeurs du tableau de la page 481.

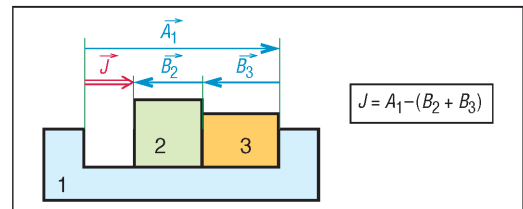
XIII - Cotation fonctionnelle et statistiques

La cotation fonctionnelle et les chaînes de cotes sont étudiées de manière détaillée dans le chapitre 9 : cotation fonctionnelle.

Une fois déterminées toutes les cotes (notées A_i et B_j) d'une même chaîne installant un jeu J , la valeur du jeu moyen (J_{moyen}) peut s'écrire sous la forme d'une différence entre cotes moyennes (exemple fig. 26) :

$$J_{\text{moyen}} = (A_{1\text{moyen}} + A_{2\text{moyen}} + \dots) - (B_{1\text{moyen}} + B_{2\text{moyen}} + \dots)$$

$$= \sum A_{i(\text{moyen})} - \sum B_{j(\text{moyen})}$$



26. Cotation fonctionnelle.

1. Cas du système des tolérances absolues ou extrêmes (rappels)

Dans ce système on part du principe que l'intervalle de tolérance sur le jeu (ITJ) est égal à la somme de tous les intervalles de tolérance des cotes de la chaîne :

$$ITJ = (ITA_1 + ITA_2 + \dots) + (ITB_1 + ITB_2 + \dots) = \sum ITA_i + \sum ITB_i = \sum IT \text{ cotes}$$

$$ITJ = J_{\text{maxi}} - J_{\text{mini}}$$

$$J_{\text{maxi}} = \sum A_{i \text{ maxi}} - \sum B_{i \text{ mini}} \quad \text{et} \quad J_{\text{mini}} = \sum A_{i \text{ mini}} - \sum B_{i \text{ maxi}}$$

2. Cas d'une répartition statistique des dimensions (loi normale)

Dans ce système, on part du principe que toutes les cotes et le jeu suivent une répartition statistique. Si les cotes A_i et B_i suivent toutes la loi normale, il en est de même du jeu J (voir tableau p. 479 et propriétés annexes) car la somme ou la différence de distributions normales est encore une distribution normale.

Pour chaque cote A_i ou B_i :

$$(A_{i \text{ moyen}} - 3 \cdot \sigma A_i) \leq 99,74 \% \text{ des valeurs de } A_i \leq (A_{i \text{ moyen}} + 3 \cdot \sigma A_i)$$

$$(B_{i \text{ moyen}} - 3 \cdot \sigma B_i) \leq 99,74 \% \text{ des valeurs de } B_i \leq (B_{i \text{ moyen}} + 3 \cdot \sigma B_i)$$

$$ITA_i = 6 \cdot \sigma A_i \quad \text{et} \quad ITB_i = 6 \cdot \sigma B_i$$

$$(J_{\text{moyen}} - 3 \cdot \sigma J) \leq 99,74 \% \text{ des valeurs du jeu } J \leq (J_{\text{moyen}} + 3 \cdot \sigma J)$$

$$ITJ = 6 \cdot \sigma J$$

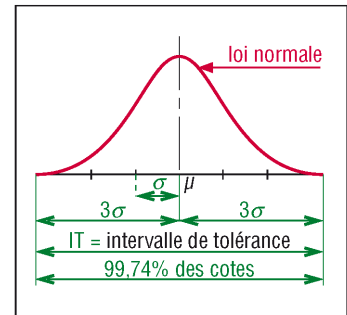
L'intervalle de tolérance sur le jeu ou sur chaque cote A_i ou B_i est égal à 6 fois l'écart-type correspondant (σ).

$$\sigma_J = [\sum \sigma_{A_i}^2 + \sum \sigma_{B_i}^2]^{0,5} \text{ (tableau page 479)}$$

$$\sigma_J^2 = \sum \sigma_{A_i}^2 + \sum \sigma_{B_i}^2$$

$$\left[\frac{ITJ}{6} \right]^2 = \sum \left[\frac{ITA_i}{6} \right]^2 + \sum \left[\frac{ITB_i}{6} \right]^2$$

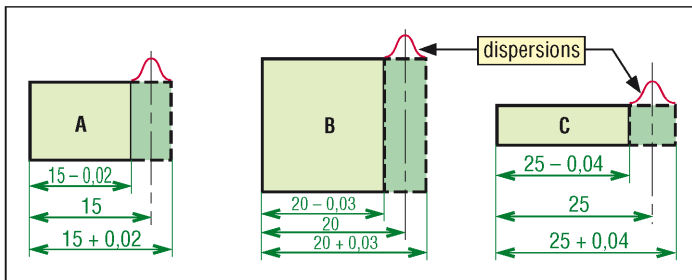
$$ITJ^2 = \sum ITA_i^2 + \sum ITB_i^2$$



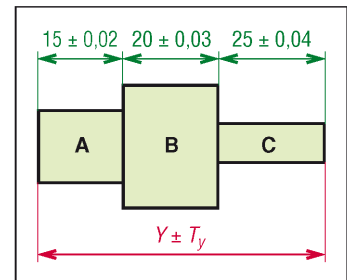
27. Rappel de la loi normale.

$$ITJ = [\sum ITA_i^2 + \sum ITB_i^2]^{0,5} = [\sum ITcotes^2]^{0,5} = [ITcote_1^2 + ITcote_2^2 + \dots]^{0,5}$$

Exemple 1 : le dispositif proposé (fig. 28 et 29) peut être considéré comme un assemblage de trois composants mis bout à bout (empilés) ou comme un ensemble de trois dimensions successives d'un même composant (15, 20 et 25 sont des cotes moyennes).



28. Dimensions respectives des composants A,B,C.



29. Dispositif assemblé.

$$Y_{\text{moyen}} = A_{\text{moyen}} + B_{\text{moyen}} + C_{\text{moyen}} = 15 + 20 + 25 = 60 \text{ mm}$$

1) Calcul de ITY à partir du système des tolérances absolues

$$ITY = ITA + ITB + ITC = 0,04 + 0,06 + 0,08 = 0,18$$

$$Y \pm T_y = 60 \pm 0,09 \text{ mm} \quad (59,91 \leq Y \leq 60,09)$$

2) Calcul de ITY en supposant une répartition statistique (loi normale)

$$ITY^2 = ITA^2 + ITB^2 + ITC^2 = 0,04^2 + 0,06^2 + 0,08^2$$

$$ITY = 0,108$$

$$Y \pm T_y = 60 \pm 0,054 \text{ mm} \quad (\text{à comparer avec } 60 \pm 0,090)$$

$$\text{Écart-type de } Y : \sigma Y = 0,054/3 = 0,018 \text{ mm}$$

$$60 - 3 \cdot \sigma Y \leq 99,74 \% \text{ des } Y \leq 60 + 3 \cdot \sigma Y$$

$$59,946 \leq 99,74 \% \text{ des } Y \leq 60,054 \text{ mm}$$

3) Pourcentage de cotes en dehors de l'intervalle de tolérances absolues (cas où $Y > 60,09$ et $Y < 59,91$)

$$P(Y \leq 59,91) = \phi \left[\frac{59,91 - \mu_Y}{\sigma_Y} \right] = \phi \left[\frac{59,91 - 60}{0,018} \right] = \phi [-5] = 0,000\,000\,287$$

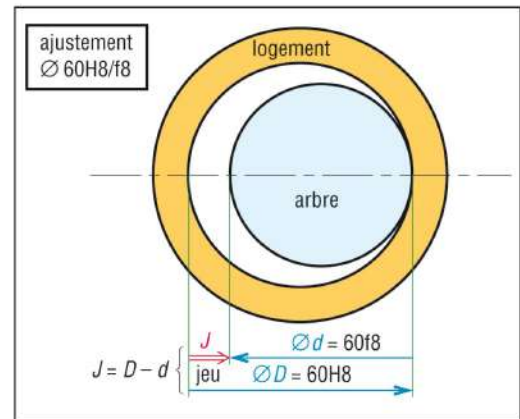
$$P(Y \geq 60,09) = 1 - \phi \left[\frac{60,09 - \mu_Y}{\sigma_Y} \right] = 1 - \phi [5] = 0,000\,000\,287$$

$$\text{Pourcentage de rebus} = 2 \cdot 0,000\,000\,287 \approx 0,000\,000\,6$$

(environ 6 cotes sur 10 000 000 en dehors de l'intervalle spécifié).

Exemple 2 (fig. 30) : cas d'un ajustement 60 H8/f8 avec jeu entre un arbre et un logement (ITH8 = ITf8 = 0,046 mm pour 60 mm). Les caractéristiques sont données dans le tableau ci-dessous :

| | |
|------------------------------------|--|
| arbre $\varnothing d$ | 59,924 \leq 60 f8 \leq 59,970 mm $d = 59,947 \pm 0,023$ mm ($d_{\text{moyen}} = 59,947$) |
| logement $\varnothing D$ | 60,000 \leq 60 H8 \leq 60,046 mm $D = 60,023 \pm 0,023$ mm ($D_{\text{moyen}} = 60,023$) |
| jeu J | cas des tolérances absolues $ITJ = ITD + ITd = 2 \times 0,046$ $J = 0,076 \pm 0,046$ |



30. Ajustement 60 H8/f8.

1) Tolérance sur le jeu, cas d'une répartition statistique (loi normale)

$$ITJ = [ITD^2 + ITd^2]^{0,5} = [2 \cdot 0,046^2]^{0,5} = 0,065$$

$$J = 0,076 \pm 0,032\,5$$

$$\text{Écart-type} : \sigma_j = ITJ/6 \approx 0,010\,8 \text{ mm}$$

$$J_{\text{moyen}} - 3 \cdot \sigma_j \leq 99,7 \% \text{ des jeux } J \leq J_{\text{moyen}} + 3 \cdot \sigma_j$$

$$0,043\,5 \leq (99,7 \% \text{ des jeux } J) \leq 0,108\,5 \text{ mm}$$

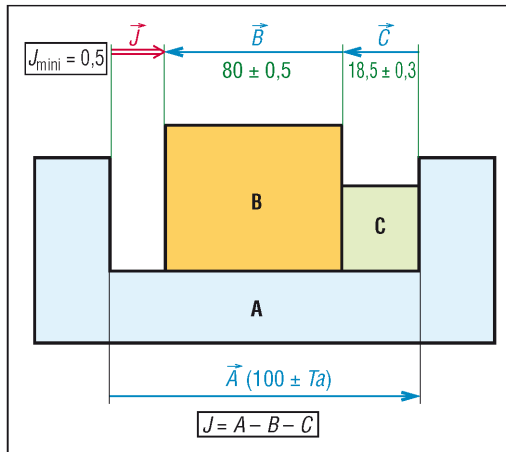
2) Pourcentage de refus si on rejette les montages tel que $J > 0,100$ et $J < 0,050$

$$P(J < 0,05) = \phi \left[\frac{0,05 - 0,076}{0,010\,8} \right] = \phi (-2,42) = 0,007\,8 \text{ (0,78 \%)}$$

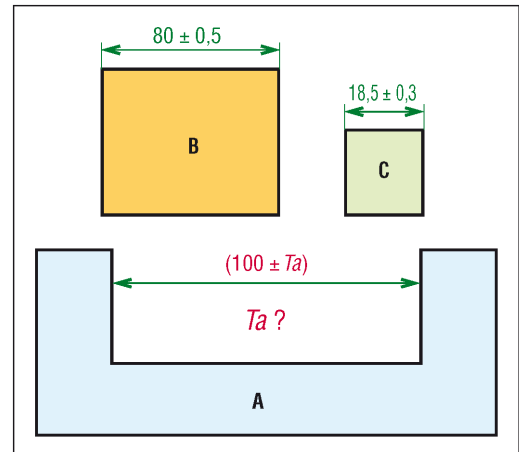
$$P(J > 0,100) = 1 - \phi \left[\frac{0,10 - 0,076}{0,010\,8} \right] = 1 - \phi (2,22) = 1 - 0,986\,1 = 0,013\,9 \text{ (1,39 \%)}$$

$$\text{Pourcentage de refus} : 1,39 + 0,78 = 2,17 \%$$

Exemple 3 : pour le dispositif proposé les dimensions connues sont :



31. Exemple 3.



32. Dimensions des composants A, B et C.

$A = 100 \pm Ta$; $B = 80 \pm 0,5$ et $C = 18,5 \pm 0,3$.

Si un jeu minimum de 0,5 mm est imposé, quelle doit être la valeur de la tolérance Ta ?

$$J_{\text{moyen}} = A_{\text{moyen}} - B_{\text{moyen}} - C_{\text{moyen}} = 100 - 80 - 18,5 = 1,5 \text{ mm}$$

1) Cas du système de tolérancement absolu

$$J_{\text{mini}} = 0,5 = A_{\text{mini}} - B_{\text{maxi}} - C_{\text{maxi}}$$

$$0,5 = (100 - Ta) - (80 - 0,5) - (18,5 - 0,3) = 0,7 - Ta$$

$$Ta = 0,2 \text{ mm} ; A \pm Ta = 100 \pm 0,2$$

$$ITJ = ITA + ITB + ITC = 0,4 + 1,0 + 0,6 = 2,0 \text{ mm} ; J = 1,5 \pm 1,0 \text{ mm}$$

2) Cas d'une répartition statistique des quatre dimensions (loi normale)

Supposons $J = 1,5 \pm 1,0$ mm (inchangé)

$$ITJ^2 = ITA^2 + ITB^2 + ITC^2$$

$$2,0^2 = (2 \cdot Ta)^2 + 1,0^2 + 0,6^2$$

$$Ta = (0,66)^{0,5} = 0,812 \text{ mm}$$

$$A = 100 \pm 0,812 \quad (\text{\`a comparer avec } 100 \pm 0,2)$$

Remarque : si pour ce cas on a A_{mini} (99,188) en même temps que B_{maxi} (80,5) et C_{maxi} (18,8), il y a interférence ($99,188 - 80,5 - 18,8 = -1,12$ mm). Cependant, d'un point de vue statistique, ce cas est très peu probable.

Conclusions : les exemples précédents montrent que l'utilisation des statistiques permet de concevoir des tolérances plus larges.

XIV - Exercices

Exercice 1

Dans une fonderie, pour surveiller la masse d'une série de pièces moulées, on réalise à intervalle régulier la pesée d'un échantillon de 30 pièces. Les mesures collectées en kg de l'un des échantillons sont :

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 131 | 140 | 129 | 128 | 132 | 135 | 142 | 122 | 126 | 118 | 120 | 125 | 128 | 128 | 111 |
| 133 | 107 | 147 | 136 | 130 | 130 | 132 | 138 | 128 | 124 | 128 | 129 | 127 | 127 | 122 |

a) Classifier les mesures dans une table de six intervalles allant de 106 à 147 kg, tracer l'histogramme correspondant.

b) Déterminer la moyenne et l'écart-type.

Exercice 2

Un échantillon de barres en acier est testé en traction afin de contrôler la limite élastique R_e du matériau. Résultats (R_e étant le milieu de l'intervalle correspondant) :

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| R_e (en daN/mm ²) | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 | 42 | 44 | 46 |
| fréquence (en nbre d'unités) | 4 | 12 | 12 | 18 | 38 | 40 | 8 | 2 |

- Déterminer la moyenne et l'écart-type de l'échantillon.
- Si la distribution est supposée normale, déterminer le pourcentage de pièces obéissant à la spécification 40 ± 5 daN/mm².

Exercice 3

Un département de contrôle de la qualité mesure la longueur d'un échantillon de 100 vis inox prélevé dans une série en cours. La longueur moyenne trouvée est de 65,06 mm et l'écart-type de 0,06 mm. Si la distribution suit la loi normale, déterminer :

- le pourcentage de vis inférieur à 64,94 mm ;
- le pourcentage de vis supérieur à la longueur nominale 65,00 mm ;
- le pourcentage obéissant à la spécification $65,00 \pm 0,015$ mm.

Exercice 4

On mesure un échantillon de 50 résistances prélevées au hasard dans une production. La distribution suit la loi normale et les résultats donnent une résistance moyenne de 987 Ω avec un écart-type de 52 Ω . Déterminer :

- le pourcentage de composants dont la résistance est supérieure à 1 000 Ω ;
- le pourcentage de composants à retenir si les spécifications sont $1\,000 \Omega \pm 10\%$.

Exercice 5

On réalise l'essai d'un ressort à spire. Les résultats sont :

| | | | | | | | |
|---------------------|------|----|----|----|----|----|------|
| charge F (en daN) | 10,5 | 24 | 36 | 48 | 60 | 75 | 90 |
| flèche f (en mm) | 3,5 | 18 | 30 | 42 | 52 | 68 | 82,5 |

- Tracer les données sur un graphe (x , y). Déterminer la droite de régression, en déduire la charge produisant une flèche de 65 mm.
- Calculer et interpréter le coefficient de corrélation.

Exercice 6

On mesure l'évolution du voltage aux bornes d'un condensateur en fonction du temps, pendant sa décharge. Résultats :

| | | | | | | | |
|----------------|-----|----|------|------|-----|-----|----|
| temps (en s) | 9 | 15 | 25,5 | 37,5 | 48 | 57 | 63 |
| tension (en V) | 145 | 93 | 34,5 | 14,5 | 5,5 | 2,9 | 2 |

- Tracer les données sur un papier semi log.
- Tracer la droite de régression et calculer le coefficient de corrélation.

Exercice 7

Un essai de traction pratiqué sur une éprouvette en polyéthylène donne la variation des contraintes σ en fonction des déformations ε (allongement relatif). Résultats :

| | | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| σ (N/mm ²) | 56 | 70 | 10,5 | 14 | 17,5 | 21 | 24,5 |
| ε (sans unité) | 0,12 | 0,18 | 0,41 | 0,56 | 0,72 | 0,84 | 1 |

La relation entre les deux variables est supposée de la forme $\varepsilon = a + b \cdot \ln \sigma$, déterminer les constantes a et b par régression.

Exercice 8

Dans la loi de Hooke $\sigma = E \cdot \varepsilon$, σ est la contrainte en N/mm^2 , E le module d'élasticité longitudinal ($E_{\text{moyen}} = 200\,000 \text{ N/mm}^2$, écart-type = 500 N/mm^2) et ε l'allongement relatif ($\varepsilon_{\text{moyen}} = 0,0008$, écart-type = $0,00005$).

Déterminer la contrainte moyenne (σ_{moyen}) et l'écart-type correspondant.

Exercice 9

La contrainte de torsion maximale dans une barre cylindrique est donnée par la relation $\tau_{\text{max}} = 16Mt/\pi d^3$. Mt est le couple de torsion maximal supporté ($Mt_{\text{moyen}} = 100\,000 \text{ mmN}$, écart-type $7\,000 \text{ mmN}$) et d le diamètre de la barre ($d_{\text{moyen}} = 30 \text{ mm}$, écart-type $0,05 \text{ mm}$).

Déterminer la contrainte maximale moyenne et l'écart-type correspondant.

Exercice 10

n barres identiques de section S sont soumises au même effort de traction P . Les variations de P et S amènent une fluctuation de la contrainte normale $\sigma_N = P/S$ (loi normale : $\sigma_{N\text{moyen}} = 450 \text{ N/mm}^2$, écart type 120 N/mm^2). Les variations du matériau et des traitements amènent une fluctuation de la limite élastique R_e (loi normale : $R_{e\text{moyen}} = 600 \text{ N/mm}^2$, écart-type 90 N/mm^2). Si la condition de résistance impose $\sigma_N < R_e$, montrer que la probabilité de rupture des barres est égale à 84 % (partir de $F = R_e - \sigma_N \leq 0$).

Exercice 11

Un échantillon de luminaires produit en série est prélevé dans la production. La fraction de non conformité observée, d'un point de vue qualité parfaite, est de $1/8$. Les lampes sont emballées dans des cartons par quatre. En utilisant la loi binomiale, quelle est la probabilité qu'un carton pris au hasard ne contienne que des lampes conformes ?

Exercice 12

Le nombre des connexions défectueuses sur une carte électronique utilisée pour un micro-ordinateur suit la loi de Poisson avec $\mu = 3$. Quelle est la probabilité qu'une carte ait au plus deux défauts (0, 1 ou 2 défauts possibles) ?

Exercice 13

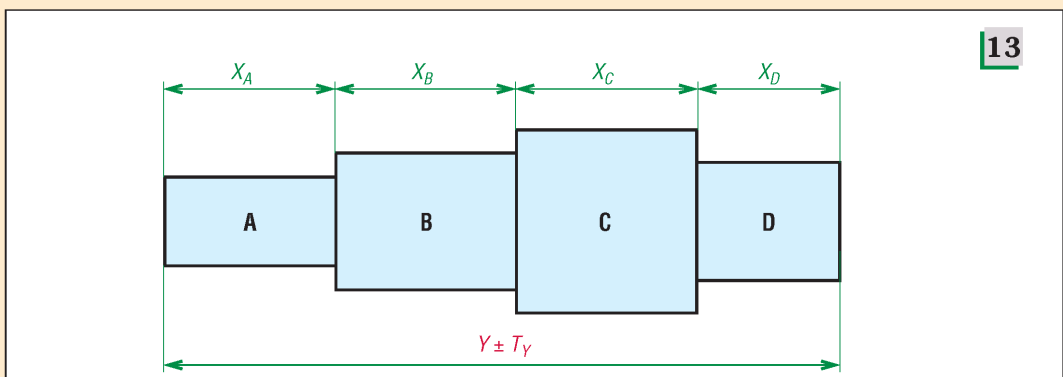
L'ensemble proposé schématise un assemblage de quatre composants A, B, C et D. Dimensions en mm :

$$X_A = 25 \pm 0,9 ; X_B = 24 \pm 0,6 ; X_C = 24 \pm 1,2 ; X_D = 30 \pm 0,3 \text{ mm}$$

a) Déterminer $Y \pm T_Y$ dans le système des tolérances absolues.

b) Même question en supposant une répartition statistique des dimensions (loi normale).

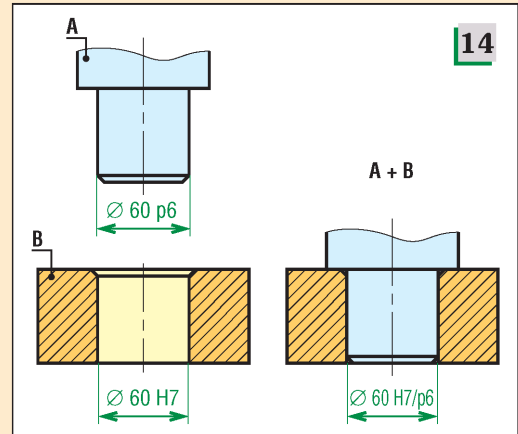
c) Si les spécifications de fin de montage sont $Y = 102,5 \pm 1,5$, déterminer le pourcentage d'assemblages refusés.



Exercice 14

Le montage serré d'une bague B sur un arbre A est défini par l'ajustement 60 H7/p6 ($60,000 \leq 60\text{ H7} \leq 60,030$ et $60,032 \leq 60\text{ p6} \leq 60,051$).

- Déterminer le serrage moyen après assemblage.
- Déterminer la valeur du serrage (mini et maxi) dans le cas du système des tolérances absolues.
- Même question dans le cas d'une répartition statistique (loi normale).
- Quel pourcentage de montage présente un serrage nul ou du jeu ?

**Exercice 15**

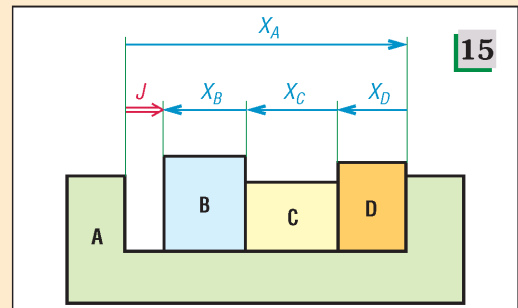
Le jeu J du dispositif est :

$J = X_A - X_B - X_C - X_D$. Le jeu J minimum est fixé à $0,5\text{ mm}$.

Données :

$X_A = 289,4 \pm T_a$; $X_B = 112,5 \pm 0,4$;
 $X_C = 100 \pm 0,6$; $X_D = 75 \pm 0,3\text{ mm}$

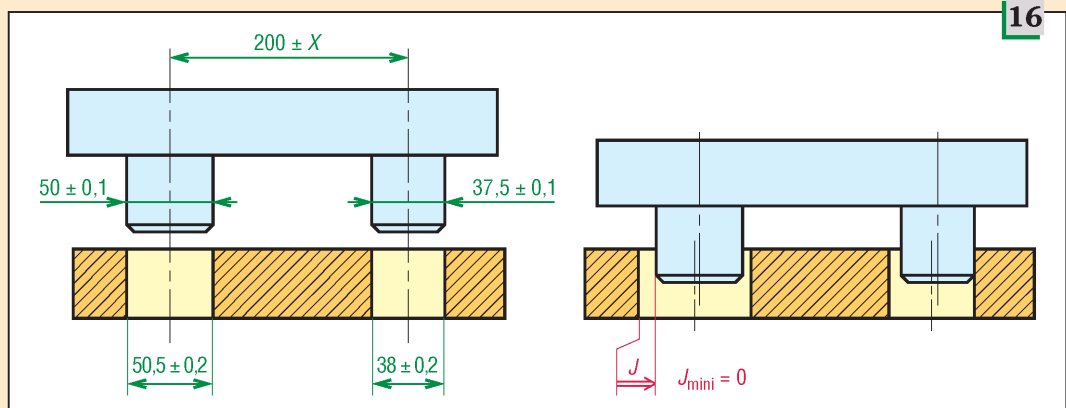
- Déterminer la tolérance T_a dans le cas du système des tolérances absolues.
- Même question en supposant une répartition statistique (loi normale).

**Exercice 16**

Pour l'assemblage proposé avec pieds de centrage, on impose un jeu minimum nul ($J_{\text{mini}} = 0$).

Déterminer la tolérance d'entraxe X :

- Dans le cas du système de tolérances absolues.
- En supposant une répartition statistique (loi normale) des dimensions.



41

VÉRINS DISTRIBUTEURS ET ACCESSOIRES

OBJECTIFS

- Décrire les caractéristiques, la normalisation et les domaines d'emploi des principaux composants pour systèmes automatisés industriels.
- Proposer des exercices d'application.

Les vérins, actionneurs linéaires, et les distributeurs, préactionneurs, sont des éléments essentiels des systèmes automatisés industriels. Il en existe un grand nombre dans des technologies assez variées. De ce fait, dans ce chapitre, ne seront abordés que les principes de base et la normalisation des dispositifs usuels présentant un caractère durable.

Schématisations des circuits et composants : NF ISO 1219-1 et 2 (pages 606-607) ; NF EN ISO 6412-1 à 3 (page 616) ; NF EN 1861 (pages 614-615) ; NFE 04 202-1 à 9 ; etc.

Normalisation des vérins (NF...) : ISO 3320, ISO 4393 et 4395, ISO 5598 et 6099...

Efficacité énergétique (air comprimé) : NF EN ISO 11011 (les systèmes d'air comprimé utilisent entre 5 et 25 % de la consommation industrielle d'électricité).

I - Vérins

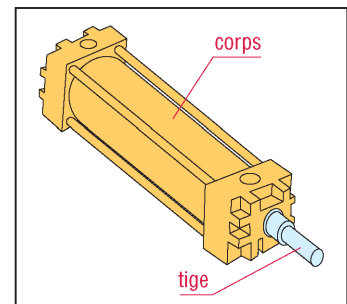
Ils transforment l'énergie d'un fluide sous pression en énergie mécanique (mouvement avec effort). Ils peuvent soulever, pousser, tirer, serrer, tourner, bloquer, percuter, abloquer...

Leur classification tient compte de la nature du fluide, pneumatique ou hydraulique, et du mode d'action de la tige : simple effet, double effet...

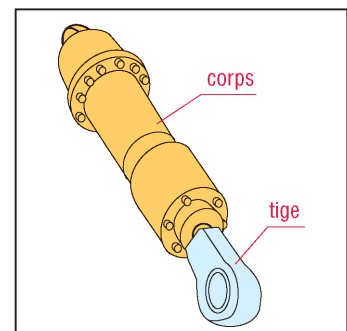
Remarque : une grande quantité de fonctions complémentaires peut leur être intégrée : amortissement de fin de course, capteurs de position, dispositifs de fin de course, dispositifs de détection, distributeurs, guidages...

a) Vérins pneumatiques : ils utilisent l'air comprimé, 2 à 10 bars en usage courant. Du fait de la simplicité de mise en œuvre, ils sont très nombreux dans les systèmes automatisés industriels.

b) Vérins hydrauliques : ils utilisent l'huile sous pression, jusqu'à 350 bars en usage courant. Par rapport aux vérins pneumatiques, ils sont plus coûteux, développent des efforts beaucoup plus importants, des vitesses de tiges plus précises et permettent des applications plus sophistiquées avec régulation, asservissements...



1. Exemple de vérin pneumatique.

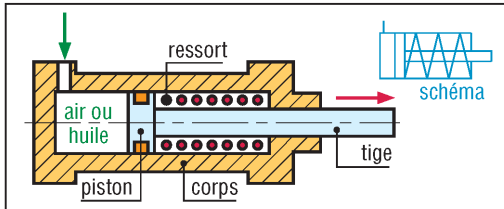


2. Exemple de vérin hydraulique.

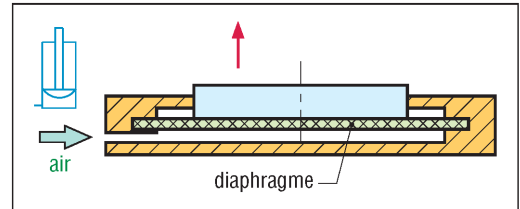
1. Vérins simple effet (VSE)

L'ensemble tige-piston se déplace dans un seul sens sous l'action du fluide sous pression. Le retour est effectué par un autre moyen : ressort, charge...

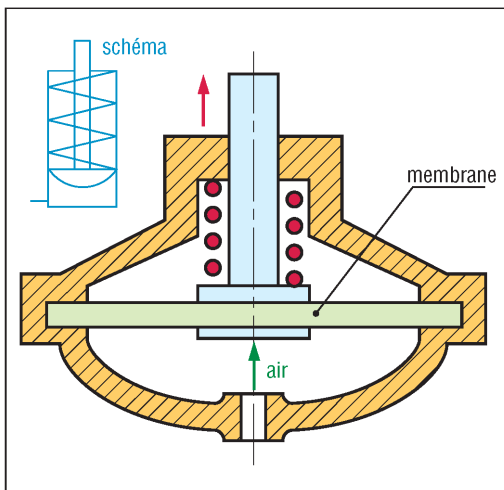
Principes de réalisation et symboles normalisés (ISO/AFNOR)



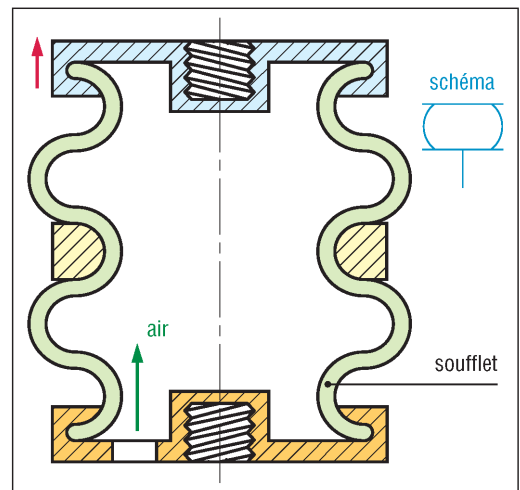
3. Simple effet classique, rappel par ressort.



4. Simple effet plat à diaphragme.



5. Simple effet à membrane, rappel par ressort.



6. Simple effet à soufflet.

Avantages : ils sont économiques et la consommation de fluide est réduite.

Inconvénients : à course égale, ils sont plus longs que les vérins double effet ; la vitesse de la tige est difficile à régler en pneumatique et les courses proposées limitées, jusqu'à 100 mm.

Utilisation : travaux simples (serrage, éjection, levage, emmanchements...).

2. Vérins double effet (VDE)

L'ensemble tige plus piston peut se déplacer dans les deux sens sous l'action du fluide.

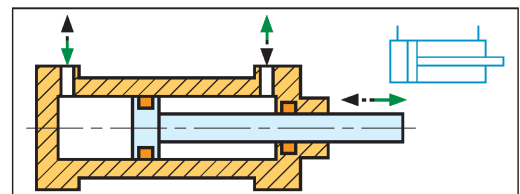
L'effort en poussant (tige sortant) est légèrement plus grand que l'effort en tirant (entrée de la tige) car la pression n'agit pas sur la partie de surface occupée par la tige.

Avantages : plus grande souplesse d'utilisation ; réglage plus facile de la vitesse, par contrôle du débit à l'échappement ; amortissements de fin de courses, réglables ou non, possibles dans un ou dans les deux sens. Ils offrent de nombreuses réalisations et options. Inconvénients : ils sont plus coûteux.

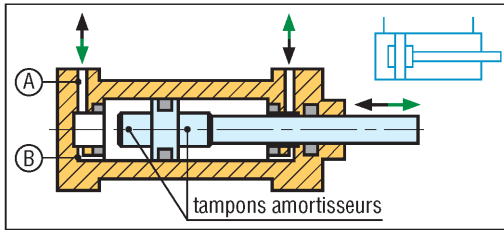
Utilisation : les plus utilisés industriellement, ils présentent un grand nombre d'applications.

Amortissement de fin de course : il est indispensable aux vitesses ou cadences élevées et sous fortes charges.

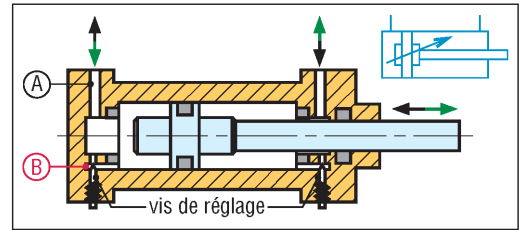
Si des blocs en élastomère suffisent lorsque l'énergie à amortir est modérée, les dispositifs avec tampons amortisseurs sont recommandés aux plus hautes énergies. Dès que le tampon entre dans son alésage, le fluide à l'échappement est obligé de passer par l'orifice B plus petit, au lieu de A. La réduction du débit provoque une surpression créant l'amortissement.



7. Double effet, air comprimé ou huile.

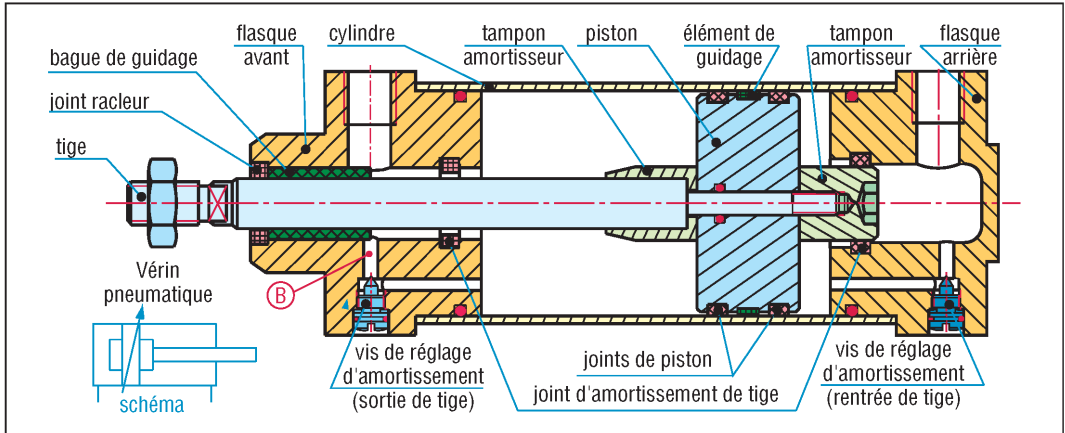


8. Double effet à amortissement non réglable.



9. Double effet à amortissement réglable (voir fig. 21).

Exemple de réalisation - Principaux constituants



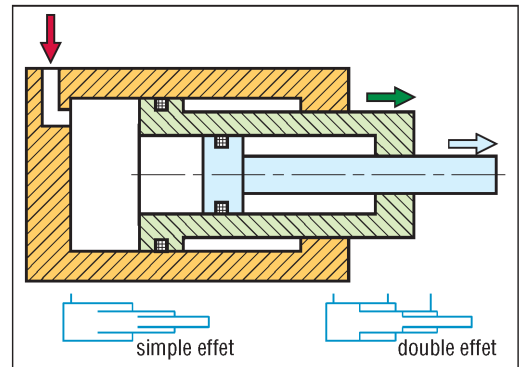
10. Cas d'un vérin pneumatique à amortissement réglable des deux côtés.

3. Principaux vérins particuliers ou spéciaux

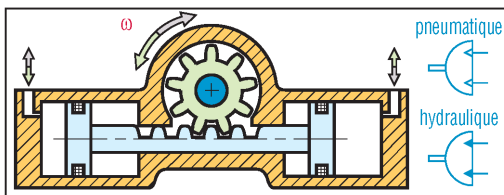
Variantes particulières des cas précédents, ils présentent les mêmes options possibles : amortissement...

Vérin à tige télescopique : simple effet et généralement hydraulique, il permet des courses importantes tout en conservant une longueur repliée raisonnable.

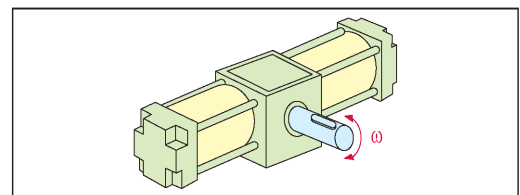
Vérin rotatif : l'énergie du fluide est transformée en mouvement de rotation ; par exemple, vérin double effet entraînant un système pignon crémaillère. L'angle de rotation peut varier entre 90 et 360°. Les amortissements sont possibles.



11. Simple effet à tige télescopique.

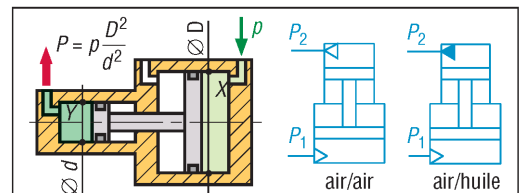


12. Vérin rotatif (unité de couple) : exemple de réalisation.



13. Vérin rotatif à double effet, perspective.

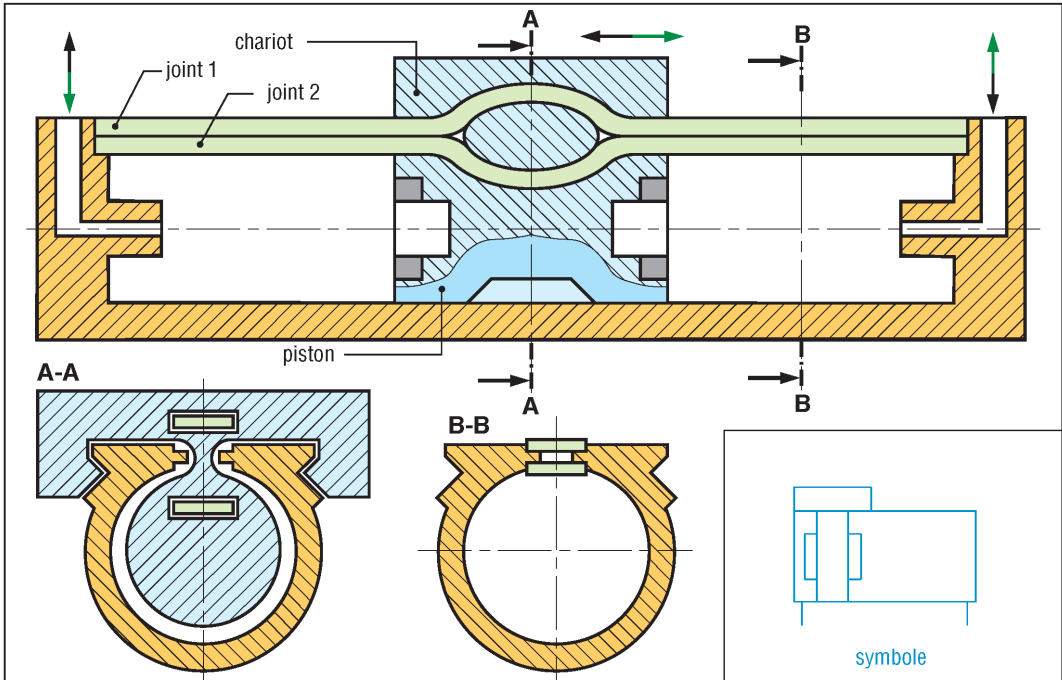
Multiplicateur de pression : souvent utilisé en oléopneumatique, il permet à partir d'une pression d'air (p en X), d'obtenir un débit d'huile à une pression plus élevée (P en Y : 10 à 20 fois plus élevée que p). Il est ainsi possible d'alimenter des vérins hydrauliques présentant des vitesses de tige plus précises.



14. Multiplicateur de pression.

Vérin sans tige : double effet pneumatique, il est deux fois moins encombrant qu'un vérin classique à tige ; l'espace d'implantation est divisé par 2.

Propriétés : pas de rotation de la tige ; vitesses de déplacement pouvant être élevées : 3 m/s et plus ; courses possibles très grandes : 7 m et plus ; pas de problème lié au flambage de la tige ; efforts et vitesses identiques dans les deux sens mais étanchéité plus fragile. De nombreuses variantes et combinaisons sont possibles : assemblages croisés...

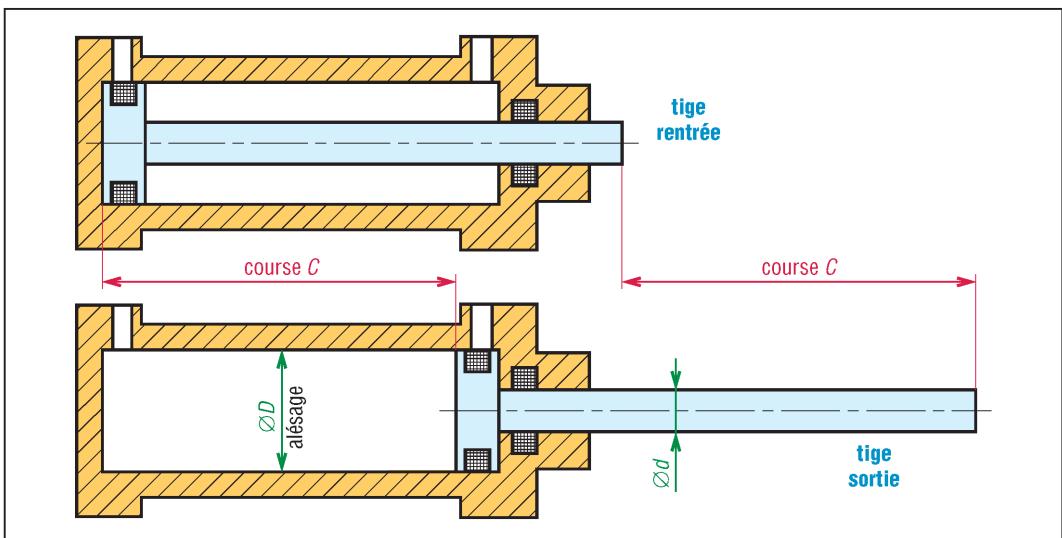


15. Double effet sans tige avec amortissement des deux côtés avec ruban d'étanchéité.

4. Détermination d'un vérin

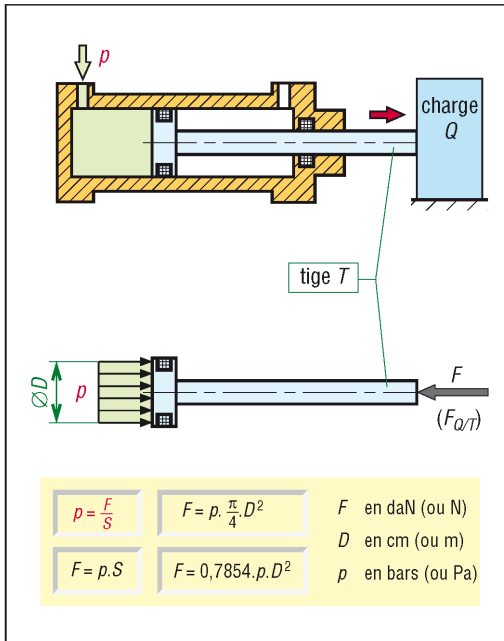
a) Données nécessaires : efforts exercés dans les deux sens, en poussant et en tirant, cadence ou vitesse de la tige, conditions de service : amortissement et énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ à dissiper...

b) Diamètres et course : une fois le type choisi, à partir des données, il faut déterminer le diamètre D de l'alésage et la course C de la tige. Le diamètre de tige d dépend de D (normalisation page 493).

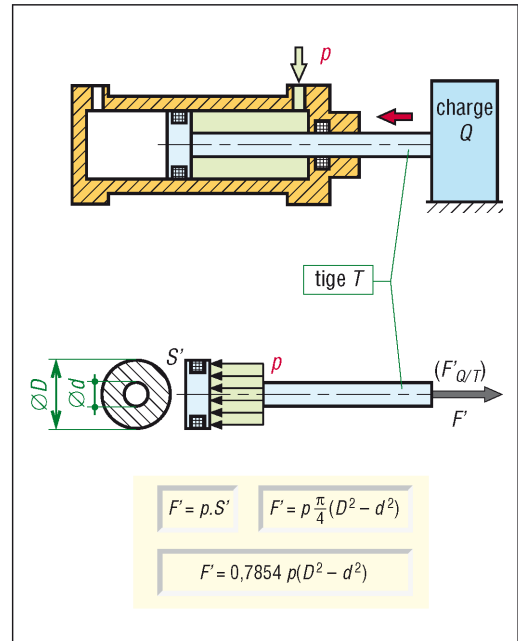


16. Course d'un vérin.

| Normalisation ISO, AFNOR etc – (NF ISO 3320...) – Valeurs préférentielles | |
|---|--|
| diamètres D (mm) | 8 - 10 - 12 - 16 - 20 - 25 - 32 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100 - 125 - 160 - 200 - 250 - 320 - 400 - 500 |
| diamètres d (tige) (mm) | 4 - 5 - 6 - 8 - 10 - 12 - 14 - 16 - 18 - 20 - 22 - 25 - 28 - 32 - 36 - 40 - 45 - 50 - 56 - 63 - 70 - 80 - 90 - 100 - 110 - 125 - 140 - 160 - 180 - 200 - 220 - 250 - 280 - 320 - 360 - 400 - 450 |
| pressions nominales usuelles (bars) | 0,1 - 0,4 - 1 - 2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 16 - 20 - 25 - 31,5 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100 - 125 - 160 - 200 - 250 - 350 - 400 - 450 - 500 - 630 - 800 - 1000... |



17. Effort en poussant.



18. Effort en tirant.

c) Efforts théoriques exercés : efforts théoriquement développables en sortie ou en entrée de tige, calculés à partir de la pression d'utilisation.

Exemple 1 : dans le cas d'un vérin pneumatique avec $D = 100$ mm, $d = 32$ mm, calculons les efforts théoriques exercés en poussant et en tirant si la pression d'alimentation est de 7 bars.

$$\text{En poussant : } F_{\text{théorique}} = p \cdot S = p \cdot \pi \cdot R^2 = 7 \cdot \pi \cdot 5^2 = 550 \text{ daN}$$

$$\text{En tirant : } F'_{\text{théorique}} = p \cdot S' = p \cdot \pi \cdot (R^2 - r^2) = 7 \cdot \pi \cdot (5^2 - 1,6^2) = 493 \text{ daN } (\approx 10\% \text{ en moins})$$

$$F/F' = S/S' \approx 1,12.$$

$$F/F' = \text{préférentiels (NF ISO 3320 : } (\approx) 1,06 - 1,12 - 1,25 - 1,33 - 1,4 - 1,6 - 2 - 2,5 - 5.$$

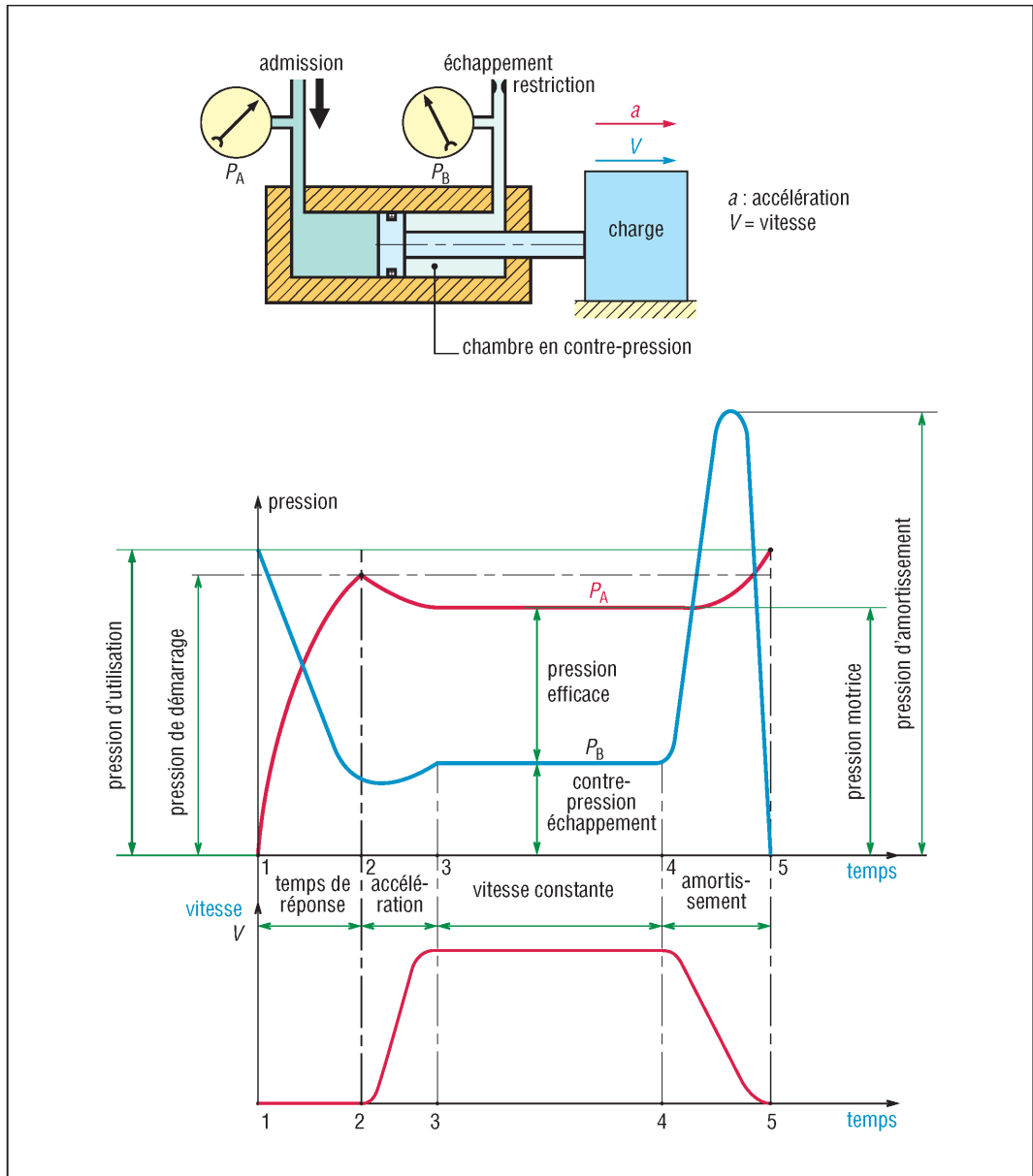
Remarque : avec un vérin hydraulique de mêmes dimensions sous une pression d'alimentation de 240 bars, $F = 18850$ daN et $F' = 16920$ daN (34 fois plus).

d) Rendement : les frottements internes au vérin (joints d'étanchéité et bagues de guidage) amènent une perte d'énergie et une baisse du rendement η (pertes de 10 ou 12 % pour les vérins pneumatiques de bonne construction).

Exemple 2 : reprenons les données de l'exemple 1. Si le rendement est de 88% (perte de 12%), l'effort réellement disponible en poussant est :

$$\eta \cdot F_{\text{théorique}} = \eta \cdot p \cdot S = 0,88 \cdot 550 = 484 \text{ daN} = F_{\text{théorique}} - F_{\text{frottements}}$$

e) Contre-pression d'échappement : elle est employée pour régler et réguler (maintenir constante) la vitesse de la tige ; le réglage est obtenu par régleurs placés à l'échappement. Cette contre-pression, de 30 à 40 % la valeur de la pression de démarrage en pneumatique, amène un effort antagoniste supplémentaire.



19. Les différentes pressions mises en jeu dans un vérin pneumatique.

Bilan des efforts exercés :

$$F_{\text{théorique}} = F_{\text{charge}} + F_{\text{frottements}} + F_{\text{contre-pression}} = p \cdot S \text{ (ou } p \cdot S').$$

$$F_{\text{charge}} = \text{effort nécessaire pour déplacer la charge seule} = F_{\text{ext}} + ma.$$

Remarques : la pression de démarrage est la pression nécessaire à la mise en mouvement de la charge ; elle est environ 10% inférieure à la pression d'utilisation.

La pression motrice, plus petite, est celle qu'il faut pour maintenir le mouvement à vitesse constante.

La pression d'amortissement freine la charge en fin de course.

La pression efficace est la pression réellement utile pour déplacer la charge (donne F_{charge}).

f) Taux de charge : c'est un paramètre qui tient compte à la fois des effets de la contre-pression et des frottements internes ; son emploi élimine les risques de broutements.

$$\text{taux de charge} = \frac{F_{\text{charge}}}{F_{\text{théorique}}} = \frac{\text{effort à vaincre pour déplacer la charge}}{\text{poussée théorique (} p \cdot S)}$$

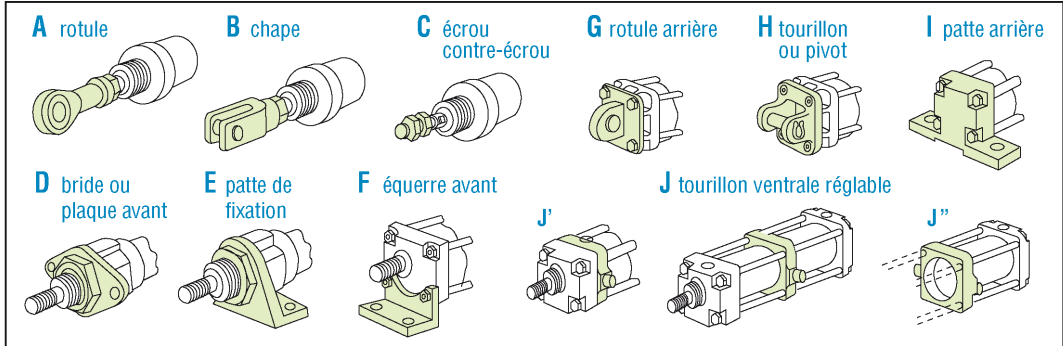
En pratique : $0,5 \leq \text{taux de charge} \leq 0,75$; le taux de 0,5 est usuel.

Exemple 3 : reprenons les données de l'exemple 1 avec un taux de charge de 0,6. La charge que peut réellement déplacer le vérin, en poussant, à la vitesse envisagée et dans de bonnes conditions est :

$$F_{\text{charge}} = 0,6 \cdot 550 = 330 \text{ daN} = F_{\text{théorique}} - F_{\text{frottements}} - F_{\text{contre pression}}$$

Pertes dues aux frottements et à la contre pression : $550 - 330 = 220 \text{ daN}$.

5. Fixations et montage des vérins



20. Fixations usuelles des vérins.

Les fabricants proposent une gamme importante de fixations pour implanter les vérins. Deux fixations suffisent en général : une à l'avant en bout de tige (cas A, B, C) ou sur le fond avant (D, E, F) plus une à l'arrière (G, H, I) ou au milieu (J, J', J).

Suivant les fixations choisies, la position du vérin et les charges exercées, certains calculs de vérification (flambage, flexion...) peuvent devenir nécessaires.

Désignations : vérins hydrauliques NFE 48-031.

II - Réglage de la vitesse des vérins - régleurs

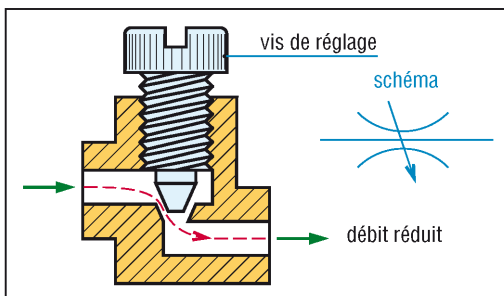
Deux types de régleurs sont utilisés : les réducteurs d'échappements et les réducteurs de débit unidirectionnels.

Dans les deux cas, la vitesse de translation de la tige est contrôlée par le réglage du débit de fluide entrant ou sortant des chambres du vérin.

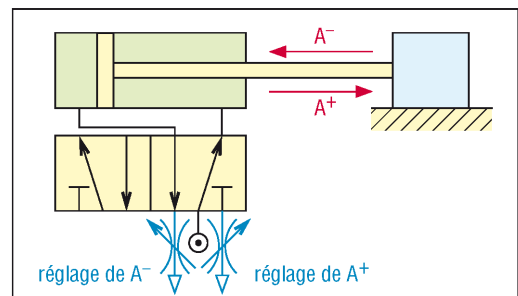
Ces composants permettent de contrôler la vitesse maximale de la tige et de la charge, de fournir une vitesse constante sur l'essentiel de la course, d'amortir dans certaines limites en fin de course, ou encore de ralentir la descente d'une lourde charge.

Remarque : seule l'hydraulique peut garantir un réglage précis de la vitesse. Le pneumatique ne réalise pas des régulations précises. L'oléopneumatique est une solution intermédiaire pratique.

1. Réducteurs d'échappement



21. Principe réducteur de débit réglable.



22. Exemple d'implantation.

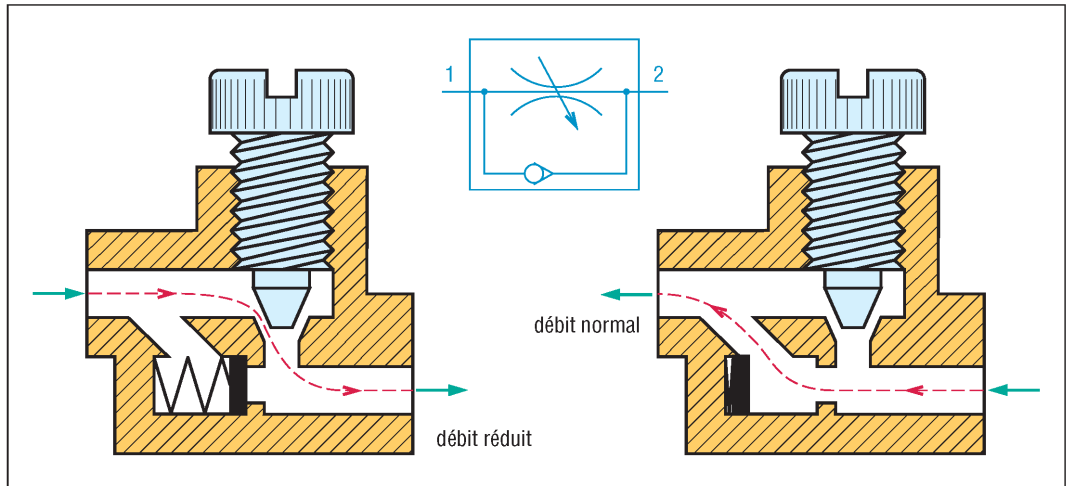
C'est une restriction réglable, généralement implantée sur les orifices d'échappement du distributeur.

Dans le cas d'un vérin pneumatique double effet, l'utilisation d'un distributeur 5/2 est nécessaire si l'on souhaite des réglages différents pour la sortie (A⁺) ou l'entrée (A⁻) de la tige.

Avantages : simple ; compact ; facile à implanter.

Inconvénients : en pneumatique, le réglage de la vitesse est imprécis si le distributeur est loin du vérin, l'association des distributeurs est impossible.

2. Réducteurs de débits unidirectionnels (RDU)



23. Principe du réducteur de débit unidirectionnel réglable.

Très utilisés, placés entre le distributeur et le vérin, ils contrôlent le débit, c'est-à-dire la réduction, dans un seul sens de circulation et reste neutre dans l'autre cas.

Ils peuvent être implantés sur le vérin, ce qui permet des vitesses plus précises en pneumatique ; sur le distributeur ou encore entre les deux selon l'accessibilité.

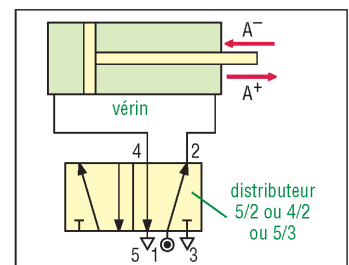
Avantages : liberté d'implantation ; rendent possible la collecte des échappements, l'utilisation d'un 4/2 à la place d'un 5/2 et l'association des distributeurs en platine.

Inconvénients : plus encombrant ; plus de raccords et de branchements.

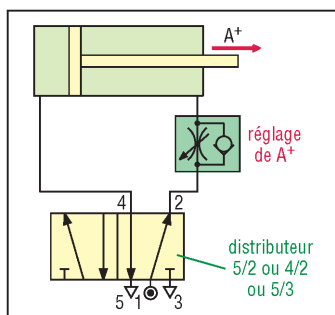
3. Différents types de régulation

a) Régulation à l'échappement : cette méthode est la plus utilisée. La régulation de la vitesse est obtenue par un régleur placé sur le circuit d'échappement. Cette solution engendre une contre-pression de régulation dans la chambre à l'échappement.

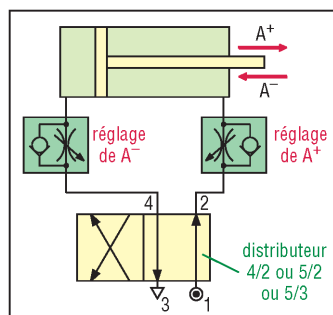
Exemple : contrôle de la descente d'une charge (fig. 27).



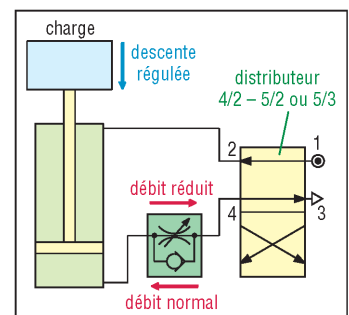
24. Sans régulation.



25. Régulation de la sortie A⁺.



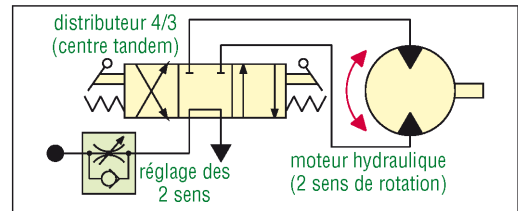
26. Régulation des deux.



27. Régulation de la descente.

b) Régulation à l'admission

La régulation est réalisée en contrôlant le débit de fluide entrant dans la chambre motrice. Rarement utilisée avec les vérins double effet, elle peut être une solution dans le cas des vérins simple effet et des moteurs hydrauliques.



28. Régulation de la vitesse d'un moteur hydraulique.

III - Distributeurs

Ils sont utilisés pour commuter et contrôler la circulation des fluides sous pression, comme des sortes d'aiguillage. Ils permettent de :

- contrôler le mouvement de la tige d'un vérin ou la rotation d'un moteur hydraulique ou pneumatique (distributeurs de puissance) ;
- choisir le sens de circulation d'un fluide (aiguiller, dériver, etc.) ;
- exécuter, à partir d'un fluide, des fonctions logiques (fonctions ET, OU, mémoire, etc.) ;
- démarrer ou arrêter la circulation d'un fluide (robinet d'arrêt, bloqueur...) ;
- être des capteurs de position (course d'un vérin).

1. Symbolisation : norme NF ISO 1219-1 (E 04-056)

a) Principe

Nombre de cases ou de boîtes : il représente le nombre de positions de commutation possibles, une boîte par position. S'il existe une position intermédiaire la case est délimitée par des traits pointillés.

Flèches : à l'intérieur des boîtes, elles indiquent le sens de circulation ou les voies de passage du fluide entre les orifices.

T et ⊥ : symbolisent des orifices fermés pour la position décrite.

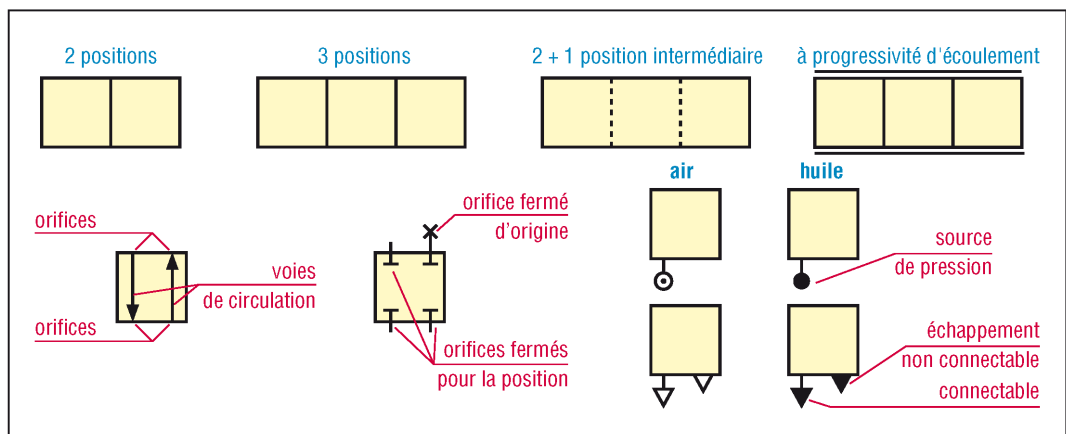
✕ : indique un orifice obstrué ou fermé d'origine.

Source de pression : elle est indiquée par un cercle noirci en hydraulique, avec un point en pneumatique.

Échappement : il est symbolisé par un triangle noirci en hydraulique, clair en pneumatique.

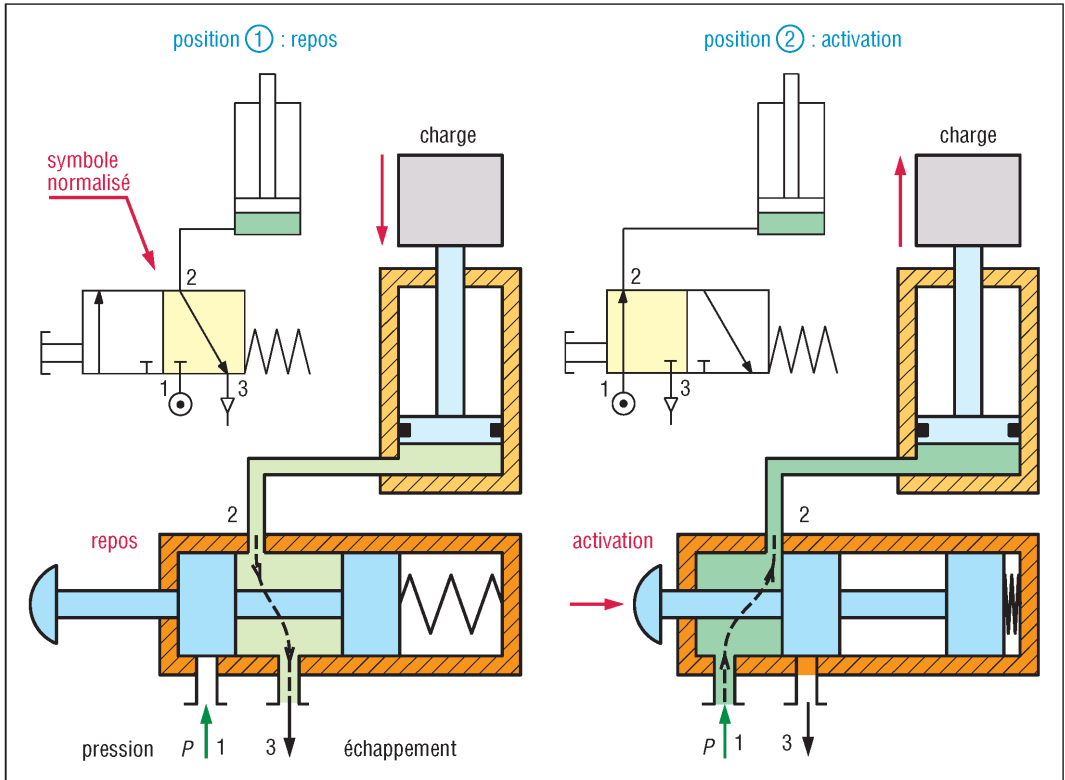
Un triangle accolé à la boîte signifie que l'air est évacué dans l'ambiance.

Un triangle décalé, au bout d'un trait, précise une évacuation possible à partir d'une canalisation connectable.



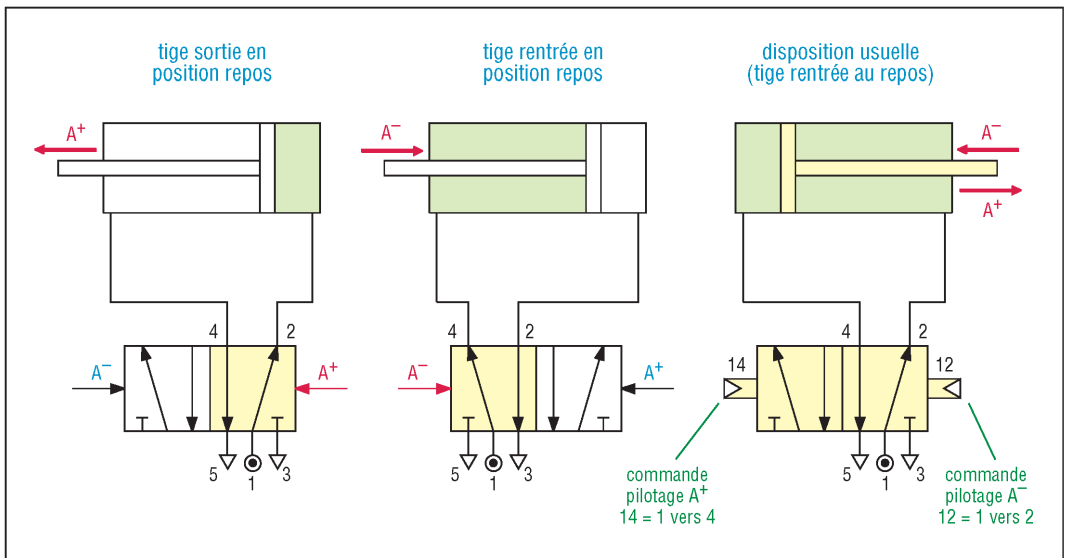
29. Principe de symbolisation des distributeurs.

Position initiale : les lignes de raccordement entre réseau et distributeur aboutissent toujours à la case symbolisant la position initiale ou repos ; cette case est placée à droite pour les distributeurs à deux positions, au milieu pour ceux à trois positions.
 Le symbole de la pression (cercle) est mis à droite de la case repos s'il n'y a qu'un échappement (triangle), au milieu s'il y a deux échappements.
 Les orifices sont repérés par des lettres en hydraulique et par des chiffres en pneumatique.



30. Exemple de représentation et symbolisation des positions repos et activation (distributeur 3/2).

Les voies de circulation à l'intérieur des cases dépendent de la position repos. Pour les schémas, choisir de préférence des tiges de vérins sortant de gauche à droite ou de bas en haut.

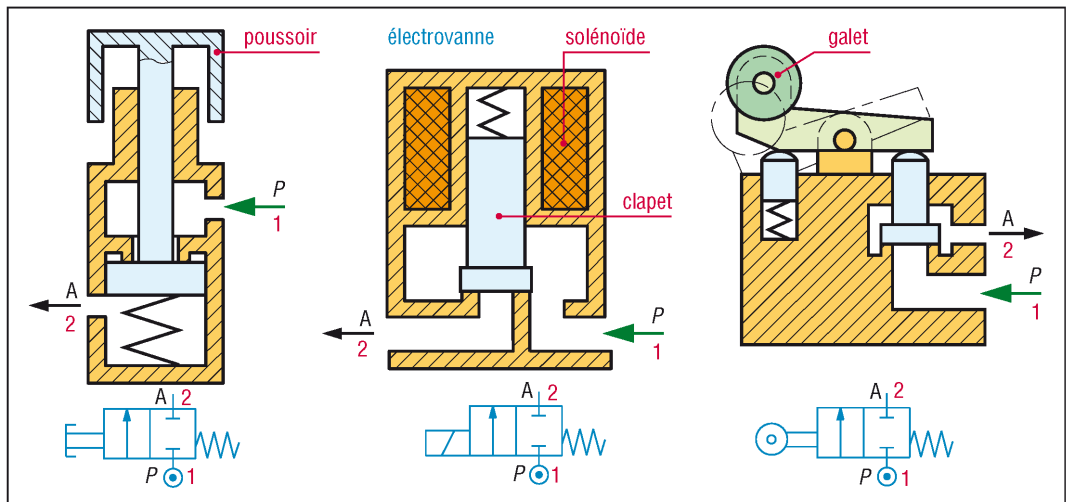


31. Les voies de circulation dans les cases dépendent de la position initiale.

b) Pilotage ou système de commande : ce dispositif réalise la commande du distributeur. Il doit être indiqué pour chaque position du distributeur et apparaître dans la symbolisation.

| Principaux distributeurs et principaux dispositifs de pilotage | | |
|--|---|---|
| symboles en pneumatique | symboles en hydraulique | symboles de pilotages |
| <p>2/2 N.F.</p> | <p>2/2 N.F.</p> | <p>(voir aussi page 607)</p> <p>manuelle générale</p> <p>poussoir</p> <p>pedale simple effet</p> <p>levier</p> <p>ressort de rappel</p> <p>poignée amovible</p> <p>poussoir à palpeur</p> <p>poussoir à course variable</p> <p>pedale double effet</p> <p>galet</p> <p>levier escamotable</p> <p>moteur pas à pas</p> |
| <p>2/2 N.O.</p> | <p>2/2 N.O.</p> | <p>1 enroulement agissant vers le composant</p> <p>1 enroulement agissant à partir du composant</p> <p>à 2 enroulements</p> <p>électroaimant + com. manuelle avec maintien</p> |
| <p>3/2 N.F.</p> | <p>3/2 N.F.</p> | |
| <p>3/2 N.O.</p> | <p>3/2 N.O.</p> | <p>pneumatique</p> <p>hydraulique</p> <p>pilotage électropneumatique</p> <p>pilotage électrohydraulique</p> <p>pilotage électrohyd. + centrage par ressort</p> |
| <p>4/2</p> | <p>4/3 centre fermé</p> <p>centre ouvert en H</p> <p>centre tandem</p> <p>centre partiellement ouvert</p> | |
| <p>5/2</p> | <p>5/3 centre ouvert</p> | |
| <p>5/3</p> | <p>1 (air) P (huile)</p> | |

32. Normalisation des principaux distributeurs et des dispositifs de pilotages correspondants : NF ISO 1291-1...



33. Exemples de distributeurs 2/2 NF (normalement fermé) avec pilotages différents (P et A pour l'hydraulique).

2. Désignation des distributeurs

Elle tient compte des points suivants : nombre d'orifices et nombre de positions, les distributeurs sont désignés par leur nombre d'orifices suivi du nombre de positions.

Exemple : 5/2 signifie distributeur à 5 orifices et 2 positions.

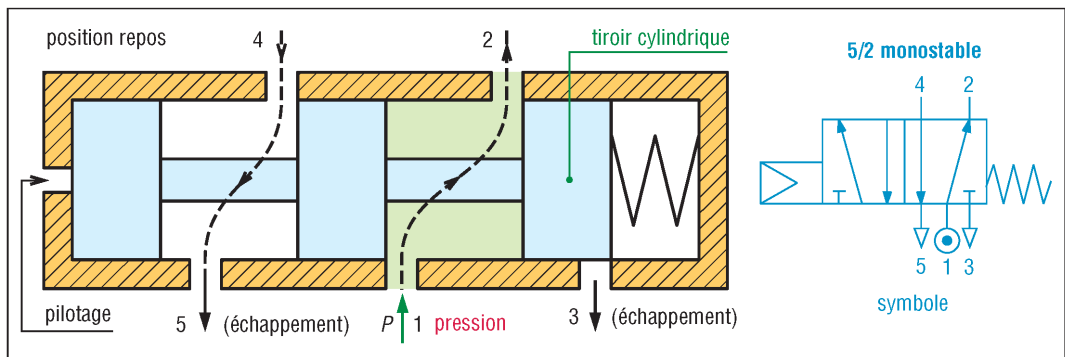
Distributeur normalement fermé (NF) : lorsqu'il n'y a pas de circulation du fluide à travers le distributeur en position repos (ou initiale), le distributeur est dit normalement fermé.

Distributeur normalement ouvert (NO) : c'est l'inverse du cas précédent ; au repos, il y a circulation du fluide à travers le distributeur.

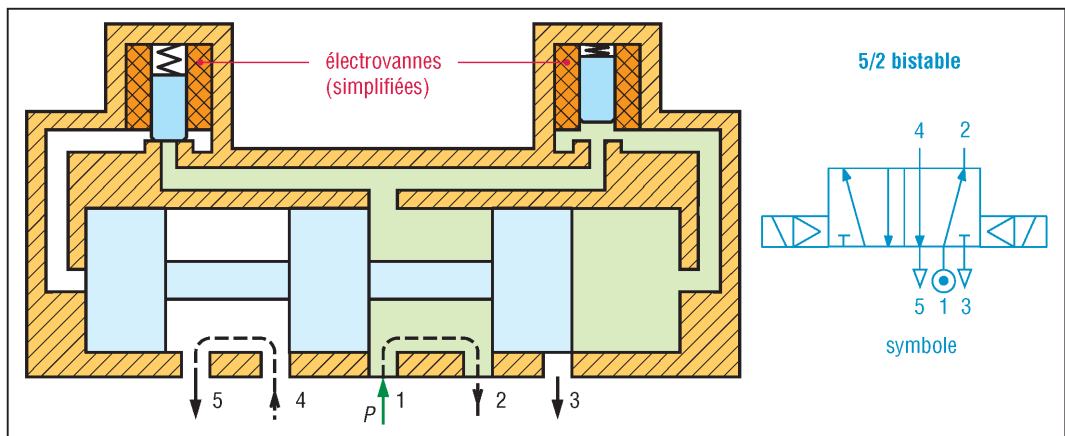
Distributeur monostable : distributeur ayant une seule position stable. Dans ce type de construction, un ressort de rappel ramène systématiquement le dispositif dans sa position initiale, ou repos, dès que le signal de commande ou d'activation est interrompu.

Distributeur bistable : admet deux positions stables ou d'équilibre. Pour passer d'une position à une autre, une impulsion de commande ou de pilotage suffit pour provoquer le changement. Le maintien en position est assuré par adhérence ou par aimantation.

Leur fonctionnement peut être comparé à celui d'une mémoire à deux états : 1 ou 0, oui ou non.



34. Exemple de réalisation simplifiée d'un distributeur 5/2 monostable (pression et pilotage : air comprimé).

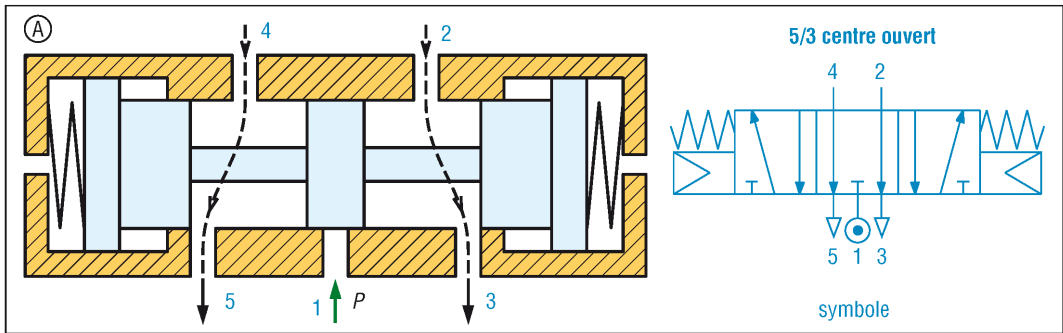
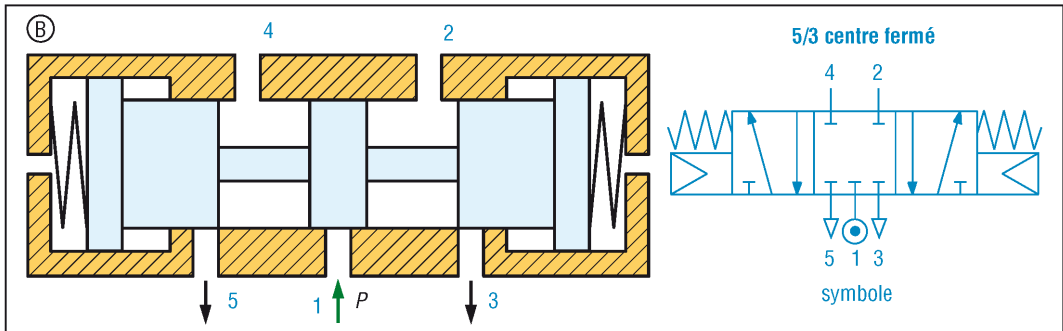


35. Exemple simplifié d'un distributeur 5/2 bistable commandé par électrovannes (air comprimé).

Centre fermé, pour 4/3 et 5/3 : en position neutre ou repos à centre fermé, le fluide ne peut pas circuler entre les chambres et les échappements, ce qui bloque la tige ou l'arbre moteur. Il est intéressant pour un redémarrage sous charge (**exemple** : charges suspendues, etc.).

Centre ouvert, pour 4/3 et 5/3 : en position neutre, à centre ouvert, le fluide peut circuler librement. La purge des chambres et la libre translation de la tige (libre rotation de l'arbre moteur) sont ainsi possibles. Ce cas est intéressant pour supprimer les efforts développés et faire des réglages (**exemple** : fig. 36).

Remarque : pour les 4/3 et 5/3 il existe d'autres types de centre : tandem...

36. Dessin simplifié d'un distributeur 5/3 à centre ouvert (pression P et pilotage : air comprimé).

37. Dessin simplifié d'un distributeur 5/3 à centre fermé.

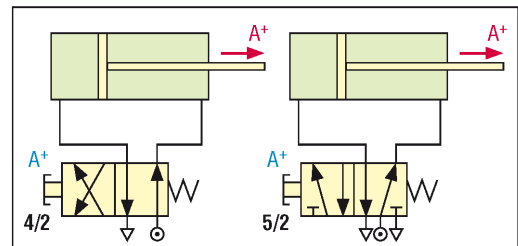
3. Choix d'un type de distributeur

Avec un vérin simple effet, on peut utiliser un 3/2 en pneumatique, un 4/3 avec un orifice fermé en hydraulique. Les 5/3 sont employés avec les moteurs pneumatiques...

Avec un vérin double effet pneumatique, on peut utiliser un 4/2, un 5/2 ou un 5/3. En hydraulique les 4/3 sont les plus utilisés. Il en existe de très nombreuses variantes.

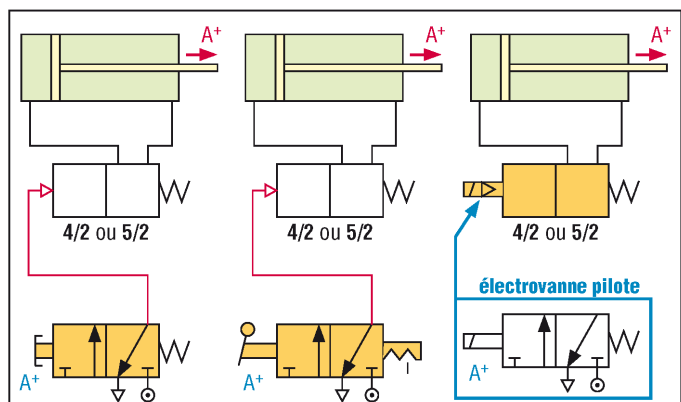
4. Choix de la commande ou du pilotage

a) Commande directe : la commande est implantée sur le distributeur de puissance. La figure 38 donne un exemple avec distributeurs monostables. L'activation manuelle du poussoir entraîne la sortie de la tige. Dès que le poussoir est relâché, le ressort remet aussitôt le distributeur en position initiale, entraînant le retour de la tige.



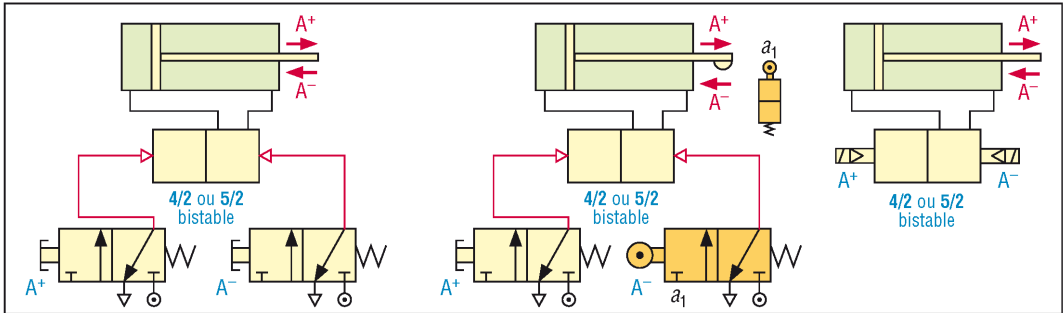
38. Exemple de commandes directes.

b) Commande indirecte ou à distance : la commande est implantée à distance du distributeur de puissance. La figure 39 montre un exemple. La sortie complète de la tige exige un signal toujours maintenu : poussoir constamment appuyé, levier enclenché et verrouillé, électrovanne toujours alimentée. Dès que le signal est interrompu on revient en position initiale.



39. Exemples de commandes à distance.

c) Commande directe ou indirecte par impulsion : lorsque les distributeurs sont bistables, il suffit d'une seule impulsion de pilotage pour changer le sens du mouvement. Chaque distributeur de puissance fonctionne comme une mémoire et reste en l'état tant qu'une nouvelle impulsion n'est pas envoyée. Exemples figure 40 : a_1 est un distributeur 3/2 utilisé en capteur de position.



40. Exemple de commande par impulsion.

5. Détermination du débit d'air traversant un distributeur - Facteur K_v

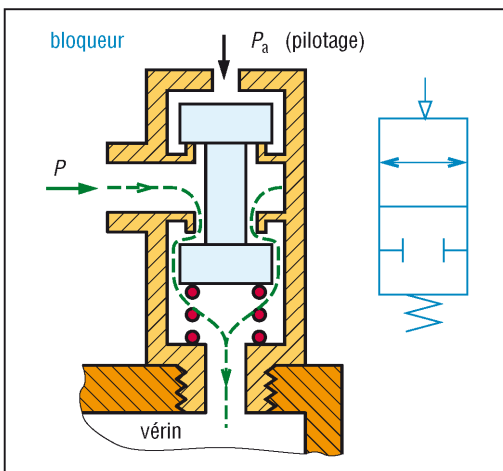
C'est une caractéristique essentielle. Le débit doit être suffisant pour remplir les chambres du vérin, ou du moteur, à la cadence voulue. Il dépend des caractéristiques de celui-ci : diamètre D , course C , temps de course, pression d'alimentation et taux de charge.

Facteur K_v : très utilisé, il permet de déterminer le distributeur à associer à un vérin et exprime le débit d'eau en litres (dm^3) par minute traversant le distributeur sous une perte de charge de 1 bar (différence de pression amont/aval de 1 bar). Le K_v peut être exprimé en m^3/s .

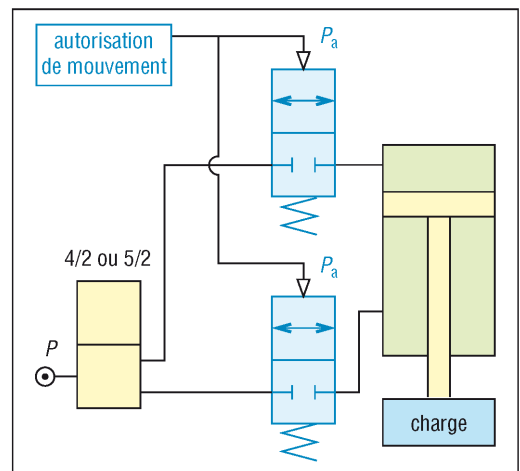
Les fabricants proposent des abaques pour déterminer le K_v .

IV - Distributeurs spécialisés

a) Bloqueurs 2/2 : distributeurs 2/2 (sortes de robinets d'arrêt) monostables, pilotés à distance, associés aux distributeurs 4/2 ou 5/2, ils réalisent le blocage de la tige notamment dans le cas d'un arrêt d'urgence ou de réglage. Dès que la pression de pilotage (P_a) disparaît, suite à une coupure accidentelle de la pression d'alimentation, le piston du bloqueur remonte et emprisonne l'air contenu dans la chambre du vérin.



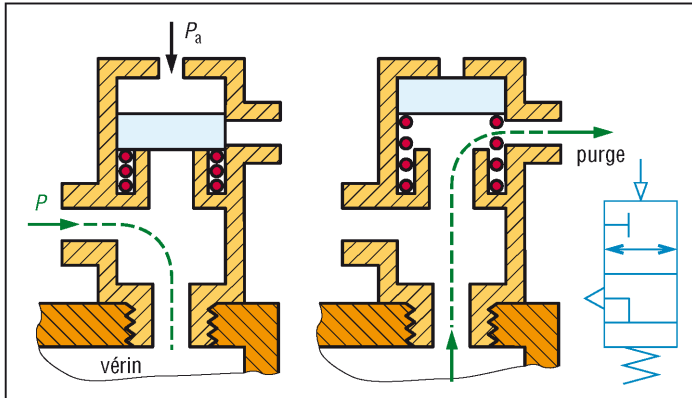
41. Principe d'un bloqueur 2/2 (pneumatique).



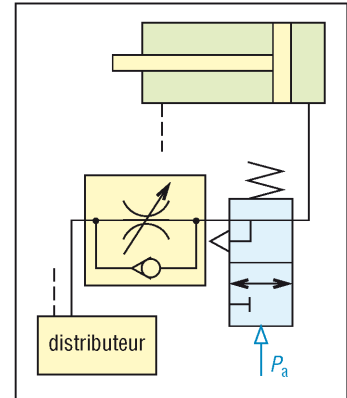
42. Exemple d'implantation de bloqueurs.

b) Sectionneurs avancés : ce sont des 3/2 monostables pilotés à distance. À la différence des bloqueurs, la coupure de la pression de pilotage (P_a) purge ou vidange le circuit d'air, supprimant ainsi les efforts développés. La tige du vérin est ainsi libre de se déplacer, ce qui est intéressant pour des réglages et certains arrêts d'urgence.

Règle : un sectionneur avancé doit être placé entre le vérin et le régulateur de vitesse associé.



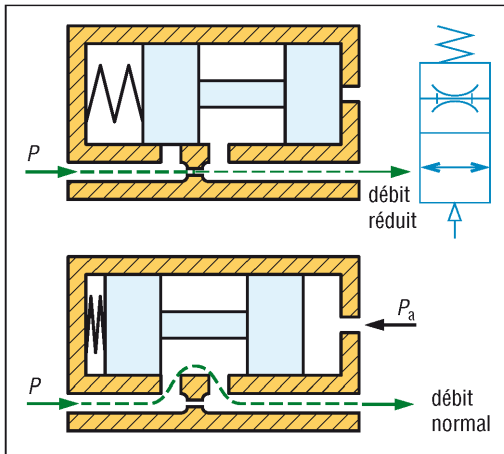
43. Exemple de sectionneur avancé.



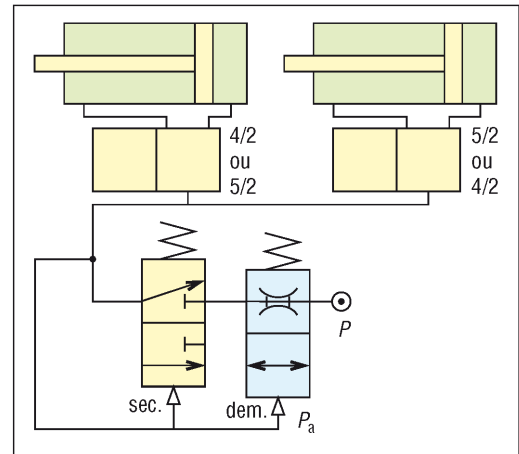
44. Exemple d'implantation.

c) Sectionneur général : c'est un sectionneur particulier installé en série avec un groupe de distributeurs pour purger ou vider en même temps plusieurs vérins.

d) Démarreur progressif : il est le complément optionnel d'un sectionneur général et permet la remise en route progressive et sans à-coup d'un circuit après purge. Le débit dans le circuit reste réduit tant que la pression n'a pas retrouvé un niveau suffisant.



45. Exemple de démarreur progressif.

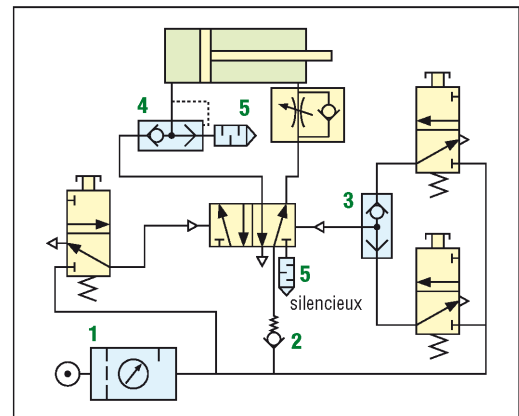


46. Implantation avec sectionneur général et démarreur.

V - Principaux accessoires

La figure 47 montre un exemple de circuit utilisant certains de ces accessoires.

Les silencieux (repères 5) placés sur les échappements, sont utilisés pour réduire le bruit.

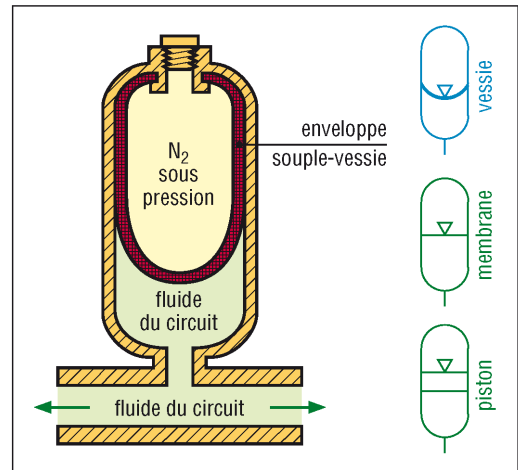


47. Exemple de circuits.

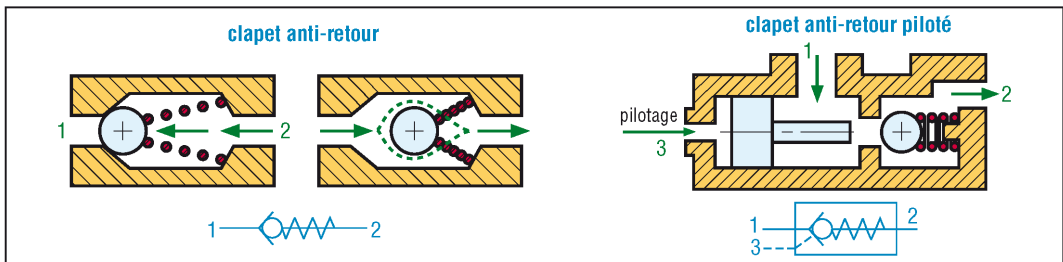
a) Accumulateur : réservoir de fluide sous pression disponible en permanence, il régularise la demande (réserve tampon). L'enveloppe souple, vessie gonflée avec de l'azote, emmagasine ou restitue à tout moment l'énergie transmise par le fluide.

Utilisations : accumulateur d'énergie ; anti-bélier ; amortisseur ; compensateur ; source auxiliaire...

b) Clapets anti-retour : ils n'autorisent le déplacement du fluide que dans un seul sens. Plusieurs technologies sont possibles. Les versions pilotées autorisent une circulation en sens inverse en cas d'activation.

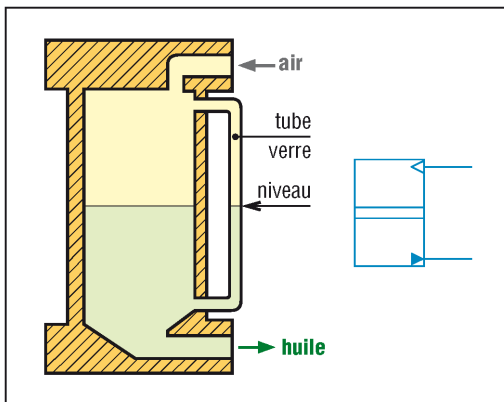


48. Dessin simplifié d'un accumulateur à vessie.

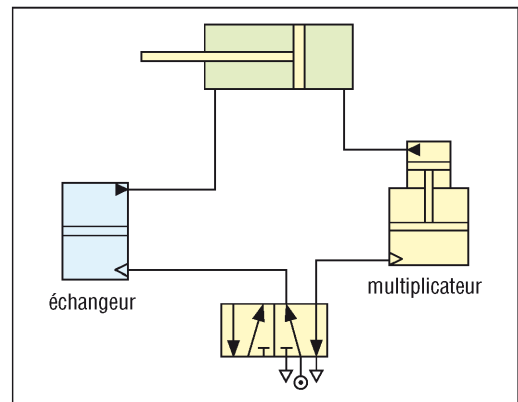


49. Clapet anti-retour à ressort et clapet anti-retour à écoulement possible dans les 2 sens.

c) Échangeur air-huile : il permet, dans un circuit pneumatique, d'utiliser un vérin hydraulique à la vitesse plus régulière (plus facile à réguler). Un échangeur alimente une seule chambre de vérin et la poussée obtenue est la même que si l'air comprimé était appliqué sur le piston.



50. Échangeur air-huile.



51. Implantation avec échangeur et multiplicateur de pression.

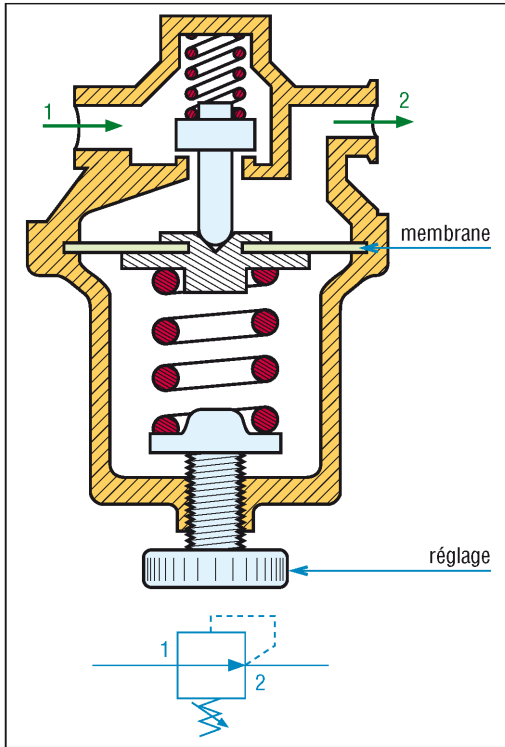
d) Régulateur de pression : il limite, règle et régule la pression dans un circuit. Le tarage est obtenu par un ressort réglable (fig. 52).

e) Sélecteur de circuit : il oriente le fluide dans une direction ou une voie donnée. Il peut être remplacé par une cellule logique OU (fig. 53).

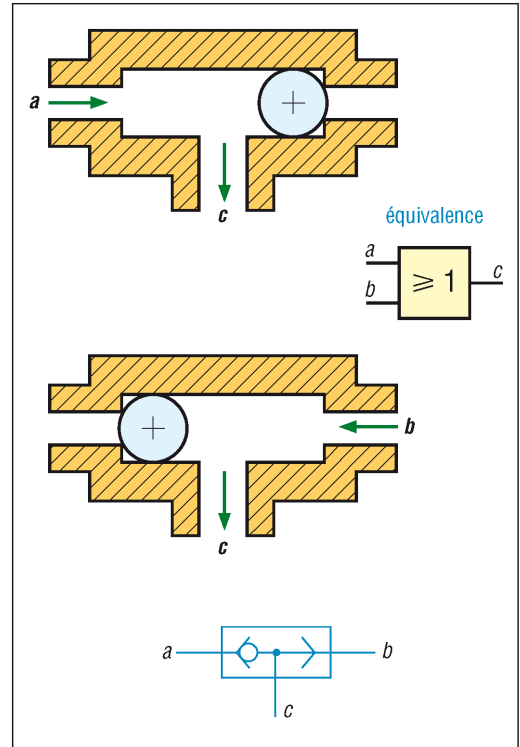
f) Soupape d'échappement rapide : elle réalise une vidange ou une purge plus rapide de l'une des chambres d'un vérin pneumatique (fig. 54).

g) Unité de conditionnement : c'est le démarrage de tout circuit pneumatique. Elle traite l'air utilisé. La partie filtre enlève la poussière et l'eau, la partie régulateur permet d'ajuster la pression à un niveau souhaité et la partie lubrificateur lubrifie l'air avant utilisation (fig. 55).

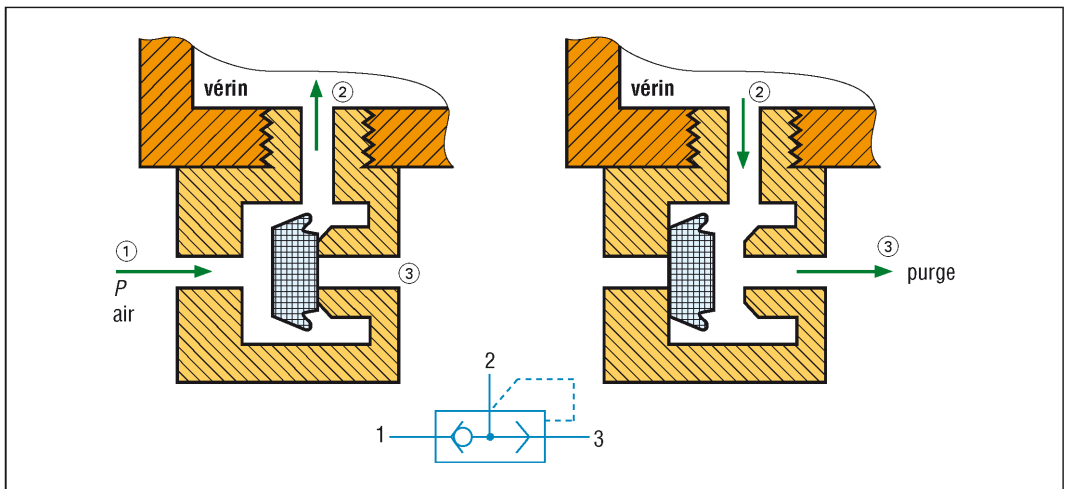
h) Venturi : le rétrécissement dans le sens de circulation permet de créer une dépression ($p_2 < p_1$) dans l'étranglement (phénomène de Venturi). Cette dépression peut être utilisée pour aspirer un fluide (pompe à vide) (fig. 56).



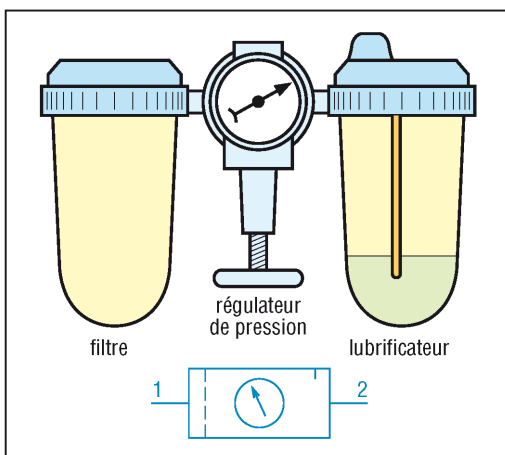
52. Régulateur de pression.



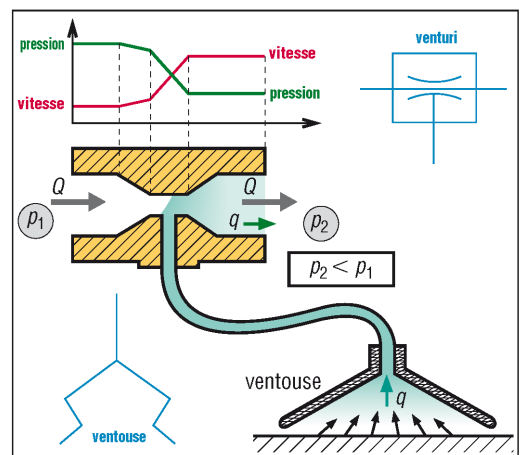
53. Sélecteur de circuit.



54. Soupape d'échappement rapide.



55. Unité de traitement de l'air comprimé.

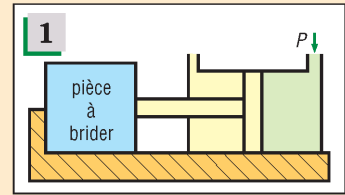


56. Venturi associé à une ventouse.

VI - Exercices

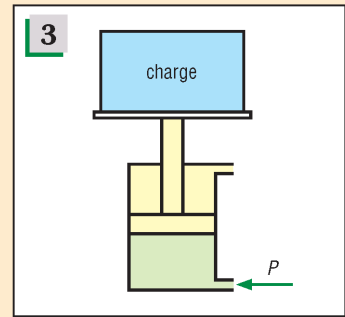
Exercice 1

L'effort de serrage que doit exercer le vérin de bridage est de 6500 N. Si le diamètre d'alésage D est de 125 mm, déterminer la pression théorique nécessaire. Que devient cette pression s'il existe un frottement engendrant des pertes de 5% ?



Exercice 2

Calculer les efforts théoriquement développables, en poussant et en tirant, d'un vérin ($D = 100$ et $d = 25$) si la pression d'utilisation est de 500 kPa (5 bars). Refaire la question si les pertes par frottements sont de 12%.



Exercice 3

La masse de la charge à soulever est de 700 kg ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Les pertes par frottements internes sont estimées à 12%, la pression d'alimentation en air est de 600 kPa (6 bars). Si les forces d'inertie et la contre-pression sont négligées, déterminer le diamètre du piston.

Exercice 4

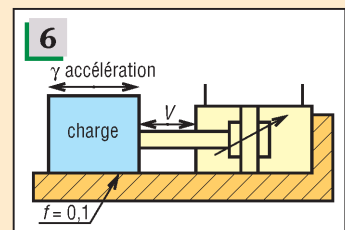
Déterminer le diamètre d'un vérin capable de soulever une charge de 100 daN lorsque la pression d'air utilisée est de 700 kPa (7 bars) et le taux de charge de 0,7.

Exercice 5

Calculer la consommation d'air (débit par minute) d'un vérin de diamètre $D = 80$ mm (diamètre de tige 22 mm) et d'une course de 400 mm. 5 cycles (aller/retour) par minute sous une pression de 600 kPa (6 bars).

Exercice 6

La course d'accélération de la masse (800 kg) est de 10 mm dans les deux sens, puis la vitesse reste constante à 0,50 m/s. Le frottement entre la charge et le support est $f = 0,10$. La pression de l'air du système est de 600 kPa (6 bars). Déterminer le diamètre du piston.

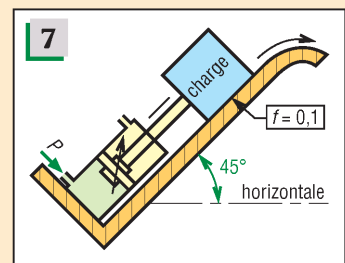


Exercice 7

La course d'amortissement de la charge de 150 kg est de 30 mm pour une pente de 45° (vitesse de translation 0,6 m/s, pression d'utilisation 600 kPa). La course d'accélération est supposée identique à la course d'amortissement. Les pertes par frottement sont évaluées à 12%.

a) Déterminer la charge totale : effort de levage + forces de frottement + force dynamique due à l'accélération.

b) En déduire le diamètre du piston.



42

SYSTÈMES AUTOMATISÉS LOGIQUES

OBJECTIFS

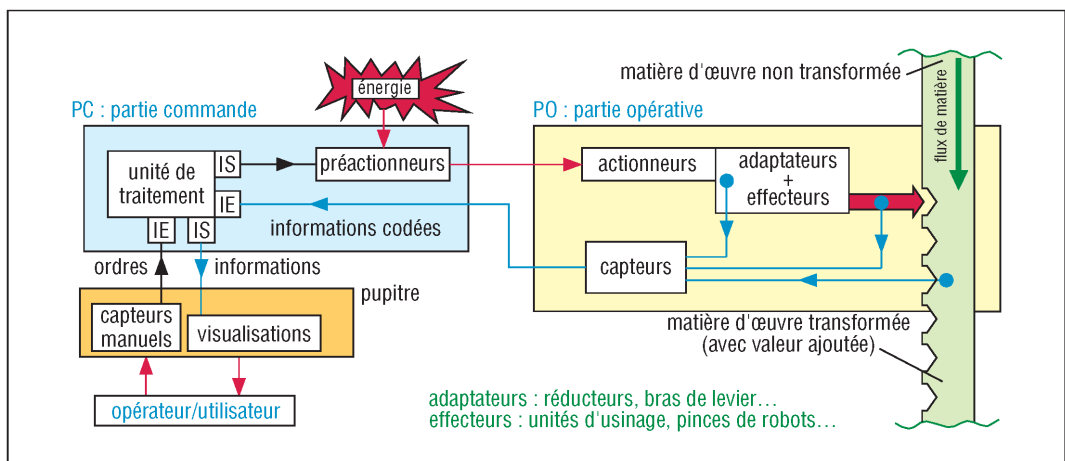
- Donner les fondements des systèmes automatisés logiques et décrire quelques méthodes universelles.
- Proposer des exercices d'application.

La plupart des notions développées dans ce chapitre (signal numérique, signal analogique, algèbre de Boole, table de vérité, équation et circuits logiques, opérateurs ou portes logiques, tableaux de Karnaugh, schémas à contacts, chronogrammes, mémoires, bascules, temporisations) sont des notions fondamentales et universelles, étudiées et utilisées de la même manière par tous les pays industrialisés.

I - Généralités

1. Structure générale d'un système automatisé

Un système automatisé se compose d'une partie commande (unité de traitement et préactionneurs), une partie opérative (actionneurs, capteurs et matière d'œuvre) et un pupitre (boutons de commandes divers, signalisations, alarmes, écrans, etc.) permettant le dialogue avec les opérateurs.



1. Structure générale d'un système automatisé.

a) Unité de traitement : c'est le cerveau de l'automatisme. Les interfaces (IE = interfaces d'entrée, IS = interfaces de sortie) sont employés pour l'échange des données avec les autres éléments ainsi que la protection de l'unité.

Exemples : ordinateur ; processeur ou microprocesseur ; automate programmable (API) ; séquenceurs.

b) Actionneurs : ce sont les muscles et les mains. Ils reçoivent leur énergie (électricité, air comprimé, etc.) par l'intermédiaire des préactionneurs.

Exemples : vérins ; moteurs ; robots ; vannes ; électro-aimants.

c) Préactionneurs : ils représentent les gares de triage de l'énergie. Celle-ci est canalisée vers les actionneurs sur ordre de l'unité de traitement.

Exemples : distributeurs ; contacteurs.

d) Capteurs : c'est le service de surveillance et de renseignement. Ils contrôlent, mesurent, surveillent et informent l'unité de traitement sur l'état et l'évolution de l'automatisme.

Exemples : interrupteurs de position ; détecteurs de proximité ; compteurs ; systèmes de pesage ; manomètres ; thermomètres ; dynamomètres.

2. Principales catégories de systèmes automatisés

a) Système automatisé combinatoire : à une combinaison des entrées correspond une seule combinaison des sorties (logique combinatoire). Ces systèmes n'utilisent aucun mécanisme de mémorisation ; ils n'ont pas de mémoire. Les outils utilisés pour les concevoir sont l'algèbre de Boole, les tables de vérité, les tableaux de Karnaugh.

b) Système logique séquentiel : le déroulement s'effectue étape par étape, séquence par séquence. Pour ces systèmes, à une situation des entrées peuvent correspondre plusieurs situations de sortie. La sélection d'une sortie ou d'une autre dépend de la situation antérieure du dispositif (étape précédente). Les mécanismes de mémorisation, ou mémoires, sont à la base de la logique séquentielle.

Le GRAFCET est en France l'un des principaux outils de conception de ces systèmes (voir chapitre 43 : GRAFCET).

c) Système asservi : dans ce système, on désire que la sortie suive avec précision les variations de l'entrée et ceci avec un temps de réponse réduit. Voir chapitre 44 page 531.

Exemples : direction assistée d'automobile ; distributeur proportionnel.

3. Signal numérique et signal analogique

a) Signal numérique, ou digital : il a pour base deux états logiques (marche ou arrêt, oui ou non, etc.) représentés par les chiffres 1 ou 0.

Exemples : montre digitale ; données des systèmes informatiques et téléphoniques ; compact disque ; cassette numérique...

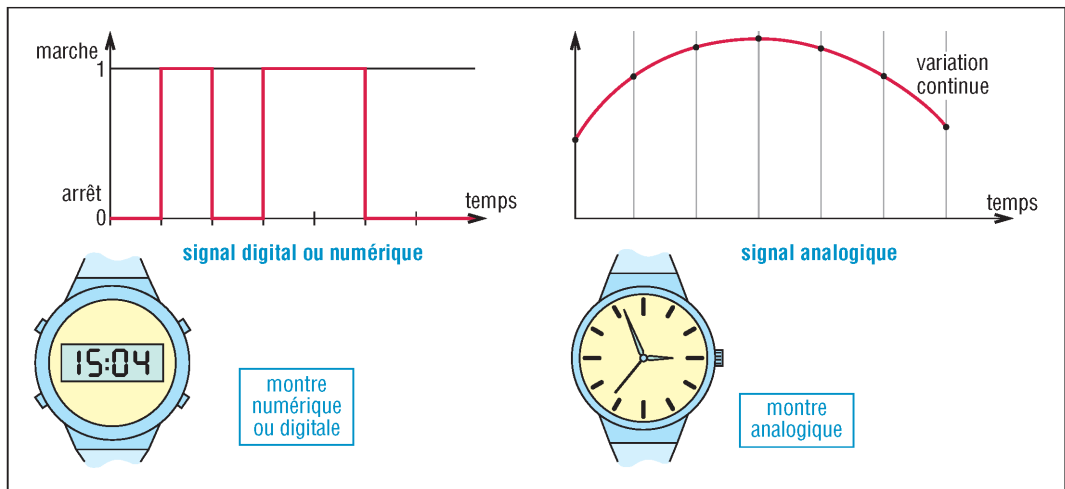
| Niveau logique 0 | Niveau logique 1 |
|------------------|------------------|
| faux | vrai |
| non | oui |
| arrêt | marche |
| ouvert | fermé |
| bas | haut |
| off | on |
| rien | tout |
| mauvais | bon |
| } = 0 | } = 1 |

2. Exemple de niveaux logiques 0 et 1.

b) Signal analogique : si à une grandeur d'entrée, ou signal, on fait correspondre une grandeur de sortie qui lui est directement proportionnelle (allure analogue), la grandeur de sortie est dite analogique.

Les grandeurs analogiques varient de façon continue à l'intérieur d'une gamme ou d'un intervalle de valeurs.

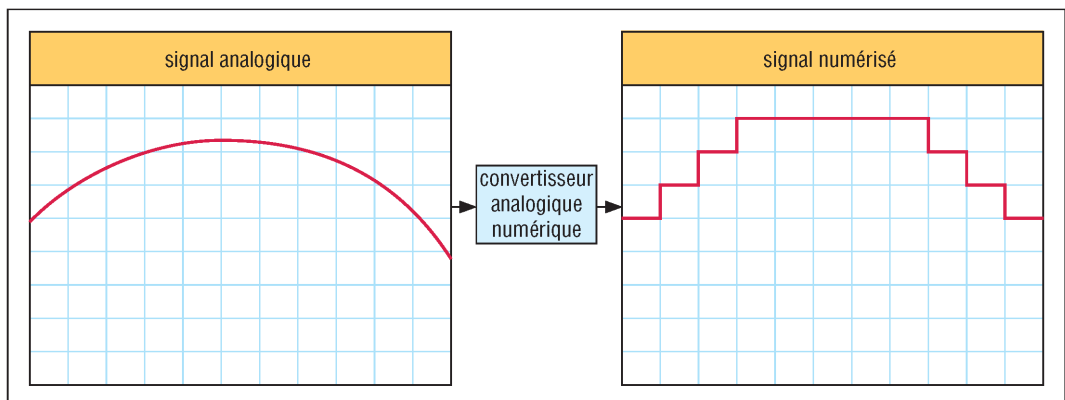
Exemples : position (angle de rotation) de l'aiguille d'un compteur de vitesse d'automobile proportionnelle à la vitesse du véhicule ; montre analogique à aiguilles ; microphone ; thermostat à bilame.



3. Signaux analogiques et numériques.

Remarques :

- Les signaux numériques sont plus faciles à exploiter par les systèmes informatiques usuels, qui sont eux-mêmes basés sur des données ou des codes numériques. De plus, et contrairement aux informations analogiques, ils permettent de transférer des données sans distorsion ou brouillage.
- Afin de rendre un signal analogique exploitable (par un système informatique...) on utilise un convertisseur analogique numérique qui échantillonne le signal suivant des intervalles réguliers et le convertit en un signal numérisé. L'opération inverse est également possible au moyen d'un convertisseur numérique analogique.



4. Principe du convertisseur analogique numérique.

II - Algèbre de Boole

C'est la logique utilisée par les ordinateurs, les automates, les systèmes automatisés pour manipuler les données, les informations et les signaux reçus ou émis.

La logique de Boole repose sur une variable binaire (ou signal numérique) pouvant avoir uniquement deux valeurs qui sont 0 ou 1. Cette variable est employée pour représenter des états très divers : vrai ou faux, haut ou bas, etc.

Remarque :

lorsque les systèmes automatisés deviennent complexes (grand nombre d'entrées et de sorties, utilisation de temporisations, mémoires, compteurs, etc.) l'algèbre de Boole n'est plus envisageable. Les automatismes sont alors définis, décrits et expliqués plus facilement à partir des diagrammes logiques (GRAFSET, etc.).

| Algèbre de Boole | | | | | |
|------------------------------------|------------------------|---|----------------------------|---|--|
| propriétés de la somme | | propriétés du produit | | négation | |
| $0 + 0 = 0$ | $a + 1 = 1$ | $0 \cdot 0 = 0$ | $a \cdot 1 = a$ | $\overline{\overline{0}} = 1$ | |
| $0 + 1 = 1$ | $a + 0 = a$ | $0 \cdot 1 = 0$ | $a \cdot 0 = 0$ | $\overline{\overline{1}} = 0$ | |
| $1 + 0 = 1$ | $a + a = a$ | $1 \cdot 0 = 0$ | $a \cdot a = a$ | $\overline{\overline{a}} = a$ | |
| $1 + 1 = 1$ | $a + \overline{a} = 1$ | $1 \cdot 1 = 1$ | $a \cdot \overline{a} = 0$ | | |
| commutativité | | associativité | | distributivité | |
| $a \cdot b = b \cdot a$ | | $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$ | | $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$ | |
| $a + b = b + a$ | | $a + (b + c) = (a + b) + c$ | | $(a + b) \cdot (c + d) = ac + ad + bc + bd$ | |
| propriétés combinées | | | | théorème de Morgan | |
| $a \cdot (a + b) = a$ | | $(a + b) \cdot (a + \overline{b}) = a$ | | $\overline{a + b + c} = \overline{a} \cdot \overline{b} \cdot \overline{c}$ | |
| $a + a \cdot b = a$ | | $(a + b) \cdot (a + c) = a + b \cdot c$ | | $\overline{a \cdot b \cdot c} = \overline{a} + \overline{b} + \overline{c}$ | |
| $a + \overline{a} \cdot b = a + b$ | | $(a + b) \cdot (\overline{a} + c) = a \cdot c + \overline{a} \cdot b$ | | | |

5. Algèbre de Boole : concepts.

III - Table de vérité et équation logique

Une fois définies les variables d'un processus (entrées venant de capteurs, sorties vers des actionneurs, etc.), la table de vérité est un outil permettant de décrire les rapports ou relations existant, ou non, entre ces variables.

Les variables et leurs valeurs possibles sont inscrites sous forme de tableau ou table (variables d'entrée dans des colonnes côté gauche et variables de sortie correspondantes côté droit).

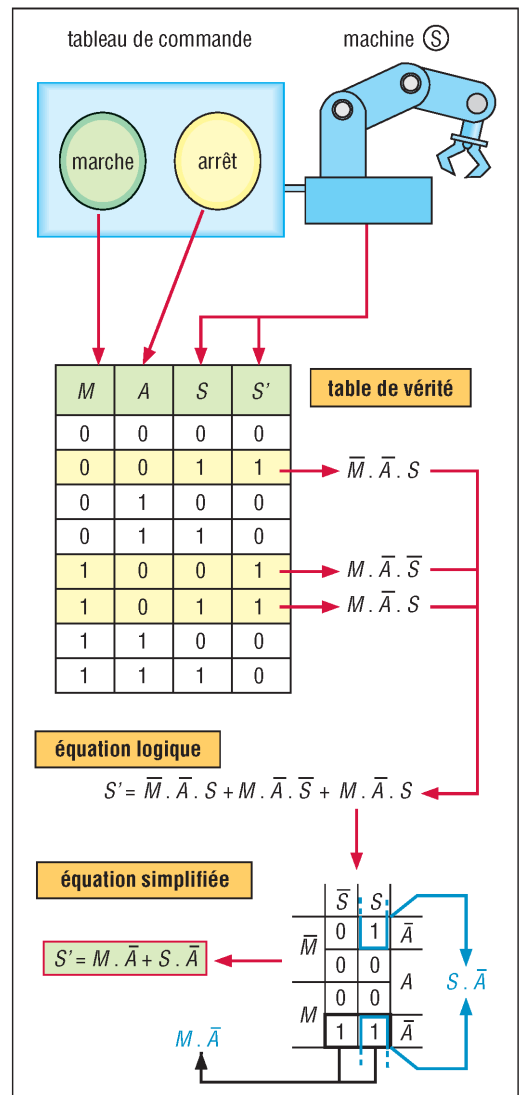
Exemple : la machine ou le processus repéré S est mis en marche ou arrêté par deux boutons séparés à deux positions : une position enfoncée, une position relâchée (fig. 6).

Variables d'entrée :

- M pour le bouton marche (M = 1 bouton enfoncé, M = 0 bouton relâché).
- A pour le bouton arrêt (A = 1 bouton enfoncé, A = 0 bouton relâché).
- S pour l'état initial de la machine (S = 1 machine en marche, S = 0 machine à l'arrêt).

Variable de sortie :

S' pour l'état final de la machine (S' = 1 machine en marche, S' = 0 machine à l'arrêt). S' devient S à chaque nouvelle commande. Seul le bouton d'arrêt A peut stopper la machine, le relâchement de M ne le peut pas (explique la deuxième ligne de la table). De même, l'arrêt est prioritaire sur la mise en marche (explique les deux dernières lignes de la table).



6. Table de vérité et équation logique.

IV – Simplification des expressions booléennes

Une simplification est nécessaire pour diminuer le nombre et la nature des opérateurs (paragraphe V) des équations logiques et par là les équipements indispensables aux applications.

1. Simplification par la méthode algébrique

La simplification est obtenue par calcul algébrique en utilisant les propriétés et les équations caractéristiques de l'algèbre de Boole.

Exemple 1 : cas de l'équation logique de l'exemple de la page 510.

$$\begin{aligned} S &= \overline{M}.A.S + M.A.\overline{S} + M.A.S = \overline{M}.A.S + M.A.(S + \overline{S}) \\ &= \overline{M}.A.S + M.A = \overline{A}.(M.S + M) = \overline{A}.(M + S) = \overline{A}.M + \overline{A}.S \end{aligned}$$

Exemple 2 :

$$\begin{aligned} S &= \overline{A}.B.\overline{C} + \overline{A}.B.C + A.B.\overline{C} + A.B.C = \overline{A}.B.(C + \overline{C}) + A.B.(C + \overline{C}) \\ &= \overline{A}.B + A.B = B.(A + \overline{A}) = B \end{aligned}$$

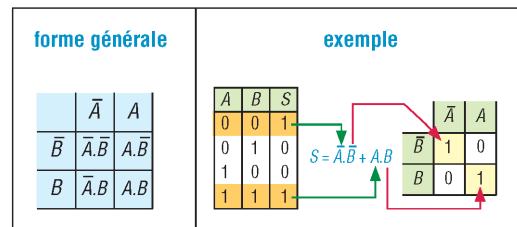
2. Simplification à partir des tableaux de Karnaugh (ou diagrammes K)

Ces tableaux sont intéressants pour simplifier les équations logiques ayant au plus quatre variables dont la forme est constituée d'un ensemble de produits ; c'est le cas d'une équation écrite à partir d'une table de vérité.

L'application est méthodique et se fait par étapes bien définies. Elle est plus rapide que la méthode algébrique, fonctionnant par approximations successives, dans le cas d'expressions à plusieurs termes et donne toujours l'expression minimale.

a) Principe : les tables de vérité donnent la valeur de sortie de chaque combinaison des variables d'entrées, ligne par ligne. À chaque case d'un tableau de Karnaugh correspond une ligne de la table de vérité associée avec le même nombre de lignes et de cases. Si la sortie de la ligne est à 1 la case de Karnaugh associée est aussi à 1.

b) Simplification : elle est possible chaque fois que deux cases à 1 sont adjacentes ou ont un côté commun, ce qui élimine une entrée commune aux 2 cases.

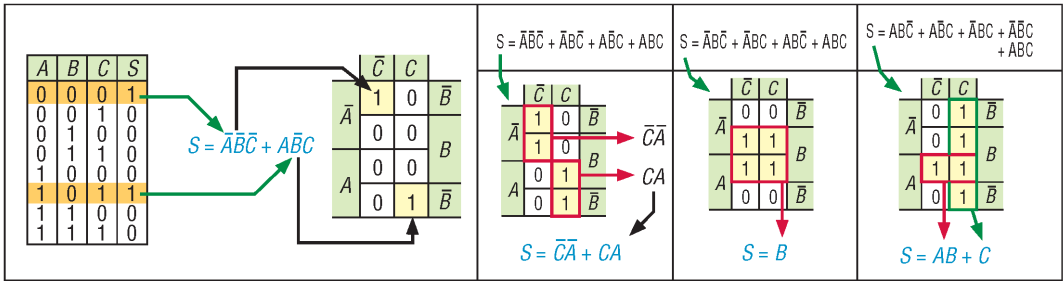


7. Karnaugh à deux variables.

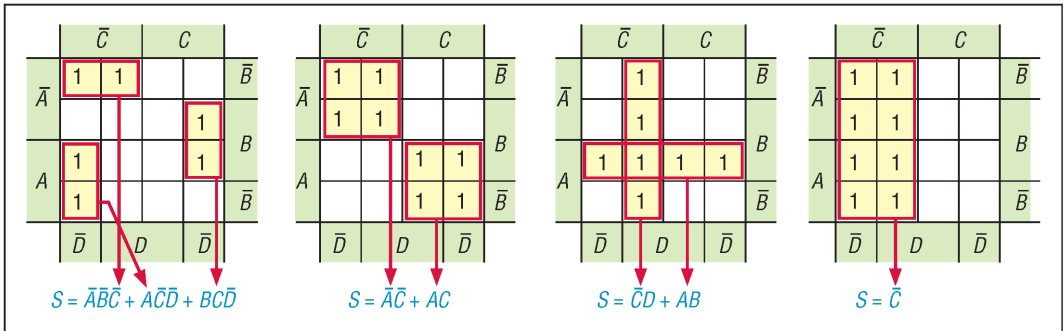
| Tableaux de Karnaugh : simplification | | | | | |
|---------------------------------------|--|--------------------------|---|-------------------------------------|---|
| équation à simplifier | $S = \overline{A}\overline{B} + A\overline{B}$ | $S = A\overline{B} + AB$ | $S = \overline{A}\overline{B} + A\overline{B} + AB$ | $S = \overline{A}\overline{B} + AB$ | $S = \overline{A}\overline{B} + \overline{A}B + A\overline{B} + AB$ |
| Karnaugh correspondant | | | | | |
| équation simplifiée | $S = \overline{B}$ | $S = A$ | $S = \overline{B} + A$ | non simplifiable | $S = 1$ |

8. Principe de simplification à partir des tableaux de Karnaugh dans le cas de deux variables.

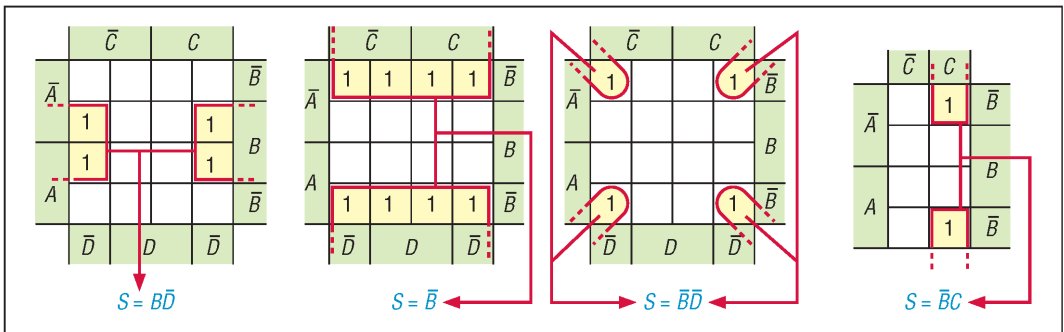
On simplifie également lorsque les cases à 1 peuvent être groupées en carré ou en ligne de 4 ; on élimine 2 entrées communes. La remarque est la même pour les groupements de 8 cases ; on élimine 3 entrées communes. Les groupements de cases peuvent aussi être réalisés sur les côtés des tableaux qui peuvent être assimilés à des cylindres.



9. Karnaugh à trois variables.



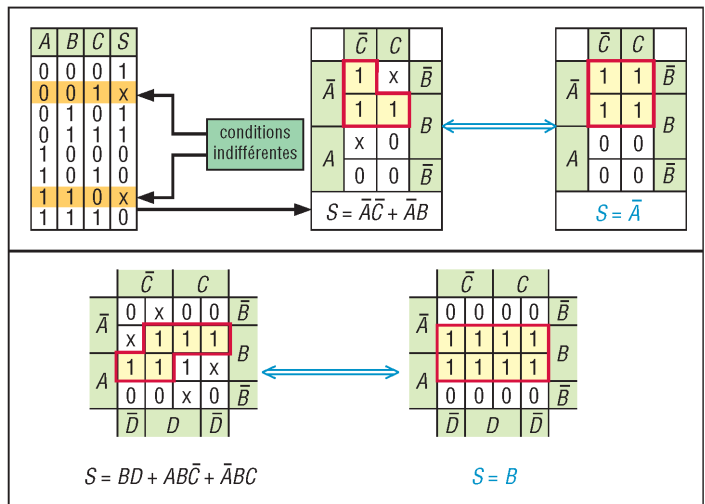
10. Karnaugh à quatre variables.



11. Karnaugh à trois et quatre variables, cas des côtés de tableaux.

c) Cas des conditions

indifférentes : il arrive que certaines combinaisons des entrées ne correspondent à aucun cas de fonctionnement du dispositif ; par exemple, un cas ne pouvant jamais se produire. La lettre X peut être utilisée dans les tables de vérité et dans les diagrammes de Karnaugh pour décrire ces cas. Dans la mesure où ces cas sont indifférents ou sans effet, ils peuvent être mis à 0 ou à 1 (X = 0 ou 1) selon les besoins de la simplification.



12. Karnaugh à trois et quatre variables avec conditions indifférentes.

V - Opérateurs, fonctions ou portes logiques de base

Ils permettent de manipuler les variables booléennes précédentes et de réaliser les diverses opérations de l'algèbre de Boole.

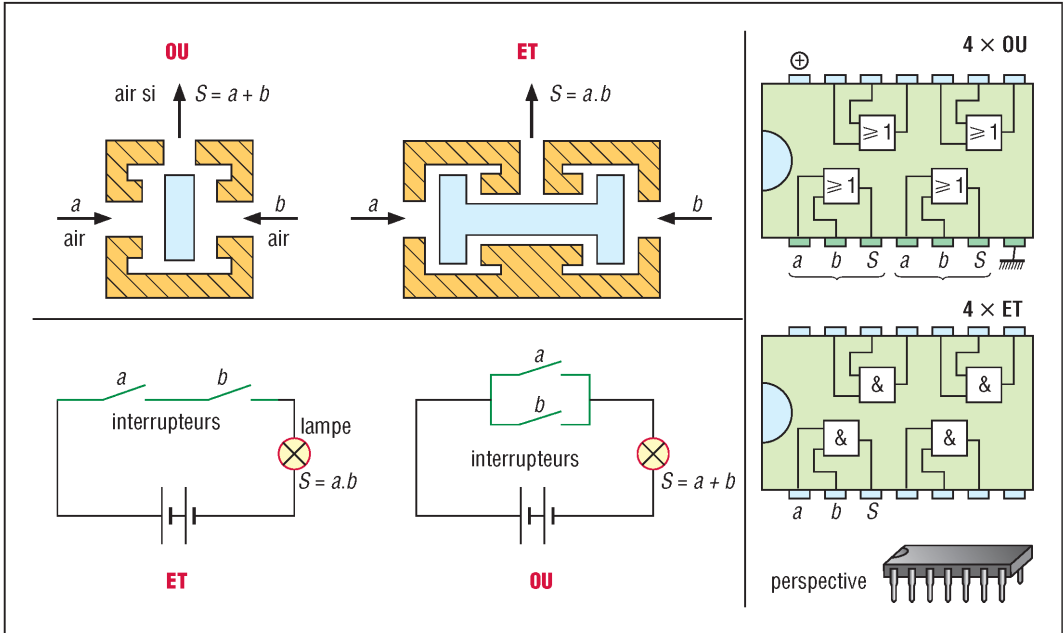
Mis à part les opérateurs OUI et NON, tous les autres peuvent traiter deux ou plusieurs variables d'entrées. Dans tous les cas on obtient une seule variable de sortie.

| Opérateur ou fonction | Cas de 2 variables a et b | | | | n variables | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|-----------------|------|---|---------------|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|---|
| | équation logique | symboles usuels | | table de vérité | symbole | $s = 1$ si | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | AFNOR | ASGS | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| OUI | $S = a$ | | | <table border="1"><tr><th>a</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td></tr></table> | a | S | 0 | 0 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | |
| a | S | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NON | $S = \bar{a}$ | | | <table border="1"><tr><th>a</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table> | a | S | 0 | 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | |
| a | S | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| OU | $S = a + b$ | | | <table border="1"><tr><th>a</th><th>b</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table> | a | b | S | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | | une entrée à 1, autres à 0 ou 1 |
| a | b | S | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ET | $S = a.b$ | | | <table border="1"><tr><th>a</th><th>b</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table> | a | b | S | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | | toutes les entrées à 1 |
| a | b | S | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| inhibition | $S = \bar{a}.b$ | | | <table border="1"><tr><th>a</th><th>b</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table> | a | b | S | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | | entrées inhibées à 0, autres à 1 |
| a | b | S | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NAND (NON ET) | $S = \overline{a.b} = \bar{a} + \bar{b}$ | | | <table border="1"><tr><th>a</th><th>b</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table> | a | b | S | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | | 1 entrée à 1, 1 entrée à 0, autres à 0 ou 1 |
| a | b | S | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NI NOR (NON OU) | $S = \overline{a + b} = \bar{a}.\bar{b}$ | | | <table border="1"><tr><th>a</th><th>b</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table> | a | b | S | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | | toutes les entrées à 0 |
| a | b | S | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| OU EXCLUSIF (XOR) | $S = a \oplus b$ | | | <table border="1"><tr><th>a</th><th>b</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table> | a | b | S | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | | 1 seule entrée à 1, autres à 0 |
| a | b | S | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| identité logique (XNOR) | $S = \overline{a \oplus b}$ | | | <table border="1"><tr><th>a</th><th>b</th><th>S</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table> | a | b | S | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | | toutes les entrées au même état, 0 ou 1 |
| a | b | S | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

13. Opérateurs logiques de base.

Sur le plan pratique, les opérateurs logiques existent dans des technologies très diverses (portes électroniques, pneumatiques, etc.)

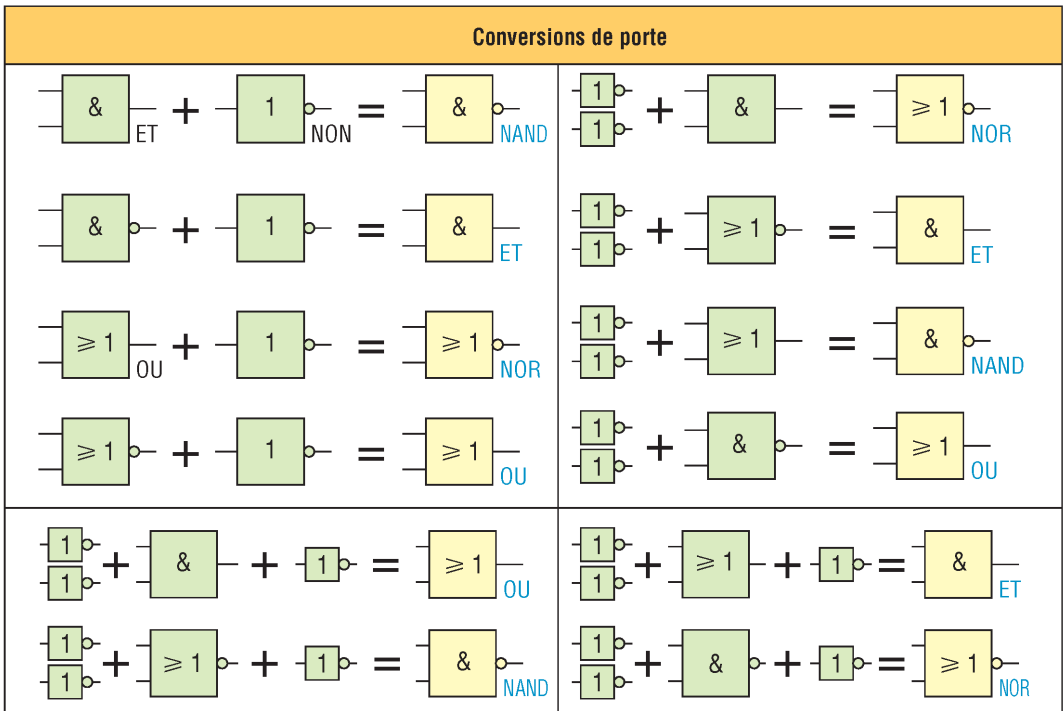
Ils sont utilisés pour réaliser concrètement les équations logiques sous forme de circuits. En électronique numérique ces opérateurs existent sous forme de circuits intégrés (TTL, CMOS...) dont les prix sont très économiques. Le plus souvent un même circuit comporte plusieurs portes dans le même package ; des circuits complexes dans un espace réduit peuvent ainsi être construits.



14. Exemples de réalisations d'opérateurs logiques.

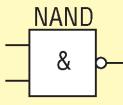

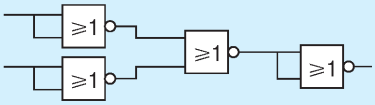
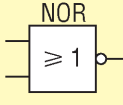
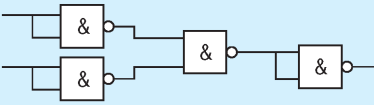
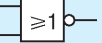
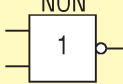
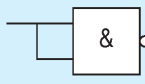
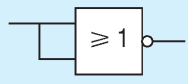
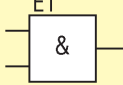
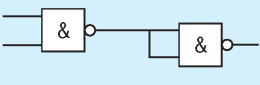
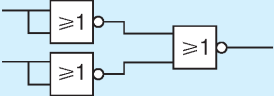
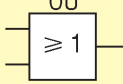
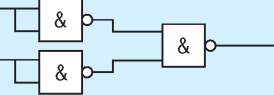
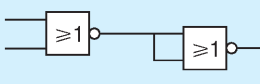
Remarque :

N'importe quelle opération logique ou opérateur peut être réalisée à partir de la combinaison des portes ET, OU et NON.



15. Réalisation d'opérateurs à partir des portes ET, OU et NON.

Alternativement n'importe quelle combinaison peut être obtenue uniquement à partir des portes NAND et NOR.

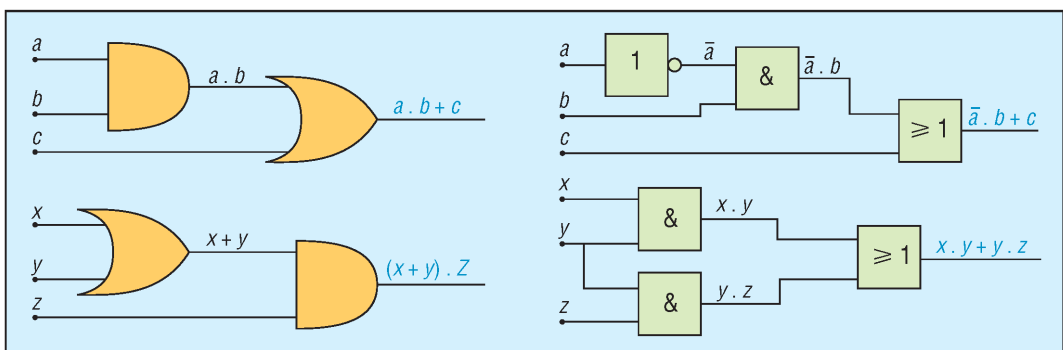
| Portes | Avec portes NAND | Avec portes NOR |
|---|---|---|
| NAND  |  |  |
| NOR  |  |  |
| NON  |  |  |
| ET  |  |  |
| OU  |  |  |

16. Exemples de combinaisons à partir des portes NAND et NOR.

VI - Combinaisons d'opérations logiques, réseaux et diagrammes logiques

Les combinaisons d'opérations logiques s'obtiennent en connectant la sortie d'une porte logique, ou opérateur, à l'entrée d'une autre porte logique, elle-même connectée à une troisième porte...

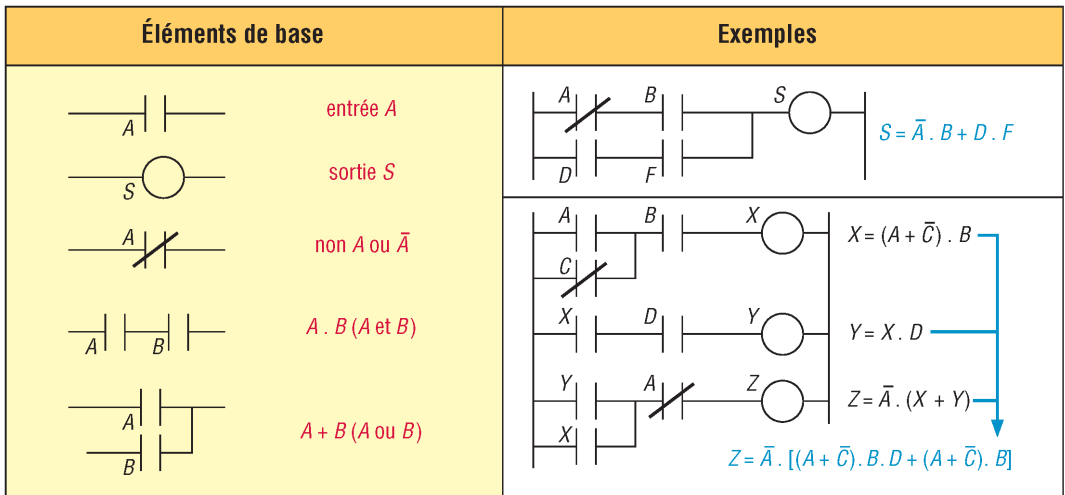
Ces combinaisons constituent des réseaux et préparent les câblages ou la programmation de la partie commande des automatismes.



17. Exemple de circuits, réseaux et diagrammes logiques.

Diagrammes logiques par schémas à contacts

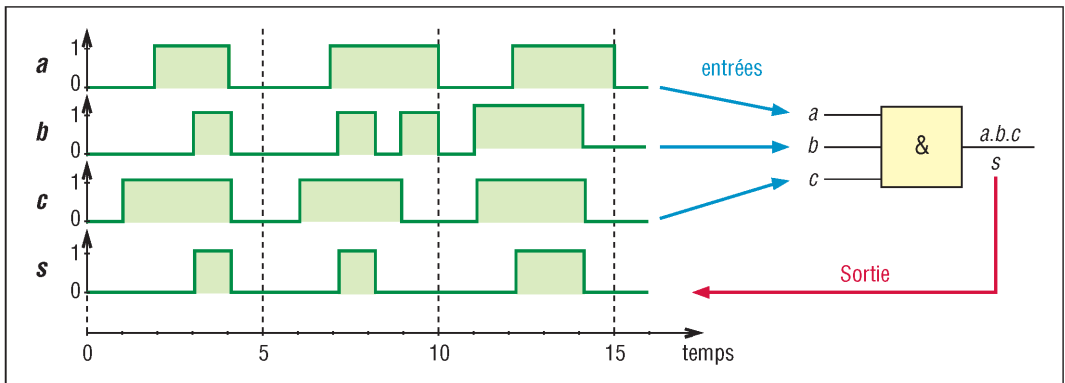
Souvent utilisé comme langage de programmation dans les automates programmables, c'est le diagramme logique le plus simple et le plus accessible au plus grand nombre. Il tire avantage de son analogie avec les circuits électriques. Les entrées ou contacts d'entrée (A, B, C, D...) peuvent être répétés autant de fois que nécessaire. Ils sont toujours placés à gauche et les contacts de sortie ou sorties (S, X, Y, Z...) à droite.



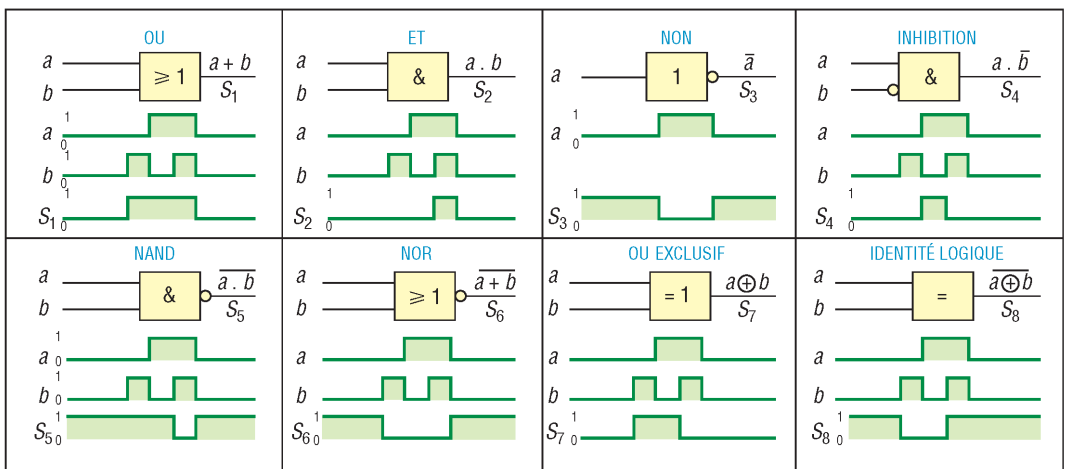
18. Schémas à contacts, principe et exemples.

VII - Chronogrammes

Ils représentent graphiquement l'évolution des variables (entrée et sortie) au cours du temps. Le temps est représenté par l'axe horizontal (abscisse) et l'état logique (0 ou 1) par l'axe vertical (ordonnée). Les graphes des diverses variables sont en général placés les uns au-dessous des autres avec la même échelle de temps (synchronisation).



19. Exemple de chronogrammes d'une fonction ET à trois entrées.

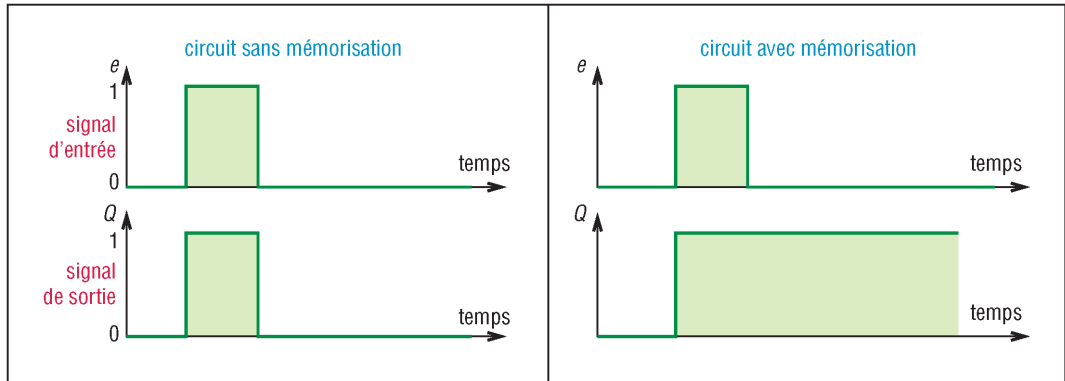


20. Chronogrammes des opérateurs logiques.

VIII - Fonction mémoire

Les mémoires sont à la base des systèmes automatisés séquentiels (mémoires d'étapes, etc.) et de l'électronique numérique. Elles sont utilisées dans les séquenceurs, automates, systèmes à microprocesseurs, calculateurs...

1. Principe

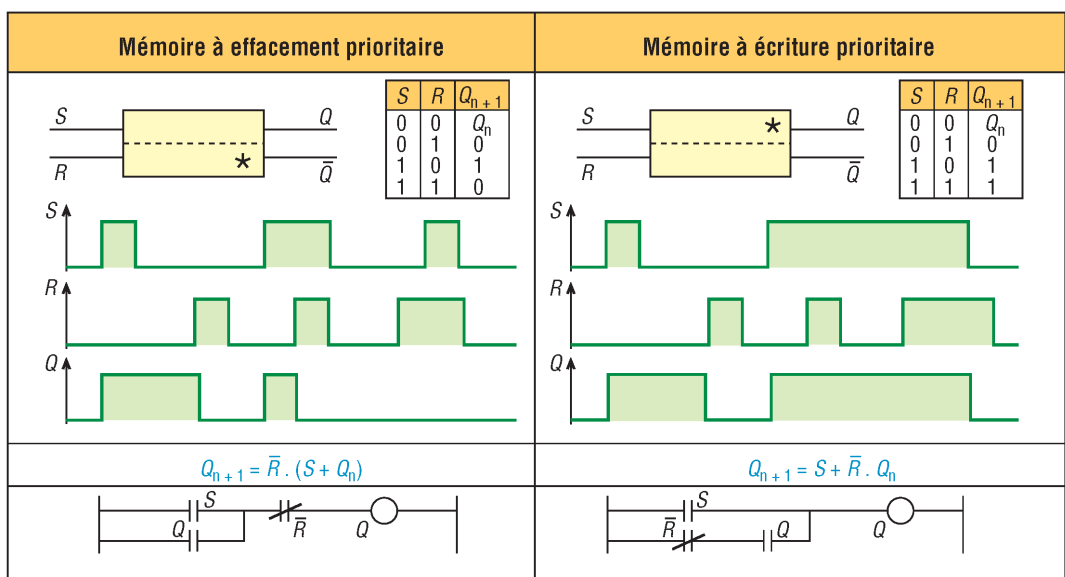


21. Principe de la fonction mémoire.

Si on applique un signal d'entrée (e) à un circuit sans mémoire, en réponse il se produit un signal de sortie (Q) qui disparaît aussitôt que l'entrée (e) est relâché. Au contraire un circuit avec mémoire conserve ou mémorise le signal de sortie, même après disparition du signal d'entrée.

a) Mémoires à effacement prioritaire : la mémoire est mise à 0 ($Q = 0$) si les entrées S et R sont toutes deux à 1.

b) Mémoires à écriture prioritaire : la mémoire est mise à 1 ($Q = 1$) si les entrées S et R sont toutes deux à 1. Dans les deux cas S (set) permet la mise à 1 et R (reset) la mise à 0, Q_{n+1} est l'état de la mémoire au moment $n + 1$ et Q_n l'état précédent de la mémoire (à l'instant n juste avant $n + 1$).



22. Principe de fonctionnement des mémoires à effacement et écriture prioritaire.

Remarque : un distributeur pneumatique bistable constitue une mémoire dans un circuit pneumatique.

2. Bascules

| <p>bascales RS asynchrones</p> | | <table border="1"> <thead> <tr> <th>S</th> <th>R</th> <th>Q_{n+1}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_n</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>ambigu</td> </tr> </tbody> </table> | S | R | Q_{n+1} | 0 | 0 | Q_n | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | ambigu | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------------|---|-------------|---|-----------|-----------|---|-------|---|-------|-------|---|---|-------|---|---|--------|-------|---|---|---|---|---|---|---|--------|---|---|---|-------------|
| S | R | Q_{n+1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | Q_n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | ambigu | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>bascales RST synchrones</p> | | <table border="1"> <thead> <tr> <th>T</th> <th>R</th> <th>S</th> <th>Q_{n+1}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>↓</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>Q_n</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_n</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>ambigu</td> </tr> </tbody> </table> | T | R | S | Q_{n+1} | ↓ | x | x | Q_n | ↑ | 0 | 0 | Q_n | ↑ | 0 | 1 | 1 | ↑ | 1 | 0 | 0 | ↑ | 1 | 1 | ambigu | | | | |
| T | R | S | Q_{n+1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↓ | x | x | Q_n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 0 | 0 | Q_n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 0 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 1 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 1 | 1 | ambigu | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>bascales JK</p> | | <table border="1"> <thead> <tr> <th>T</th> <th>J</th> <th>K</th> <th>Q_{n+1}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>Q_n</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>Q_n</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_n</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>\bar{Q}_n</td> </tr> </tbody> </table> | T | J | K | Q_{n+1} | 0 | x | x | Q_n | 1 | x | x | Q_n | ↑ | 0 | 0 | Q_n | ↑ | 0 | 1 | 0 | ↑ | 1 | 0 | 1 | ↑ | 1 | 1 | \bar{Q}_n |
| T | J | K | Q_{n+1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | x | x | Q_n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | x | x | Q_n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 0 | 0 | Q_n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 0 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 1 | 0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 1 | 1 | \bar{Q}_n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>bascales D</p> | <p>synchrone</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>T</th> <th>D</th> <th>Q_{n+1}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>x</td> <td>Q_n</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>x</td> <td>Q_n</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>↑</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> | T | D | Q_{n+1} | 0 | x | Q_n | 1 | x | Q_n | ↑ | 0 | 0 | ↑ | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| T | D | Q_{n+1} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | x | Q_n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | x | Q_n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ↑ | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | <p>à verrouillage</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

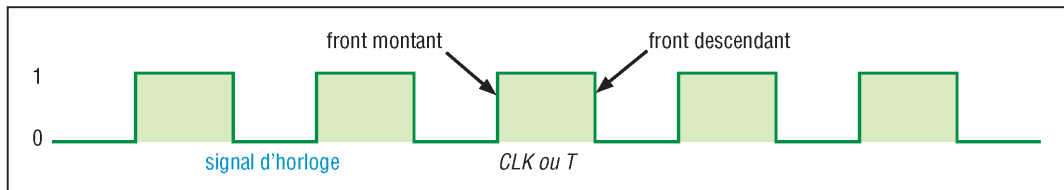
23. Bascules usuelles.

En électronique numérique, c'est le circuit de mémorisation le plus répandu. Ces circuits logiques ont deux sorties (Q et \bar{Q}), l'une étant toujours l'inverse de l'autre. Il existe de nombreuses réalisations avec variantes : RS , RST , D , JK ...

L'association de plusieurs bascules permet de réaliser des compteurs, des registres (pour stocker des données)...

Le passage d'un état à l'autre (basculement de 0 à 1 ou de 1 à 0) se produit dès qu'une impulsion est donnée sur l'une des entrées. La bascule reste en l'état même après retrait de l'impulsion.

3. Signal d'horloge



24. Signal d'horloge, front montant et front descendant.

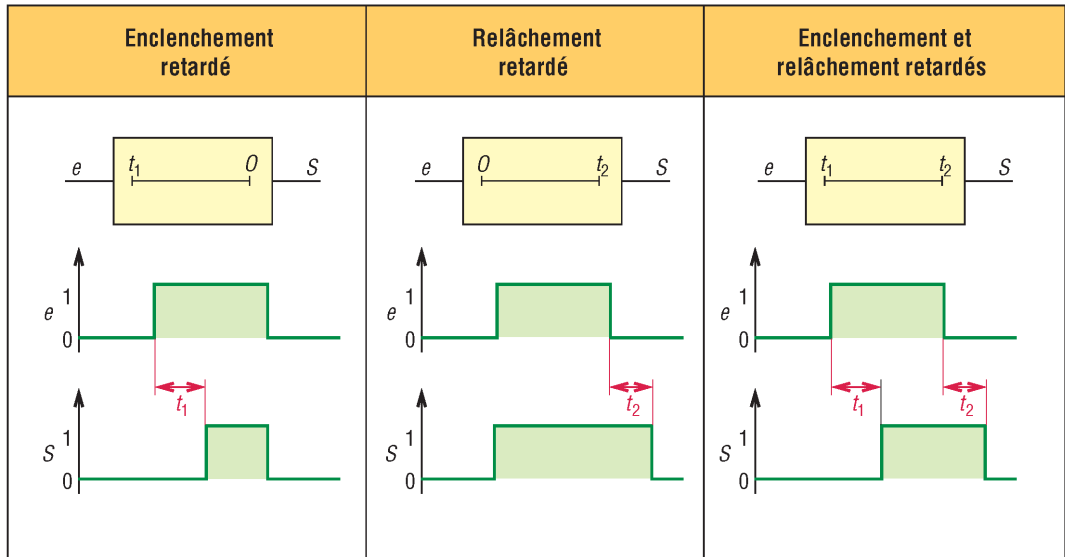
C'est une sorte de train d'ondes rectangulaires, repéré par CLK , C ou T , distribué à tous les étages d'un circuit électronique numérique synchrone, de façon que l'ensemble des sorties du système changent d'état exactement au même instant. En général, le changement a lieu lorsque le signal d'horloge effectue une transition appelée front. Deux cas sont possibles : à partir du front montant (passage de 0 à 1) ou à partir du front descendant (de 1 à 0).

Dans un circuit asynchrone (sans signal d'horloge) les sorties peuvent changer d'état à tout moment après impulsion sur une ou plusieurs entrées.

Les circuits synchrones sont les plus faciles à concevoir et à déboguer.

IX - Temporisateurs

Ils sont utilisés pour retarder l'activation d'une variable de sortie. La durée d'attente est réglable. Il existe une grande variété de solutions technologiques (électriques, pneumatiques, etc.). Dans les automates programmables les temporisations sont obtenues par programmation.



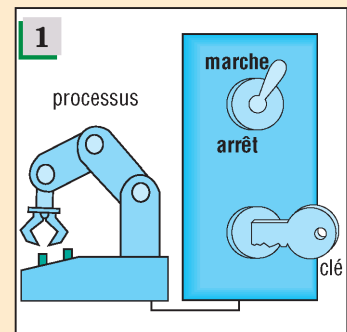
25. Temporisateurs.

X - Exercices

Exercice 1

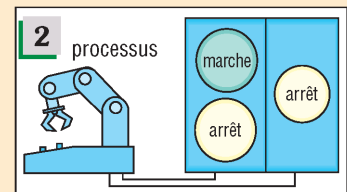
Le processus de la figure 1 est commandé par une console comprenant un interrupteur (I) à deux positions (une position marche et une position arrêt) et une clé (C) permettant de verrouiller le dispositif (en verrouillage $C = 1$, en non verrouillé $C = 0$). L'interrupteur peut être manipulé indépendamment du verrouillage.

Construire la table de vérité du dispositif et l'équation booléenne correspondante sachant que l'on a trois variables d'entrée (I, C et P_0 l'état initial du processus) plus une variable de sortie P, l'état final du processus.



Exercice 2

Refaire l'exercice 1 avec le processus de la figure 2 ayant une console avec 3 boutons à 2 positions : position enfoncée (= 1), position relâchée (= 0). Entrées : bouton marche (M), deux boutons arrêt (A_1) et (A_2), état initial du processus (P_0).
Sortie : état final du processus (P).



Exercice 3

Écrire les équations booléennes correspondant aux tables de vérité de la figure 3. Réduire et simplifier ces équations.

| 3 | A | B | C | S | A | B | C | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Exercice 4

Construire les tables de vérité (entrées A, B et C) correspondant aux expressions booléennes suivantes :

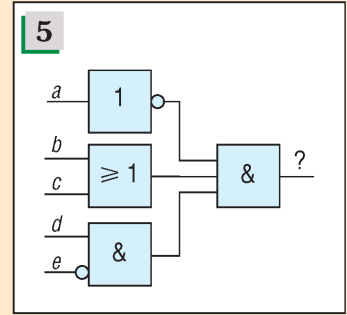
$$X = (A + B).(B + C)$$

$$Y = A + AB + ABC$$

$$Z = (A + \bar{A}).(B + \bar{B}).(C + \bar{C})$$

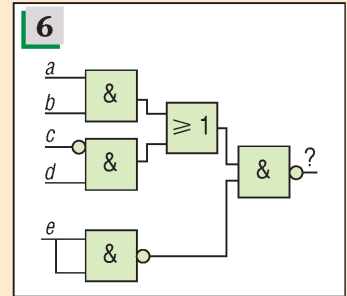
Exercice 5

Écrire l'équation logique ou booléenne réalisée par le circuit logique de la figure 5.



Exercice 6

Reprendre le même énoncé que l'exercice 5 avec le circuit de la figure 6.



Exercice 7

Proposer un circuit logique avec des portes OU, ET, NON, NAND permettant de représenter l'équation logique :

$$S = A.B + \bar{C}.D + \bar{E}.F$$

Exercice 8

Reprendre le même énoncé que l'exercice 7 avec des portes OU, ET et NON pour l'équation logique :

$$S = A.(B + C) + \bar{D}.E$$

Exercice 9

Écrire les équations logiques non simplifiées correspondant aux tableaux de Karnaugh de la figure 9. Réduire et simplifier ces équations.

| | | | | |
|-----------|-----------|-----|-----------|---|
| | \bar{C} | C | | |
| \bar{A} | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 1 | 0 | 0 | 1 |
| A | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | \bar{D} | D | \bar{D} | |

Exercice 10

Reprendre le même énoncé que l'exercice 9 à partir de la figure 10.

| | | | | |
|-----------|-----------|-----|-----------|---|
| | \bar{C} | C | | |
| \bar{A} | 1 | 1 | 0 | x |
| | 1 | 1 | 0 | 0 |
| A | x | 1 | 1 | x |
| | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | \bar{D} | D | \bar{D} | |

Exercice 11

Réduire et simplifier les expressions booléennes suivantes :

$$Y = \bar{A}.B + \bar{A}.B + A.B$$

$$Z = \bar{A}.B.\bar{C} + A.B.\bar{C} + B.\bar{C}.D$$

$$S = (A + B).(A + C).(B + C)$$

$$T = \bar{A}.\bar{B}.\bar{C}.D + A.\bar{B}.\bar{C}.D + \bar{A}.B.\bar{C}.\bar{D} + A.B.\bar{C}.\bar{D}$$

Exercice 12

En utilisant le théorème de Morgan simplifier les expressions de la figure 12.

12

$$X = \overline{\bar{U}.V.\bar{W}}$$

$$Y = \overline{U + \bar{V}.W}$$

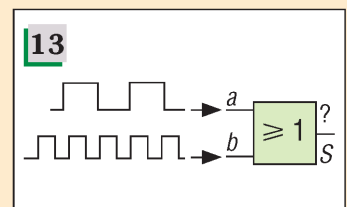
$$Z = \overline{\bar{T}.U.\bar{V}.\bar{W}}$$

$$S = \overline{U.(V + \bar{W}).T}$$

$$Q = \overline{(U + \bar{V}).(T + \bar{W})}$$

Exercice 13

Connaissant les signaux d'entrée a et b , tracer la forme de l'onde de sortie S du circuit de la figure 13. Refaire la question si a disparaît. Même question si b disparaît.



Exercice 14

Reprendre l'énoncé de l'exercice 13 avec une porte NAND ou NON ET.

Exercice 15

Reprendre l'énoncé de l'exercice 13 avec une porte INHIBITION (a inhibition b).

43

GRAFCET

OBJECTIFS

- Décrire les principaux éléments et les règles d'évolution du GRAFCET.
- Donner des notions concernant les étapes encapsulantes, les macroétapes, les étapes particulières, le forçage et le figeage.
- Fournir des compléments sur la représentation des actions et des réceptivités.

Langage de spécification pour diagrammes fonctionnels en séquence, le GRAFCET (graphe de commande-étape-transition) est un organigramme spécialisé, avec graphisme et règles particulières, utilisé pour décrire le cycle logique des systèmes automatisés séquentiels ; grafcet (lettres minuscules) désigne un diagramme. Il peut être associé à une partie non séquentielle.

Le GRAFCET est normalisé : NF EN 60848, classement C03190, août 2002, révisé 2013.

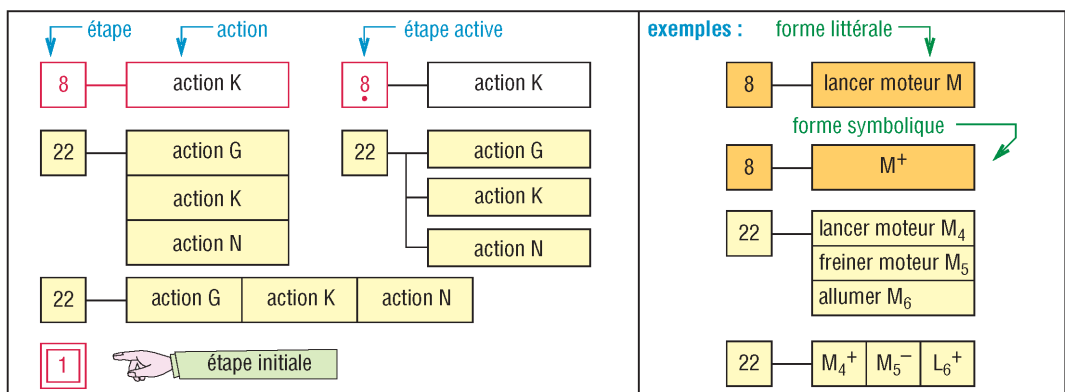
I - Principaux éléments du GRAFCET

Le GRAFCET se compose d'étapes, auxquelles sont associées des actions (variables de sortie) ou interne, des transitions, auxquelles sont associées des réceptivités (variables d'entrée) et des liaisons orientées. À cet ensemble on ajoute des règles d'évolution pour régler le déroulement.

1. Étapes et actions

Une étape est une période de temps permettant de réaliser complètement une ou plusieurs actions.

La notion d'action est assez large et il peut ne pas y avoir d'action comme dans le cas d'une étape d'attente.



1. Étapes et actions. Les trois représentations de l'étape 22 sont équivalentes.

a) Représentation : chaque étape est représentée par un carré ou boîte numéroté auquel est associé un ou plusieurs rectangles destinés à décrire les actions qui s'y déroulent.

– Numérotation : elle est réalisée par des nombres entiers positifs, croissants (pas nécessairement de 1 en 1). Seule condition : deux étapes différentes ne doivent jamais avoir le même numéro. Variable associée : X^* , exemple X6, X10, etc.

– Étape active : si une étape est active, toutes les actions associées sont exécutées, certaines actions pouvant être commencées ou terminées avant d'autres. Variable associée : $X^* = 1$.

L'activité d'une étape commence et s'arrête avec le franchissement des transitions situées à son entrée (amont) et à sa sortie (aval).

Sur un grafcet (diagramme) une étape active est repérée par un point.

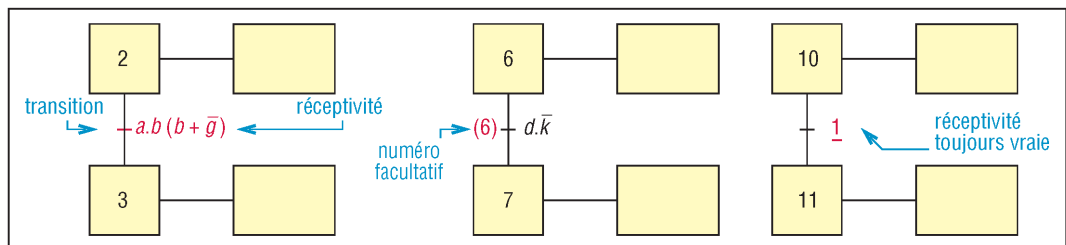
– Étape inactive : si une étape est inactive, aucune des actions associées n'est ou ne peut être exécutée. Variable associée : $X^* = 0$; exemple : X6 = 0.

b) Étape initiale : elle est représentée par un double carré ; c'est une étape active au départ du système (activée sans condition au démarrage : règle 1).

c) Remarque : à chaque étape d'un grafcet est associée une mémoire (informatique, pneumatique, etc.) dans le système automatisé correspondant. Si l'étape est active, la mémoire est à 1. Si l'étape est inactive, la mémoire est à 0.

2. Transitions et réceptivités

Caractéristiques essentielles du GRAFCET, elles indiquent la possibilité d'évolution entre étapes. La transition peut être considérée comme une porte entre étapes, et la réceptivité associée (variable d'entrée) comme la clé ou le code nécessaire pour ouvrir la porte.



2. Transition et réceptivité.

a) Transition : elle est représentée par un tiret, ou petite barre, tracé sur la ligne reliant deux étapes successives. La réceptivité associée est écrite à droite du tiret. Un numéro ou une lettre de repérage entre parenthèses peut éventuellement être inscrit à gauche du tiret.

Règle : entre deux étapes successives et quel que soit le chemin emprunté, il ne peut y avoir qu'une seule transition.

Transition validée : une transition est dite validée si toutes les étapes immédiatement précédentes sont actives. Et inversement.

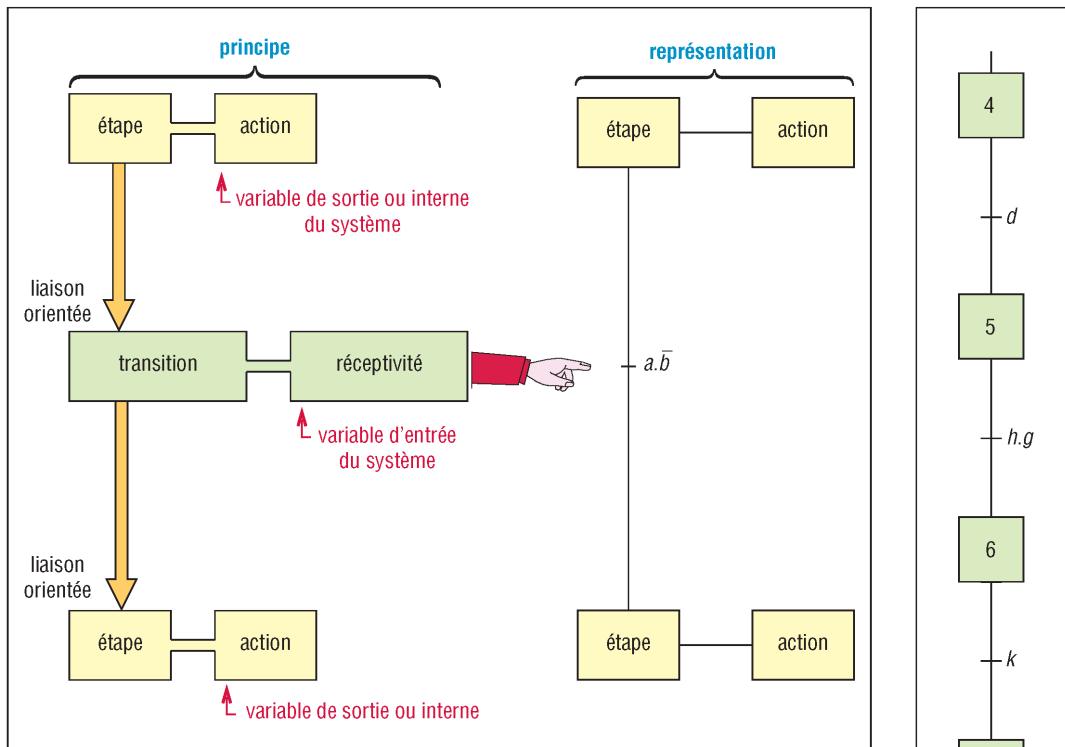
b) Réceptivité : elle peut s'écrire sous forme littérale ou sous forme logique (expression booléenne, avec des «ET» et des «OU», d'informations provenant de capteurs). Elle regroupe toutes les conditions et uniquement celles qui sont nécessaires au franchissement de la transition.

Réceptivité vraie : une réceptivité est dite vraie si la condition logique, ou l'équation booléenne, associée est vérifiée ou égale à 1 ; et inversement.

3. Liaisons orientées et structures de base

Comme pour un organigramme, elles correspondent aux lignes tracées entre les différentes boîtes indiquant les voies d'évolution entre étapes et transitions.

Règle : une liaison orientée relie toujours une étape à une transition ou une transition à une étape et jamais deux étapes ou deux transitions entre elles.



3. Principaux éléments du GRAFCET.

Chaque ligne ne peut être parcourue que dans un seul sens. S'il n'y a pas de flèche indicative, une ligne de liaison verticale est parcourue de haut en bas et une ligne horizontale de gauche à droite.

a) Séquence simple : elle se compose d'une succession d'étapes sans embranchement particulier.

4. Séquence simple.

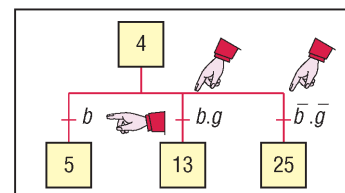
b) Sélection de séquences («divergence en OU»)

Elle apparaît chaque fois que la sortie d'une étape peut se faire vers une OU plusieurs séquences simples (plusieurs chemins possibles suivant l'état des réceptivités).

Elle caractérise plusieurs alternatives de fonctionnement ou d'évolutions possibles.

Exemple : si 4 est active et si $b = 1$ avec $g = 0$ alors la séquence débutant par l'étape 5 est activée (13 et 25 restant inactives).

En revanche, si $b = 1$ avec $g = 1$ les séquences 5 et 13 sont activées (25 restant inactive)...

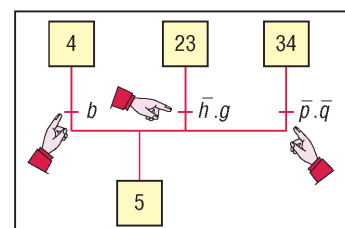


5. Sélection de séquences.

c) Convergence de séquences

Elle apparaît chaque fois que l'arrivée à une étape peut être réalisée à partir de plusieurs séquences ou chemins possibles. C'est l'inverse de la sélection de séquences.

Exemple : l'activation de l'étape 5 peut être obtenue à partir de n'importe quelle séquence simple précédente (4 ou 23 ou 34).

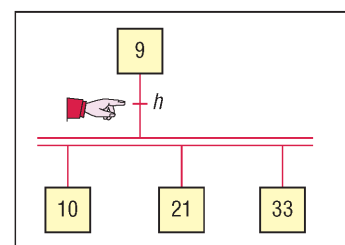


6. Convergence de séquences.

d) Activation de séquences parallèles

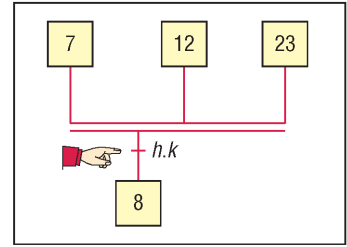
Elle apparaît chaque fois que le franchissement d'une transition doit démarrer ou activer en même temps (simultanément) plusieurs séquences ou chemins fonctionnant en parallèle.

Exemple : si 9 est active et si $h = 1$, le franchissement de la transition active en même temps les trois séquences (10, 21 et 33).



7. Activation de séquences parallèles.

e) Synchronisation de séquences : elle apparaît chaque fois que le franchissement d'une transition exige en même temps (simultanément) l'état actif de toutes les étapes immédiatement précédentes ; c'est le cas d'un fonctionnement qui pour démarrer exige la fin de plusieurs séquences ayant auparavant évolué en parallèle.

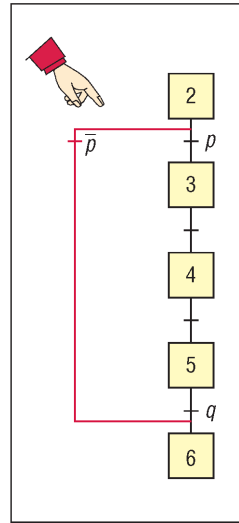


8. Synchronisation de séquences.

Exemple : si $hk = 1$, le franchissement de la transition exige l'état actif des étapes 7, 12 et 23.

f) Saut d'étapes : il est employé pour passer ou sauter plusieurs étapes non nécessaires à un moment donné.

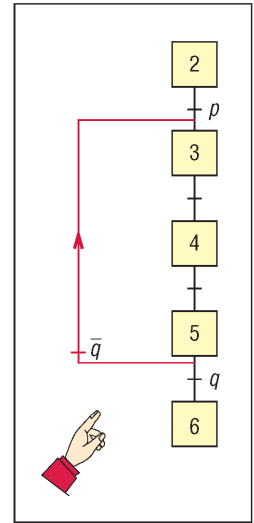
Exemple : si 2 est active et si $p = 1$ les étapes 3, 4 et 5 sont normalement exécutées. Si par contre $p = 0$ on saute ces trois étapes pour se retrouver à l'étape 6 (noter que p barre est la seule transition sur le chemin entre 2 à 6).



9. Saut d'étapes.

g) Reprise de séquence : l'inverse du cas précédent. Elle permet de recommencer plusieurs fois une même séquence (boucle itérative).

Exemple : si 5 est active et si $q = 1$ on passe à l'étape suivante 6. Si $q = 0$ on recommence les étapes 3, 4 et 5 (noter que q barre est la seule transition sur le chemin entre 5 et 3).



10. Reprise d'étapes.

4. Règles d'évolution

Véritable code de la route du GRAFCET, elles réglementent la situation initiale, le franchissement des transitions, l'évolution des étapes actives, les évolutions simultanées, l'activation, la désactivation...

a) Règle 1, situation initiale ou initialisation : les étapes initiales, repérées par un double carré, sont activées inconditionnellement à l'initialisation de l'automatisme, au début du fonctionnement.

Remarque : cette règle précise le comportement initial et les étapes actives au démarrage.

Les étapes initiales peuvent être des étapes d'attente (sans action), des étapes encapsulantes, etc.

b) Règle 2, conditions de franchissement d'une transition : le franchissement d'une transition ne peut se produire que si la transition est validée (étapes immédiatement précédentes actives) et si la réceptivité associée est vraie (équation logique associée égale à 1).

Si les deux conditions sont réunies, la transition devient franchissable et est alors obligatoirement franchie. La procédure de franchissement suit la règle 3.

| Règle 2 | 8 + d = 0 9 | 8 • + d = 0 9 | 8 + d = 1 9 | 8 • + d = 1 9 | 8 + d = 1 9 franchissement |
|--------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------------------|
| étapes actives | — | 8 | — | 8 | 9 |
| transition validée | non | oui | non | oui | le franchissement suit la règle 3 |
| réceptivité vraie | non | non | oui | oui | |
| transition franchissable | non | non | non | oui | |

11. Règle 2. Évolution non fugace.

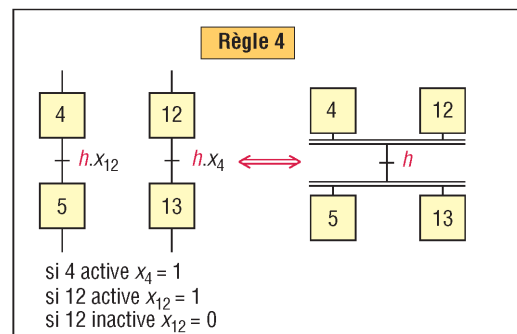
c) Règle 3, procédure de franchissement d'une transition : le franchissement d'une transition entraîne en même temps l'activation de toutes les étapes immédiatement suivantes et la désactivation de toutes les étapes immédiatement précédentes.

| | | | | | | |
|----------------|--------------------------|-----|------------|--------|-----|---|
| Règle 3 | | | | | | |
| | étapes actives | — | 8 | 5 et 8 | 9 | |
| | transition validée | non | non | oui | oui | — |
| | réceptivité vraie | non | oui ou non | non | oui | — |
| | transition franchissable | non | non | non | oui | — |

12. Règle 3.

d) Règle 4, évolutions simultanées : plusieurs transitions simultanément franchissables (franchissables en même temps) sont simultanément franchies (franchies en même temps).

Remarque : cette règle permet de décomposer un GRAFCET en plusieurs diagrammes tout en assurant leur interconnexion. Par exemple, les transitions $h.X_4$ et $h.X_{12}$ franchissables en même temps assurent la synchronisation des deux séquences.

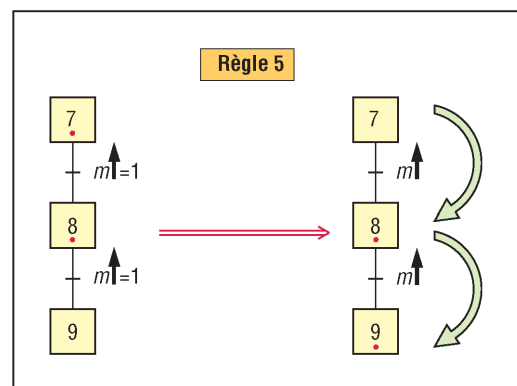


13. Règle 4. Synchronisation de séquences.

La simultanéité dépend du temps de réponse, l'intervalle de temps nécessaire doit cependant rester négligeable pour le fonctionnement.

e) Règle 5, activation et désactivation simultanée : si, au cours du fonctionnement, une même étape doit à la fois être désactivée et activée, elle reste active.

Exemple : si 7 et 8 sont toutes deux actives et si le front montant de m passe à 1 (m passe de l'état 0 à l'état 1), alors l'étape 8 est à la fois activée et désactivée. Elle reste active.



14. Règle 5.

II - Structure générale d'un GRAFCET et des autres éléments

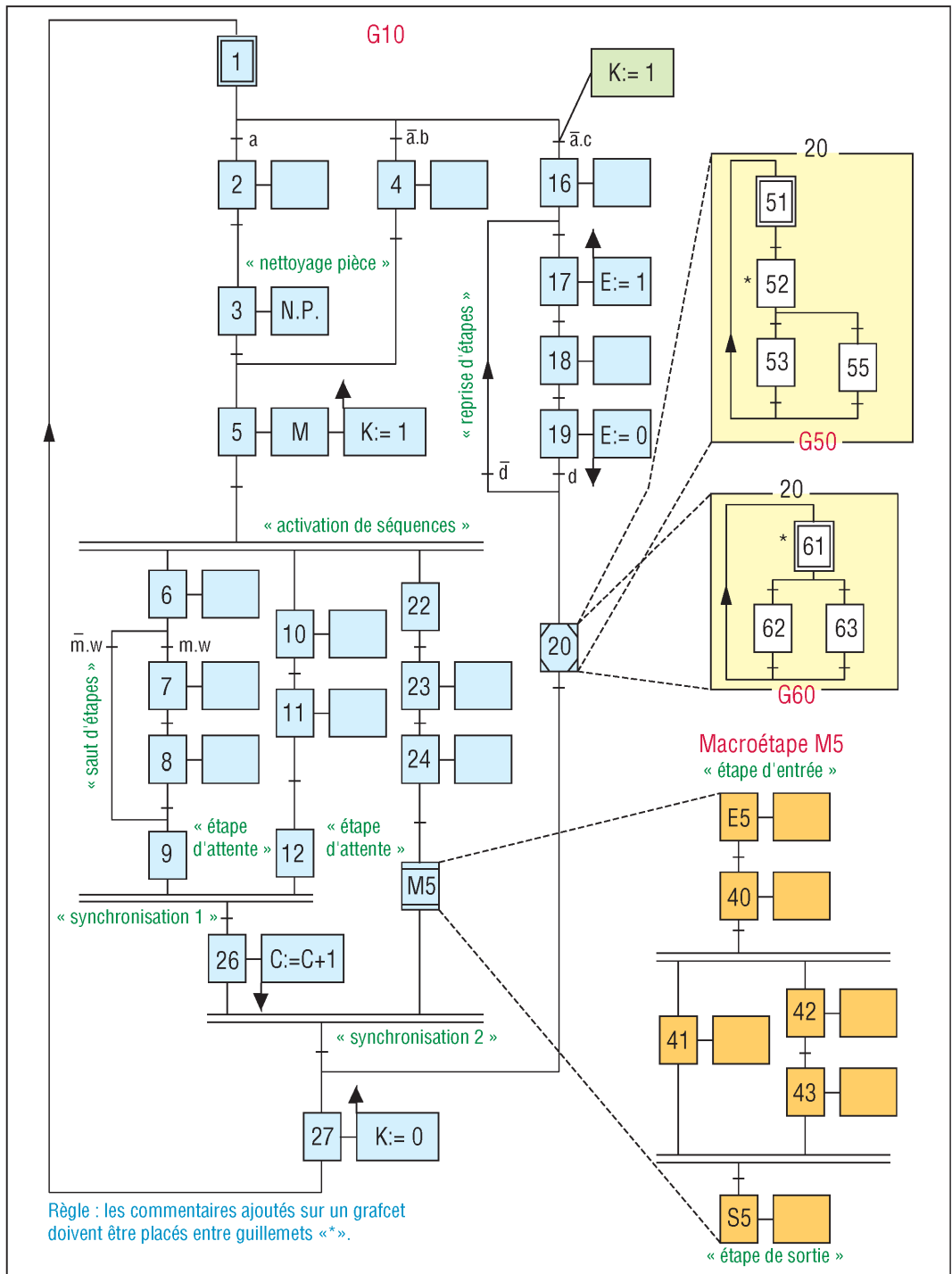
Un même diagramme peut regrouper, en plus des éléments précédents, des étapes encapsulantes, encapsulées, des macroétapes, des étapes d'attente, de verrouillage, de synchronisation, du forçage, du figeage...

Grafcet connexe : grafcet pour lequel il existe toujours des liens (liaisons orientées...) entre deux éléments quelconques (étape/transition ou transition/étape).

Grafcet partiel : grafcet constitué de un ou plusieurs grafquets connexes résultant de la partition d'un grafcet global. Désignation G1, G10... ; variable associée : XG1, XG10...

Situations d'un grafcet partiel : G12{8, 9, 11} signifie que les étapes 8, 9 et 11 du grafcet G12 sont actives à l'instant considéré ; G12{ } précise qu'aucune étape n'est active : G12{INIT} indique que les étapes initiales sont actives.

Exemple : le grafcet global figure 16 est constitué de quatre grafquets partiels G1, G10, G11 et G20 : G1, G11, G20 sont des grafquets connexes et G10 est constitué de deux grafquets connexes.

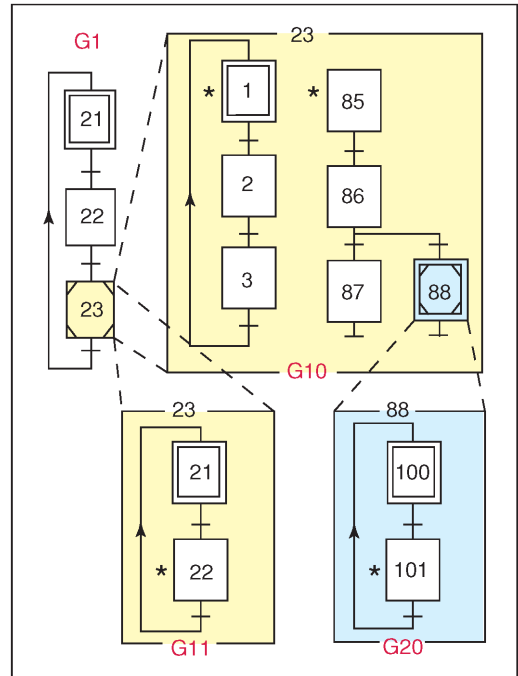


15. Structure générale des grafquets, exemple simplifié de grafcet global.

1. Structuration par encapsulation

L'encapsulation permet la décomposition d'un grafcet global en plusieurs grafcets partiels et de les relier. Éléments de base **figure 17**.

Exemple (fig. 16) : l'activation de l'étape encapsulante 23 du grafcet partiel G1 active en même temps les étapes encapsulées 85 et 1 de G10 et 22 de G11. L'activation de l'étape 88 active 101 de G20 contenant l'étape initiale 100.



16. Exemple de structure par encapsulation.

2. Macroétape

L'objectif est de ne pas surcharger le GRAFCET principal par des détails de réalisation.

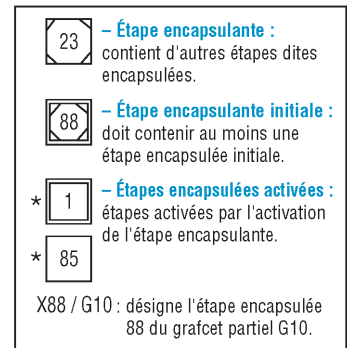
La macroétape représente l'ensemble d'une tâche (usinage, manutention, etc.) sans détailler la procédure sur le GRAFCET principal.

Les détails de la réalisation (étapes intermédiaires, transitions, etc.) sont décrits et définis par un autre diagramme, appelé expansion de la macroétape.

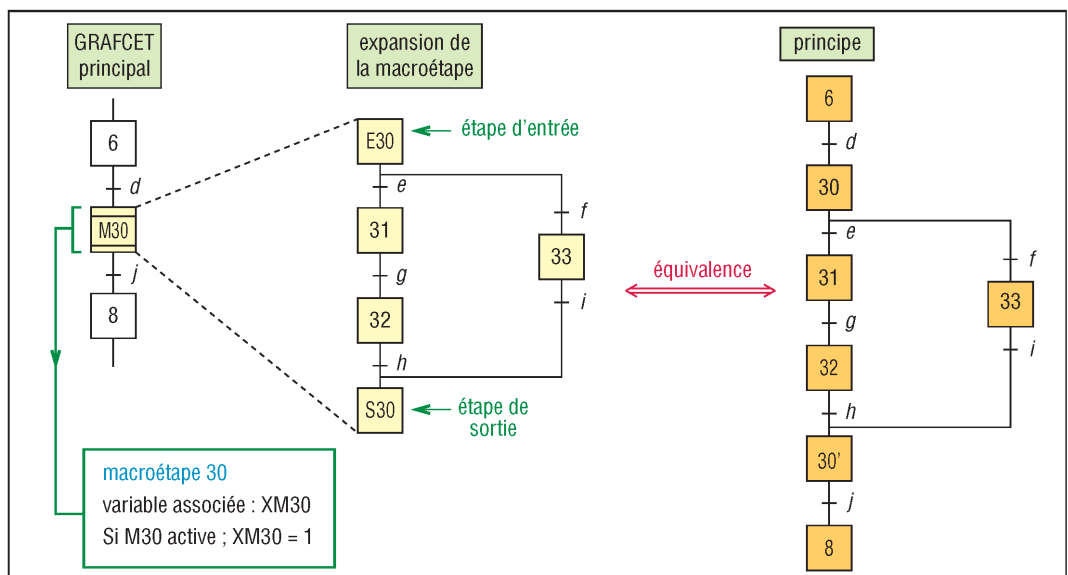
Remarques :

- Une expansion de macroétape peut comporter d'autres macroétapes. Plusieurs macroétapes peuvent utiliser la même expansion.
- Le franchissement de la transition amont (*d*) doit activer l'étape d'entrée (E30 ou 7.1) de l'expansion de la macroétape. De même l'étape de sortie (S30) participe à la validation de la transition de sortie (*j*).

L'utilisateur doit bien gérer les conditions de réceptivités d'entrée et de sortie afin d'éviter tout conflit d'accès.



17. Encapsulation : éléments de base.



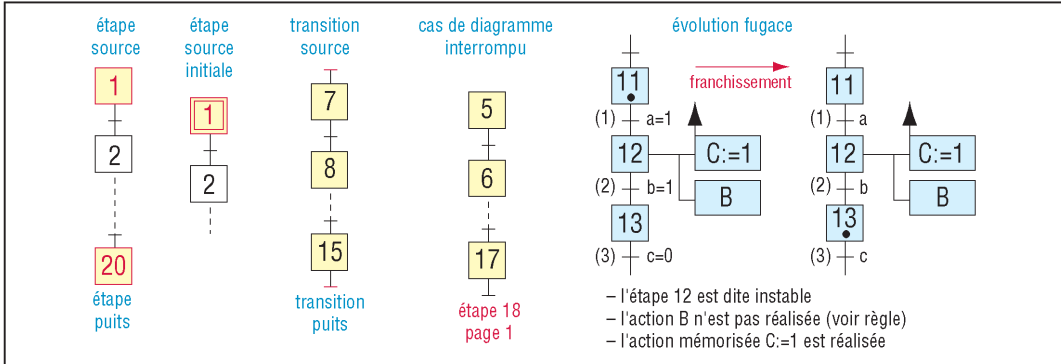
18. Macroétape : expansion et principe.

3. Structures particulières

a) Évolution fugace

Exemple (fig. 19) : 11 est active et les réceptivités $a = 1$, $b = 1$ et $c = 0$ ce qui active directement l'étape 13 après franchissement des transitions (1) et (2). L'étape 12, dite instable, est virtuellement activée, l'action B n'est pas réalisée, l'action mémorisée $C:=1$ est prise en compte.

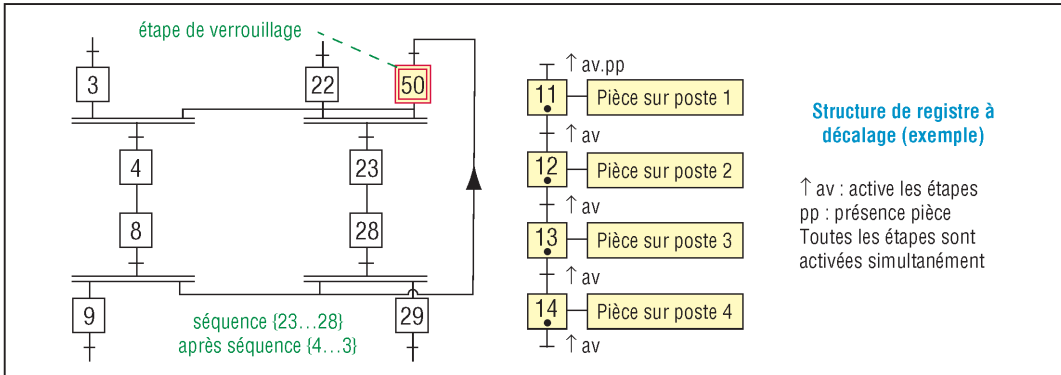
Règle : en mode continu, les actions (continues) associées à une étape instable ne doivent pas être prises en compte, par contre en mode mémorisé les actions (mémorisées) doivent l'être.



19. Structures particulières et évoluion fugace.

b) Étape de verrouillage et registre à décalage

Les étapes de verrouillage sont des étapes initiales complémentaires permettant le déroulement d'une seule séquence à la fois.



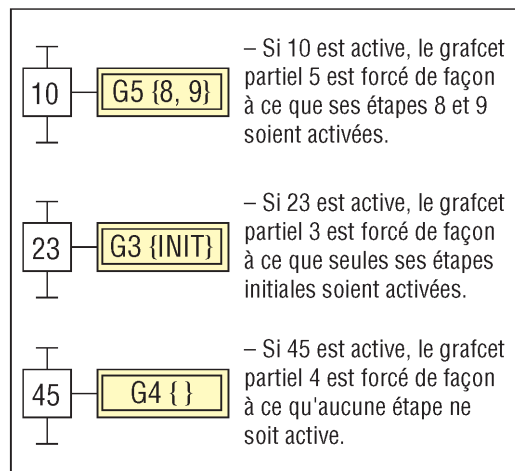
20. Étapes de verrouillage et registre à décalage (principe).

4. Forçage et figeage d'un grafcet partiel

Le forçage et le figeage, repérés par un double rectangle, créent une dépendance entre plusieurs grafquets partiels. Ils permettent notamment de gérer les modes de marche et d'arrêt : arrêt d'urgence, procédures de mise en marche et arrêt, les modes de production, etc.

a) Forçage

À partir d'un grafcet (« maître »), il permet de forcer un autre grafcet (« esclave ») à une situation, le remettre à zéro (réinitialiser) ou le désactiver complètement (fig. 21).



21. Forçage d'un grafcet partiel.

b) Figeage

À partir d'un grafcet (« maître »), il verrouille le déroulement ou fige l'évolution d'un autre grafcet (« esclave ») dans la situation où il se trouvait à l'instant du figeage (fig. 22).

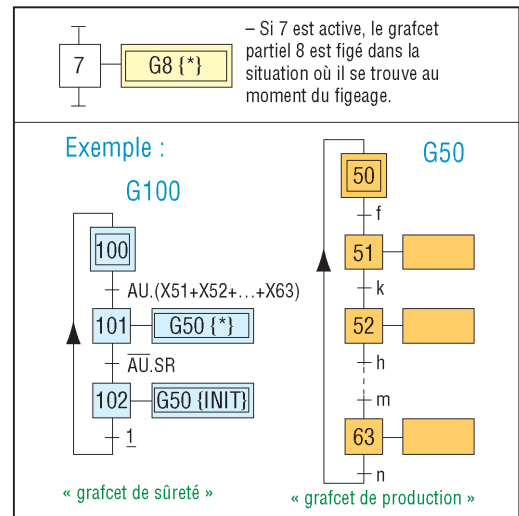
Remarque : le forçage et le figeage sont réalisés quelle que soit la situation du grafcet « esclave » et l'étape en cours. Un grafcet partiel peut être le grafcet maître d'un premier et l'esclave d'un second.

c) Exemple (fig. 22)

Dès que l'étape 101 du grafcet partiel G100 (de sûreté) est active, suite à un arrêt d'urgence (AU), le grafcet G50 (production normale) est figé ou bloqué dans la situation où il est à cet instant.

En fin d'arrêt d'urgence, après réarmement (SR), l'étape 102 devient active et G50 est réinitialisé par forçage (active 50). La production normale peut redémarrer.

Remarque : d'autres grafcets partiels peuvent être utilisés pour gérer, par forçage ou figeage de G50, les modes de production (cycle par cycle, étape par étape...).



22. Figeage d'un grafcet : notation et exemple.

III - Actions et transitions : compléments

1. Représentation des actions

a) Action continue inconditionnelle

L'action est exécutée dès que l'étape associée est active, sans condition particulière (fig. 23).

b) Action conditionnelle (sans front \uparrow^* ou \downarrow^*)

L'action est exécutée si l'étape est active et si la condition associée est vérifiée « $k=1$ » (fig. 24).

c) Action retardée

Dès que l'étape (e) est active, l'action est exécutée après un délai (t_1). Écriture : $t_1/X(e)$; exemple : $9s/X8$ (fig. 25).

d) Action limitée dans le temps

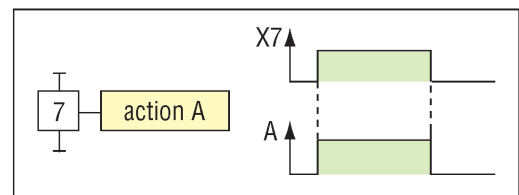
L'action démarre dès que l'étape (e) est active, sa durée (t), limitée est plus courte que celle de l'étape. Écriture : $t/X(e)$; exemple : $50s/X4$ (fig. 26).

e) Action à activation et désactivation retardées

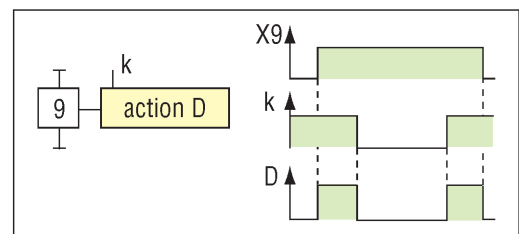
L'action G est effectuée $3s$ (t_1) après que a passe de 0 à 1 et s'arrête $7s$ (t_2) après que a passe de 1 à 0. Écriture : $t_1/a/t_2$ (fig. 28).

f) Action mémorisée à l'activation

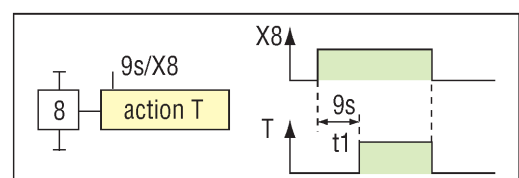
L'action K (dure plusieurs étapes) est mémorisée (0 ou 1) au début de l'étape active. Écriture (rectangle avec flèche vers le haut) : $K:=0$ (ou 1) (fig. 27).



23. Action continue (inconditionnelle).



24. Action conditionnelle (sans front \uparrow^* ou \downarrow^*).



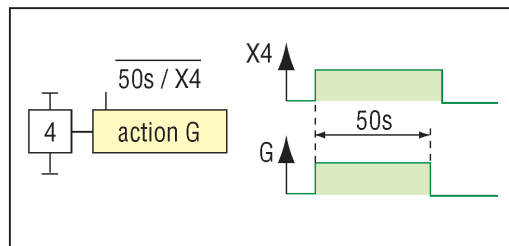
25. Action retardée ($t_1 = 9s$; $e = 8$).

g) Action mémorisée à la désactivation

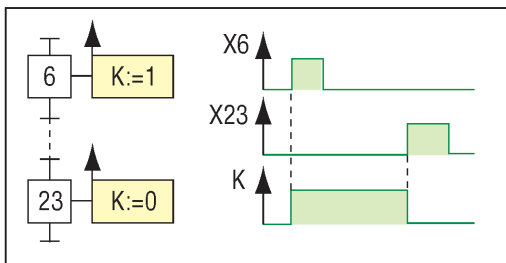
Idem (f) sauf que l'action B est mémorisée à la fin de l'étape active (fig. 29).

h) Action conditionnelle sur évènement (doit avoir au moins un front \uparrow^* ou \downarrow^*)

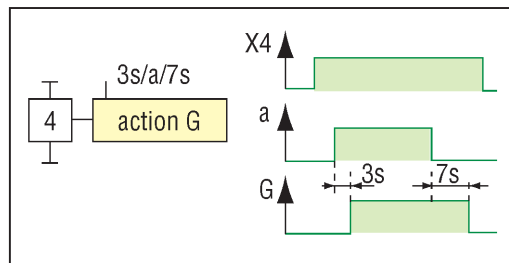
H vaut 0 si $\uparrow a$ (sur rectangle avec \blacktriangleleft) se produit et si 13 et 25 sont actives (fig. 30).



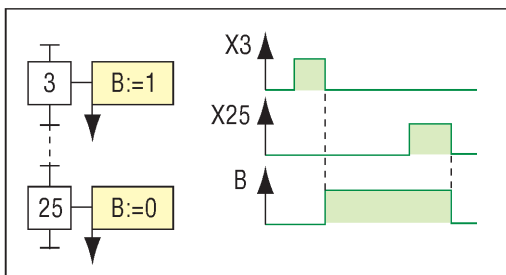
26. Action limitée dans le temps.



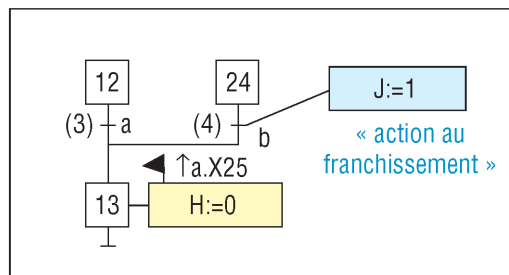
27. Action mémorisée à l'activation d'une étape.



28. Action retardée en activation et désactivation.



29. Action mémorisée à la désactivation d'étape.

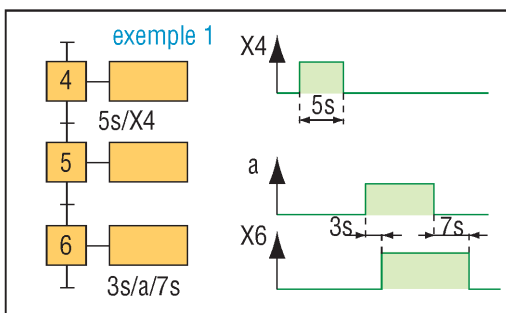


30. Action sur évènement (au moins un \uparrow^* ou \downarrow^*).

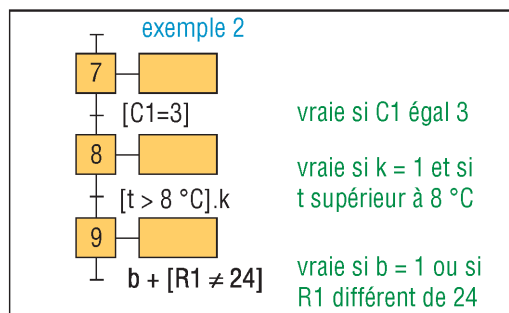
2. Réceptivités : temps, comptage, comparaison...

Écriture du temps : mêmes notations que précédemment (fig. 31) : 5s/X4 est vraie 5s après l'activation de 4 et redevient fausse après franchissement ; 3s/a/7s vraie 3s après que a passe de 0 à 1 et redevient fausse 7s après que a passe de 1 à 0.

Écritures entre crochets (exemples fig. 32) pour compteurs, comparaisons, etc.



31. Réceptivités : prise en compte du temps.



32. Exemples avec comptage et comparaison.

Réceptivité utilisant le front montant d'une variable

Le front d'une variable (a...) est régulièrement utilisé dans les écritures et doit apparaître au moins une fois dans le cas des actions sur évènement (fig. 30).

Front montant de a ($\uparrow a$) : lorsque a passe de 0 à 1, $\uparrow a = 1$ et $\downarrow a = 0$
Front descendant de a ($\downarrow a$) : lorsque a passe de 1 à 0, $\downarrow a = 1$ et $\uparrow a = 0$

44

ASSERVISSEMENT, RÉGULATION, AUTOMATIQUE

OBJECTIFS

- Définir les principaux termes et expressions concernant les asservissements.
- Détailler la représentation par schémas blocs et l'algèbre correspondante.
- Fournir les principaux éléments concernant la transformation de Laplace.
- Développer la notion de fonction de transfert.
- Étudier la réponse des systèmes asservis aux entrées types usuelles.
- Aborder les notions de précision et de stabilité des systèmes.
- Décrire les représentations (diagrammes) de Bode, Black et Nyquist.
- Donner des éléments sur les principaux correcteurs.

Les systèmes asservis fonctionnent en bouclage, c'est-à-dire avec une boucle de rétroaction ou « feedback », prenant en considération une mesure permanente de la situation du système afin de déterminer la commande la mieux adaptée en réponse à une situation donnée.

Pour ces systèmes, toutes les situations possibles n'étant pas prévisibles, par exemple à cause des perturbations, on ne peut pas, contrairement au cas des systèmes séquentiels, avoir un déroulement fini d'opérations prédéterminées.

L'étude de tels systèmes est regroupée sous le nom « **d'automatique** » ou « **cybernétique** ».

L'**automatique** peut s'appliquer aux systèmes mécaniques, électroniques, électromécaniques, mais aussi en gestion, biologie, économie, etc.

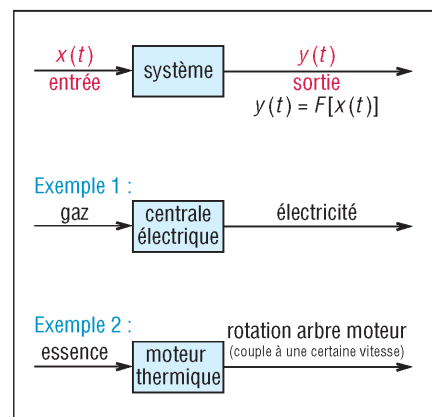
I - Notion de système et définitions

1. Définitions

Système : un système est un assemblage ou une combinaison de parties ou composants liés les uns aux autres et qui se coordonnent de façon à former un ensemble pouvant réaliser une ou plusieurs fonctions. Il peut s'appeler processus dans certains cas.

Schématisation (**fig. 1**) : un bloc ou boîte représente le système et deux flèches indiquent les entrées et les sorties.

Entrées : ce sont les éléments, grandeurs, signaux ou informations qui, issus du milieu extérieur, apportent au système ce dont il a besoin pour accomplir sa mission.



1. Système, schématisation par bloc et exemples.

Sortie : élément, grandeur, signal ou information produit par le système.

Pour un système asservi, la sortie est utilisée (boucle de rétroaction) pour juger la qualité de la tâche accomplie.

Référence ou consigne : grandeur ou modèle parfaitement connu, dont le comportement est celui que l'on attend du système ou processus. Dans un système bouclé, on essaie de calquer en permanence le comportement de la sortie réglée sur celui de la référence, en minimisant autant que nécessaire l'écart entre les deux.

Perturbations : ce sont les entrées parasites que l'on ne peut pas manipuler (incontrôlables) et que le système doit subir.

Système causal : si la variable indépendante est le temps (t), un système suit le principe de causalité lorsque le signal de sortie ne dépend que des valeurs présentes et passées (conditions initiales) de la variable d'entrée. Il n'est pas possible de prévoir l'état futur de la variable d'entrée, et rien n'arrive sans qu'il y ait une cause ou une raison déterminante.

Système linéaire : un système, ou une équation, est dit linéaire si les variables et leurs dérivées le définissant y apparaissent uniquement au premier degré.

Par exemple, si F fonction reliant x à y est linéaire, alors pour toutes les entrées $x_1(t)$ et $x_2(t)$ et quels que soient les nombres réels a et b , on peut écrire :

$$Y = F(a.x_1 + b.x_2) = a.F(x_1) + b.F(x_2)$$

Avec les systèmes linéaires, il est possible d'étudier séparément l'effet de chaque variable [$F(x_1)$, $F(x_2)$...] puis de faire la somme des résultats (« superposition »), pour obtenir l'effet combiné.

Système stationnaire : système dont les caractéristiques ne changent pas au cours du temps.

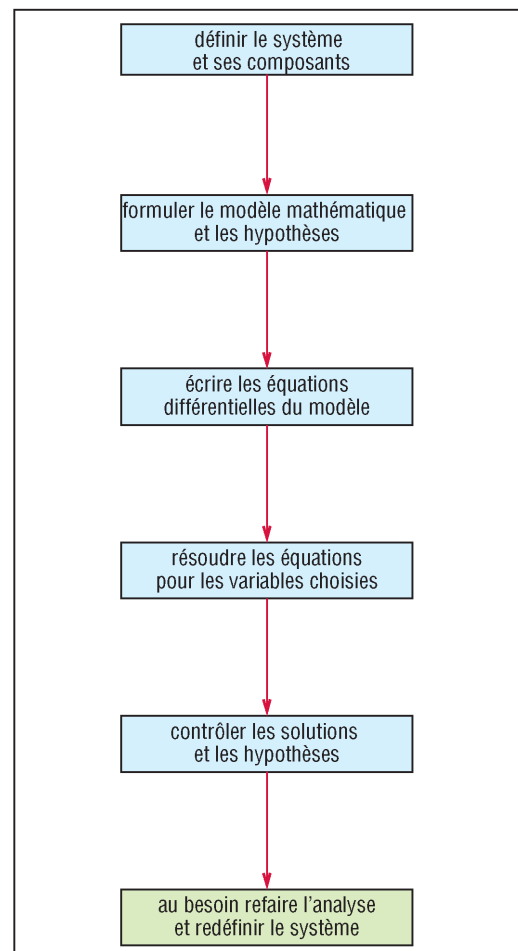
Systèmes continu et échantillonné : un système continu est un système dont les caractéristiques évoluent de manière continue au cours du temps. À la notion de système continu, on associe celle de système analogique. À la notion de système échantillonné, on fait correspondre celle de système numérique ou digital (page 508).

Asservissement : il consiste à appliquer une loi de variation à une ou plusieurs grandeurs (sortie réglée). Le signal d'entrée, ou consigne, suit une loi de référence, généralement non fixée à l'avance, et le système fonctionne en mode poursuite par rapport à cette loi. Le comportement est dit suiveur et les entrées varient rapidement et fréquemment.

Exemples : certaines directions assistées, systèmes de visée sur cible mobile, robots...

Régulation : elle consiste à maintenir une grandeur (sortie réglée) à une valeur fixée à l'avance. Le signal de référence, ou consigne reste constant tout au long de la durée de vie du système ou pendant des périodes plus ou moins longues. On a un comportement régulateur et les entrées varient peu.

Exemples : régulation d'un four à une température constante de 300 °C, climatiseur...

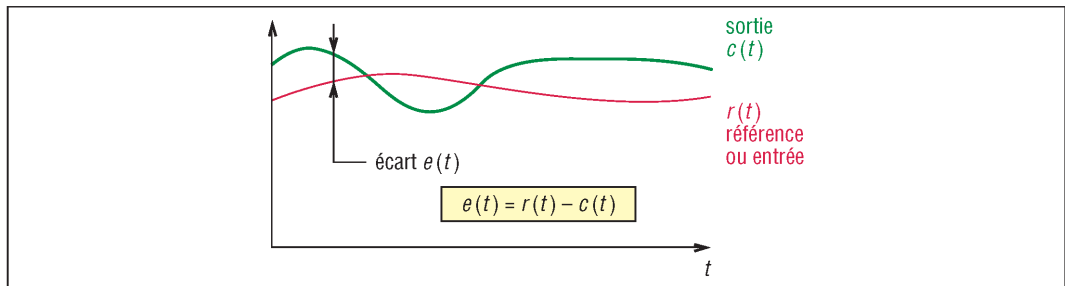


2. Mode de description des systèmes asservis.

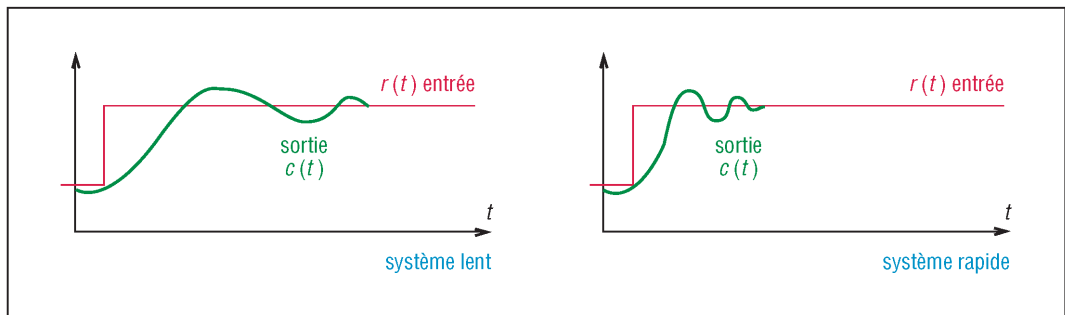
Modèles mathématiques : ce sont les équations différentielles, transformée de Laplace et autres outils mathématiques utilisés pour comprendre et décrire les systèmes asservis. Ils permettront, par exemple, de définir le signal de sortie en fonction du signal d'entrée.

2. Comportement des systèmes

Le comportement des systèmes bouclés est mis en évidence et défini par trois caractéristiques fondamentales : **précision**, **rapidité** et **stabilité**.



3. Écart et précision.

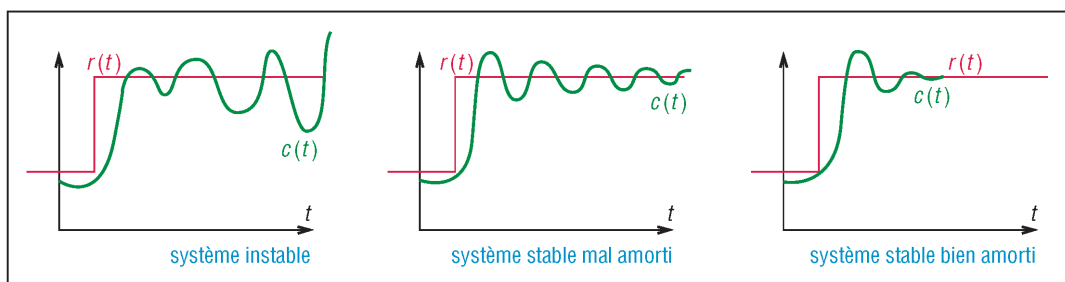


4. Exemples de systèmes lent et rapide.

Précision : elle traduit l'écart ou l'erreur, noté $e(t)$, avec laquelle la sortie $c(t)$, « grandeur réglée par le système », suit la loi d'entrée, référence ou consigne $r(t)$.

Rapidité : elle caractérise la capacité du système à réagir vite à une perturbation donnée. Il s'agit, autrement dit, de son aptitude, suite à une perturbation subie, à se rapprocher dans le temps le plus court possible de la valeur d'entrée ou consigne (« temps de réponse »).

Stabilité : elle définit la capacité du système à reprendre sa position d'équilibre après une perturbation.



5. Systèmes stables et instables, mal ou bien amortis.

Remarque : précision, rapidité et stabilité sont étroitement liées. En conception des systèmes bouclés, on cherche à rendre compatibles rapidité, précision et bon amortissement.

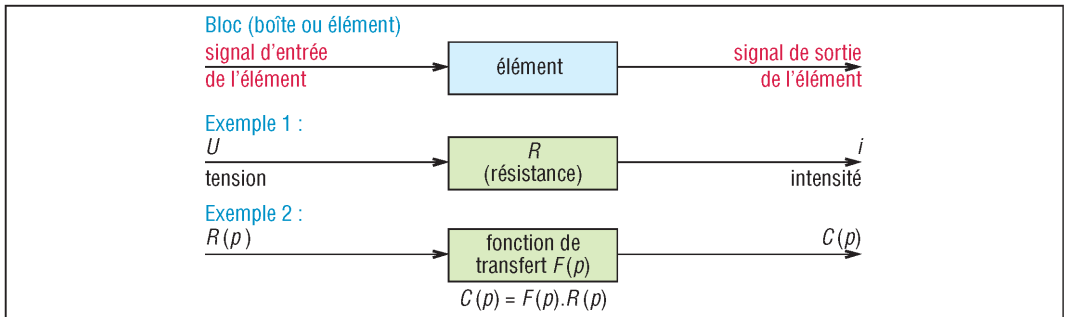
II - Schémas blocs ou diagramme fonctionnel

Les schémas blocs sont le mode de représentation le plus usuel des systèmes bouclés. Ils permettent de décrire sous forme de graphe un système asservi et les interactions qui existent entre les différentes parties.

1. Éléments de base

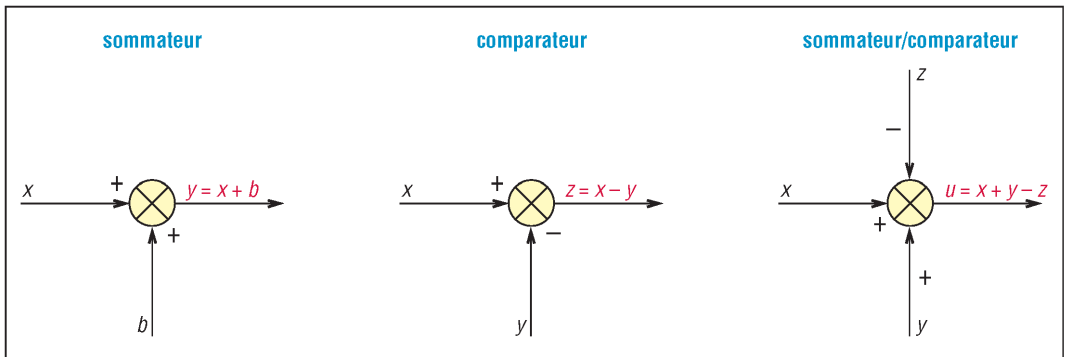
La représentation schématique repose sur quatre éléments de base : **bloc**, **sommateur** ou **comparateur**, **lignes de liaisons** et **point de dérivation**.

Bloc : un bloc peut représenter tout ou une partie d'un système. Deux flèches indiquent l'entrée, « flèche entrant à gauche », et la sortie, « flèche sortant à droite ».



6. Notion de bloc et exemples.

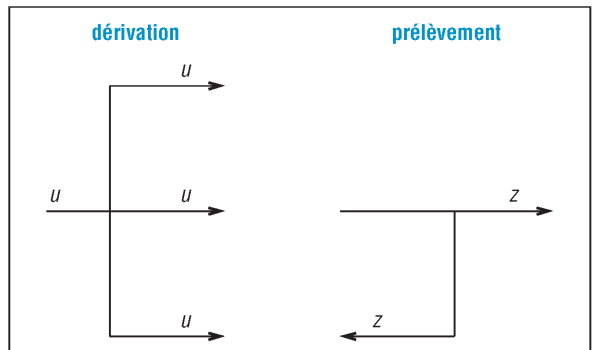
Sommateur ou comparateur (ou soustracteur) : symbolisé par un cercle, avec ou sans croix à l'intérieur, il permet de décrire les opérations d'addition ou de soustraction entre les signaux ou informations circulant dans le système. Le signal de sortie, flèche sortante, fait la somme des signaux d'entrée en tenant compte des signes (+ ou -) indiqués.



7. Sommateur/comparateur.

Lignes de liaisons : représentées par des lignes orientées ou flèches, elles indiquent les voies de circulation des signaux ou informations dans le système.

Point de dérivation ou de prélèvement : il indique un embranchement ou une divergence dans les lignes de liaisons ou dans la circulation des signaux ou informations.

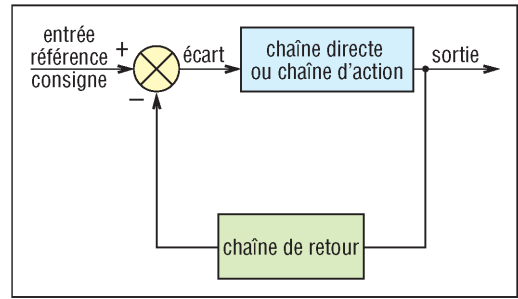


8. Point de dérivation ou de prélèvement.

2. Structure en boucle fermée

Les systèmes en boucle fermée, avec boucle de rétroaction, apparaissent chaque fois qu'au cours d'une opération, un système prend en compte une mesure de son état pour se modifier.

La représentation la plus usuelle (**fig. 9**) se compose d'une chaîne directe ou d'action avec une chaîne de retour et un comparateur. Le signal de référence ou consigne arrive en général sur le comparateur.

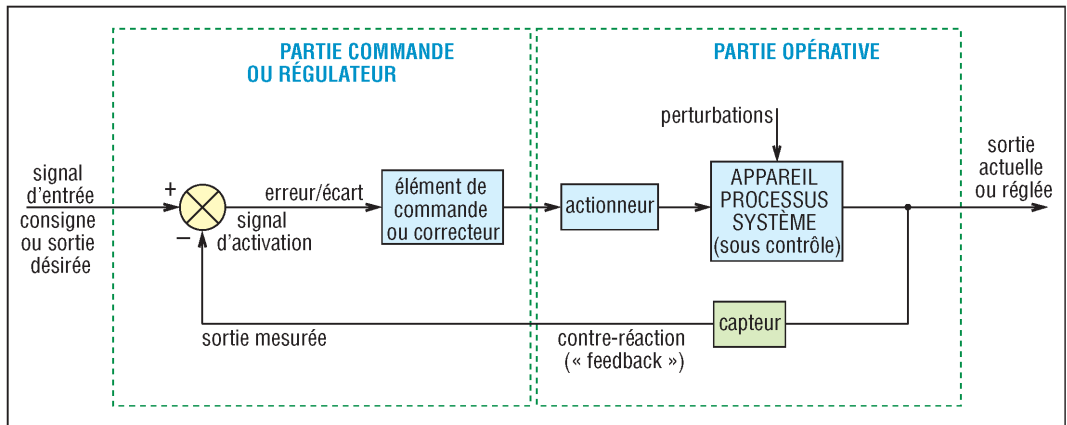


9. Structure générale en boucle fermée.

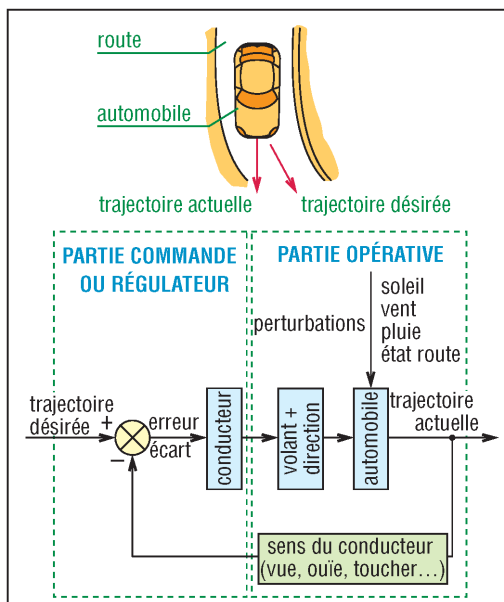
Chaîne directe : ensemble de tous les éléments ou blocs placés entre le comparateur et la sortie réglée.

Chaîne de retour : ensemble des éléments réalisant une relation de retour entre la sortie réglée et le comparateur (capteurs de mesure par exemple).

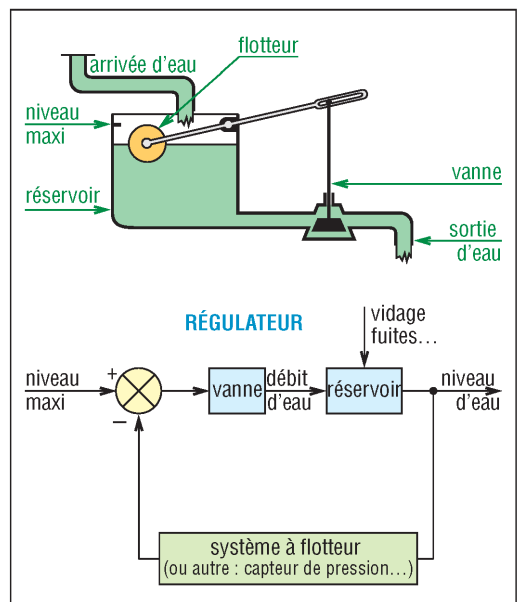
Système en boucle ouverte : il correspond au système en boucle fermée avec une coupure dans la chaîne de retour juste avant le comparateur. Seule la chaîne directe est active.



10. Composants typiques des systèmes asservis.



11. Application de la figure 10 à la conduite d'une automobile.



12. Application de la figure 10 à la régulation du niveau d'un réservoir.

III - Transformée de Laplace

La transformée de Laplace est un des modèles mathématiques les plus utilisés pour comprendre, analyser, décrire et faire la synthèse des systèmes asservis.

1. Transformée de Laplace, notations et définitions

La transformée de Laplace transforme une fonction continue du temps (t) en une fonction d'une variable complexe (p) faisant intervenir la fréquence (ω).

Notations :

L : lettre symbolisant la transformée de Laplace.

$f(t)$: fonction du temps t , telle que $f(t) = 0$ si $t < 0$.

$F(p)$: transformée de Laplace de $f(t)$.

p : variable complexe telle que $p = \sigma + j \cdot \omega = r \cdot e^{j\theta}$.

avec σ et ω variables réelles telles que : $\sigma = r \cos \theta$; $\omega = r \sin \theta$; $r^2 = \sigma^2 + \omega^2$; $\theta = \arg(\omega/\sigma)$.

Remarque : $j = \sqrt{-1}$; $j^2 = -1$

Définition de la transformée de Laplace :

$$L[f(t)] = F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} [f(t)] dt$$

| Transformées de Laplace de fonctions usuelles | | | |
|--|--------------------------|--|---|
| fonction $f(t)$; $t \geq 0$ | transformée $F(p)$ | fonction $f(t)$; $t \geq 0$ | transformée $F(p)$ |
| impulsion unité (Dirac) $\delta(t)$ | 1 | impulsion (K constante) $K \cdot \delta(t)$ | K |
| échelon unité 1 | $\frac{1}{p}$ | échelon (K constante) K | $\frac{K}{p}$ |
| rampe unité t | $\frac{1}{p^2}$ | rampe $K \cdot t$ | $\frac{K}{p^2}$ |
| polynôme t^n | $\frac{n!}{p^{n+1}}$ | $\sin \omega t$ | $\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$ |
| exponentielle e^{-at} | $\frac{1}{p+a}$ | $\cos \omega t$ | $\frac{p}{p^2 + \omega^2}$ |
| $1 - e^{-at}$ | $\frac{a}{p(p+a)}$ | sinus amorti $e^{-at} \cdot \sin \omega t$ | $\frac{\omega}{(p+a)^2 + \omega^2}$ |
| $\frac{1}{a} (1 - e^{-at})$ | $\frac{1}{p(p+a)}$ | cosinus amorti $e^{-at} \cdot \cos \omega t$ | $\frac{p+a}{(p+a)^2 + \omega^2}$ |
| $t e^{-at}$ | $\frac{1}{(p+a)^2}$ | $1 - \cos \omega t$ | $\frac{\omega^2}{p(p^2 + \omega^2)}$ |
| $t^2 e^{-at}$ | $\frac{2}{(p+a)^3}$ | $\omega t - \sin \omega t$ | $\frac{\omega^3}{p^2(p^2 + \omega^2)}$ |
| $t^n e^{-at}$ $n = 1, 2, 3, \dots$ | $\frac{n!}{(p+a)^{n+1}}$ | $t \cdot \cos \omega t$ | $\frac{p^2 - \omega^2}{(p^2 + \omega^2)^2}$ |
| $\frac{1}{b-a} (e^{-at} - e^{-bt})$ | $\frac{1}{(p+a)(p+b)}$ | $\sin h\omega t$ | $\frac{\omega}{p^2 - \omega^2}$ |
| $\frac{1}{b-a} (b e^{-bt} - a e^{-at})$ | $\frac{p}{(p+a)(p+b)}$ | $\cos h\omega t$ | $\frac{p}{p^2 - \omega^2}$ |
| $\left(1 + \frac{1}{a-b} (b e^{-at} - a e^{-bt})\right)$ | $\frac{ab}{p(p+a)(p+b)}$ | $\frac{1}{2\omega} (\sin \omega t + \omega t \cos \omega t)$ | $\frac{p^2}{(p^2 + \omega^2)^2}$ |
| $\frac{1}{a^2} (1 - e^{-at} - a t e^{-at})$ | $\frac{1}{p(p+a)^2}$ | $\sin \omega t - \omega t \cos \omega t$ | $\frac{2\omega^3}{(p^2 + \omega^2)^2}$ |
| $\frac{1}{a^2} (at - 1 + e^{-at})$ | $\frac{1}{p^2(p+a)}$ | $\frac{1}{2\omega} t \sin \omega t$ | $\frac{p}{(p^2 + \omega^2)^2}$ |

2. Transformée de Laplace inverse

Notation : L^{-1}

Définition : $L^{-1} [F(p)] = f(t)$

Utilisation : lorsque les fonctions $F(p)$ sont sous forme de fractions, la méthode la plus simple consiste à faire une décomposition en éléments simples de façon à pouvoir exploiter le tableau des transformées des fonctions usuelles.

Exemple : soit $F(p) = \frac{p+2}{(p+5)(p+10)}$

Décomposons $F(p)$ en éléments simples à partir de $(p+5)$ et de $(p+10)$:

$$F(p) = \frac{p+2}{(p+5)(p+10)} = \frac{A}{p+5} + \frac{B}{p+10}$$

Après réduction au même dénominateur et identification des coefficients, on obtient :

$$F(p) = \frac{A(p+10)+B(p+5)}{(p+5)(p+10)} = \frac{p(A+B)+(10A+5B)}{(p+5)(p+10)} = \frac{-3}{5(p+5)} + \frac{8}{5(p+10)}$$

avec : $A+B=1$ et $10A+5B=2$ qui donne $A=-3/5$ et $B=8/5$.

Par le tableau des transformées des fonctions usuelles [e^{-at} de transformée $1/(p+a)$], on obtient :

$$L^{-1}[F(p)] = L^{-1}\left[\frac{-3}{5(p+5)}\right] + L^{-1}\left[\frac{8}{5(p+10)}\right] = -\frac{3}{5}e^{-5t} + \frac{8}{5}e^{-10t}$$

3. Propriétés de la transformation de Laplace

a) Transformée de la dérivée et de l'intégrale de $f(t)$

Dans le cas des fonctions (causales) nulles pour $t < 0$: $L[f(t)] = F(p) = \int_0^{\infty} f(t).e^{-pt} dt$, intégrons par partie la transformée de la dérivée première $f'(t)$ de $f(t)$.

Rappel : $\int u.dv = u.v - \int v.du$

En posant $v = f(t)$ et $u = e^{-pt}$, on obtient :

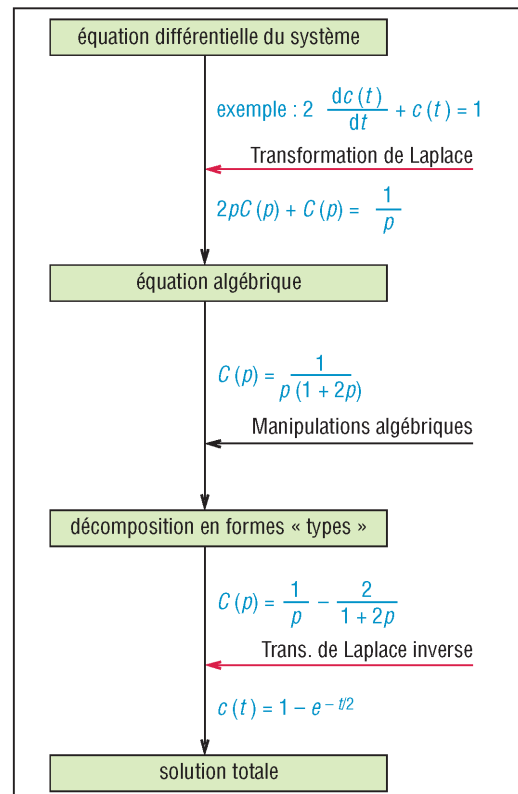
$$\begin{aligned} L[f'(t)] &= \int_0^{\infty} \frac{df(t)}{dt} . e^{-pt} dt \\ &= [f(t).e^{-pt}]_0^{\infty} - \int_0^{\infty} f(t).(-p.e^{-pt})dt \\ &= 0 - f(0^+) + p.\int_0^{\infty} f(t).e^{-pt}dt \\ f(0^+) &= \lim_{t \rightarrow 0^+} f(t) : \text{limite de } f(t) \end{aligned}$$

lorsque t tend vers 0 par valeurs positives.

Propriété : lorsque la condition initiale est nulle, c'est-à-dire si $f(0^+) = 0$ pour $t = 0^+$, la transformée de la dérivée $f'(t)$ de $f(t)$ vaut p fois $L[f(t)]$ ou $pF(p)$.

$$L[f'(t)] = \int_0^{\infty} \frac{df(t)}{dt} . e^{-pt} dt = pF(p) - f(0^+);$$

lorsque $f(0^+) = 0$, $L[f'(t)] = pF(p)$



13. Utilisation de la transformée de Laplace.

Généralisation aux dérivées seconde, troisième, etc. : si dans une équation différentielle toutes les conditions initiales sont nulles, on peut associer à toute dérivée d'ordre n , une fonction en p de la forme $p^n.F(p)$.

Exemple : à l'équation différentielle du second ordre $\alpha \cdot \frac{d^2 f(t)}{dt^2} + \beta \cdot \frac{df(t)}{dt} + f(t) = 0$, on associe :
 $F(p) \cdot [\alpha \cdot p^2 + \beta \cdot p + 1] = 0$.

Remarque : de la même manière on montre $L[\int_0^t f(t)dt] = \frac{1}{p} L[f(t)] = \frac{F(p)}{p}$

| Principales propriétés de la transformée de Laplace | |
|--|--|
| $L[f(t)] = F(p)$ | $L[A \cdot f(t)] = A \cdot F(p)$ |
| $L[f_1(t) \pm f_2(t)] = F_1(p) \pm F_2(p)$ | $L[t \cdot f(t)] = -\frac{dF(p)}{dp}$ |
| $L[t^2 \cdot f(t)] = \frac{d^2 F(p)}{dp^2}$ | $L[t^n \cdot f(t)] = (-1)^n \frac{d^n F(p)}{dp^n}$ |
| $L[\int_0^t f(t)dt] = \frac{F(p)}{p}$ | $L\left[f\left(\frac{t}{a}\right)\right] = a \cdot F(ap)$ |
| $L[f'(t)] = L\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = p \cdot F(p) - f(0^+)$ $f(0^+) : t \text{ tend vers } 0 \text{ par valeurs positives}$ | $L[f''(t)] = L\left[\frac{d^2 f(t)}{dt^2}\right] = p^2 \cdot F(p) - p \cdot f(0^+) - \frac{df(0^+)}{dt}$ |
| $L\left[\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right] = p^n \cdot F(p) - p^{n-1} f(0^+) - p^{n-2} f'(0^+) - \dots - \frac{d^{n-1} f(0^+)}{dt^{n-1}}$ | $L[e^{-at} f(t)] = F(p+a)$ |

b) Théorème de la valeur finale

Le théorème permet d'obtenir la valeur de $f(t)$ lorsque $t \rightarrow \infty$, à partir de $pF(p)$ lorsque $p \rightarrow 0$.

Énoncé : si la transformée de $f(t)$ existe, la limite de $f(t)$ lorsque t tend vers l'infini, et à la condition que cette limite existe, se comporte comme p fois la transformée $F(p)$ lorsque p tend vers 0.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = f(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} pF(p) \quad \text{si } \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) \text{ existe}$$

Exemple : limite de $f(t) = 1 - e^{-t}$, $t \geq 0$, lorsque $t \rightarrow \infty$

Transformée de $f(t)$: $F(p) = \frac{1}{p(p+1)}$; $pF(p) = \frac{1}{p+1}$; $\lim_{p \rightarrow 0} pF(p) = \frac{1}{0+1} = 1$

Théorème : $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = f(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} pF(p) = 1$

c) Théorème de la valeur initiale

Complémentaire du théorème précédent, il permet d'avoir la valeur de $f(t)$ lorsque $t \rightarrow 0^+$ à partir de $pF(p)$ lorsque $p \rightarrow \infty$.

Énoncé : si la transformée de $f(t)$ existe, la limite de $f(t)$, lorsque t tend vers 0 par valeurs positives, se comporte comme p fois la transformée $F(p)$ lorsque p tend vers l'infini, à la condition que cette limite existe.

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} f(t) = f(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} pF(p)$$

Exemple : reprenons l'exemple précédent, $f(t) = 1 - e^{-t}$, $t \geq 0$, lorsque $t \rightarrow 0$.

Théorème : $\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} pF(p) = \frac{1}{p+1} = 0$

IV - Fonction de transfert (ou transmittance)

La fonction de transfert est une fonction caractéristique du comportement dynamique d'un système ou d'un composant. En automatique, elle est utilisée pour représenter le rapport entre les modules des variables d'entrée et de sortie (d'unités généralement différentes) des systèmes définies par des équations linéaires.

1. Définition et notations

Définition : la fonction de transfert d'un système est définie comme le rapport de la transformée de Laplace de la sortie (réponse) sur celle de son entrée, sous l'hypothèse de conditions initiales nulles (en cas contraire, faire un changement de variable).

$$[\text{Fonction transfert}] = G(p) = \left(\frac{L[\text{sortie}]}{L[\text{entrée}]} \right)_{\text{conditions initiales nulles}} = \frac{Y(p)}{X(p)}$$

Forme générale : soit un système défini par l'équation différentielle (x entrée et y sortie) :

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{n-2} y}{dt^{n-2}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x + b_1 \frac{dx}{dt} + \dots + b_m \frac{d^m x}{dt^m}$$

Si $Y(p)$ est la transformée de $y(t)$ et $X(p)$ celle de $x(t)$, la transformée de l'équation donne :

$$a_n p^n Y(p) + a_{n-1} p^{n-1} Y(p) + \dots + a_1 p Y(p) + a_0 Y(p) = b_0 X(p) + b_1 p X(p) + \dots + b_m p^m X(p), \text{ où :}$$

$$Y(p)[a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0] = X(p)[b_0 + b_1 p + \dots + b_m p^m]. \text{ Il en résulte :}$$

$$[\text{Fonction transfert}] = G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}$$

Si la puissance la plus élevée en p du dénominateur est n , le système est dit d'ordre n .

Autre notation usuelle : $G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{C}{p^\alpha} \cdot \frac{1 + b'_1 p + b'_2 p^2 + \dots}{1 + a'_1 p + a'_2 p^2 + \dots}$

α est appelé classe du système ($\alpha \geq 0$) ; c , a'_i et b'_i sont des constantes réelles.

Remarque : $\lim_{p \rightarrow 0} G(p) \approx \frac{C}{p^\alpha}$ et $\lim_{p \rightarrow \infty} G(p) = C \cdot \frac{p^m + \dots}{p^n + \dots} \approx \frac{C}{p^{n-m}}$

Exemple 1 : déterminons la fonction de transfert d'un système dont les signaux d'entrée $e(t)$ et de sortie $z(t)$

sont liés par : $\frac{d^2 z}{dt^2} + 5 \frac{dz}{dt} + 3z = e + \frac{de}{dt}$.

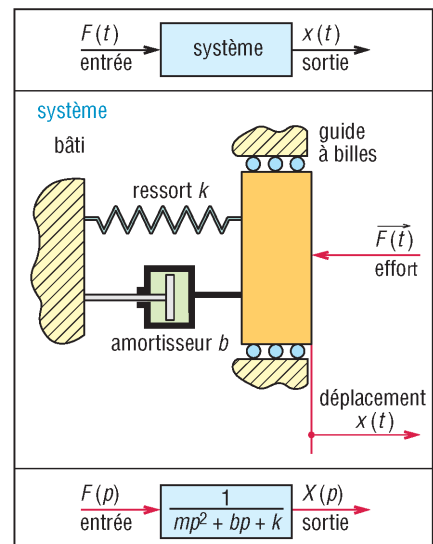
Transformée : $p^2 Z(p) + 5pZ(p) + 3Z(p) = E(p) + pE(p)$
ou $Z(p)[p^2 + 5p + 3] = E(p)[1 + p]$

Fonction de transfert du système :

$$G(p) = \frac{Z(p)}{E(p)} = \left[\frac{p+1}{p^2+5p+3} \right]; \text{ système d'ordre 2.}$$

Exemple 2 : étude d'un système ressort amortisseur.

L'effort $F(t)$ est amorti par un ensemble ressort (exerce un effort $k \cdot x$) et amortisseur à frottement visqueux. Ce dernier exerce une action $b \cdot x'(t)$ proportionnelle à la vitesse de translation $x'(t)$ de la masse m . Les trois actions sont supposées colinéaires (fig. 14).



14. Système ressort et amortisseur.

Le bâti est supposé fixe et les frottements sont négligés. Sous l'action de $F(t)$, variable d'entrée, la masse m se déplace de $x(t)$, variable de sortie.

Résolution : l'application du principe fondamental de la dynamique à la masse m , donne l'équation différentielle : $F - kx - b \frac{dx}{dt} = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2}$ qui s'écrit encore : $m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + b \cdot \frac{dx}{dt} + kx = F(t)$

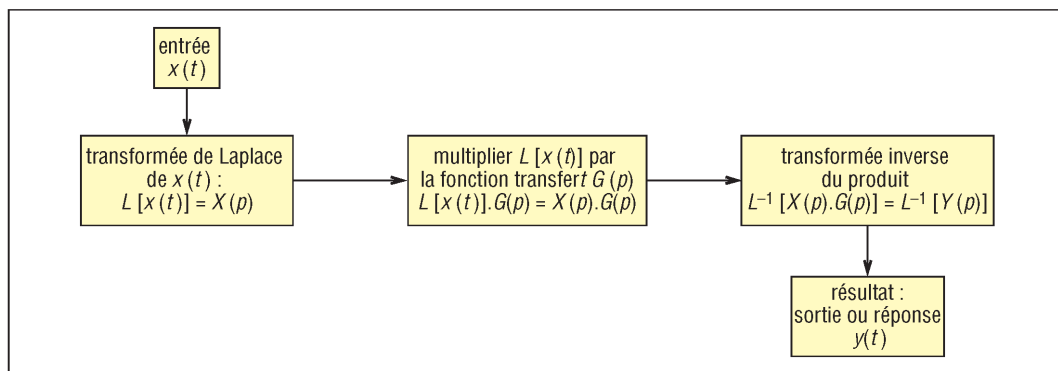
Transformée de Laplace : $mp^2X(p) + bpX(p) + kX(p) = F(p)$

Fonction de transfert :

$$G(p) = \frac{L[\text{sortie}]}{L[\text{entrée}]} = \frac{X(p)}{F(p)} = \frac{1}{mp^2 + bp + k} \quad (\text{système du 2}^\circ \text{ ordre})$$

2. Démarche pour déterminer la réponse $y(t)$ d'un système à une entrée $x(t)$

La démarche générale est indiquée figure 15.



15. Utilisation de la fonction de transfert.

Remarque : l'utilisation des fonctions de transfert se limite aux systèmes linéaires et invariants. Une fonction transfert ne fournit pas d'informations sur la structure physique d'un système ; en effet, des systèmes très différents peuvent avoir une même fonction de transfert.

V - Schémas blocs et algèbre correspondant

1. Définitions et notations

Notations :

$G(p)$: fonction de transfert directe (ou de transfert d'action).

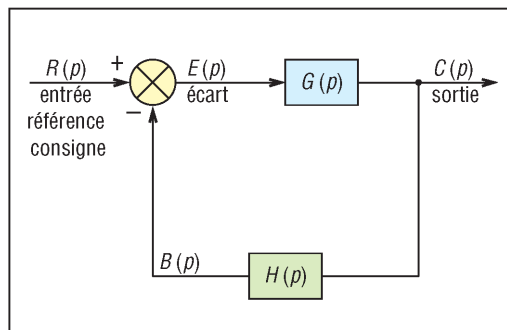
$H(p)$: fonction de transfert de retour.

$R(p)$: entrée, référence, signal ou consigne d'entrée [transformée de $r(t)$].

$C(p)$: sortie réglée ou signal de sortie [transformée de $c(t)$].

$B(p)$: signal de retour modifié par $H(p)$ [transformée de $b(t)$].

$E(p)$: écart entre signal de retour $B(p)$ et consigne $R(p)$ [transformée de $e(t)$].



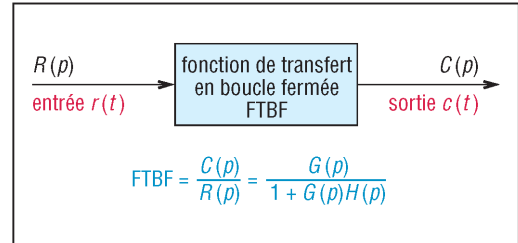
16. Forme canonique des systèmes asservis.

a) Forme canonique

Un système complexe est souvent la combinaison de plusieurs sous-systèmes plus simples ayant chacun une fonction de transfert associée. Compte tenu des liaisons entre blocs, il peut être nécessaire ou intéressant de déterminer la fonction de transfert global de plusieurs blocs ou simplifier un diagramme de base. Il est ainsi possible de ramener n'importe quel système complexe à une forme résultante, appelée forme canonique.

À partir de la forme canonique figure 16, on peut écrire les équations suivantes :

$$\begin{aligned} E(p) &= R(p) - B(p) ; \\ B(p) &= H(p).C(p) ; \\ C(p) &= G(p).E(p) = G(p).[R(p) - B(p)] \\ &= G(p)[R(p) - H(p).C(p)] \\ \text{d'où : } C(p) + G(p)H(p)C(p) &= G(p)R(p) \\ \text{et } C(p)/R(p) &= G(p)/[1+G(p)H(p)]. \end{aligned}$$



17. FTBF du système.

b) Fonction de transfert du système en boucle fermée ou FTBF

$$\text{FTBF} = \frac{C(p)}{R(p)} = \frac{G(p)}{1 + G(p)H(p)} = \frac{G}{1 + GH}$$

Remarque : pour un retour unitaire, $H(p) = 1$: $\text{FTBF}' = \frac{G}{1+G}$; si $G \gg 1$, alors la FTBF' tend vers 1 et $C(p) \approx R(p)$, autrement dit la sortie $c(t)$ suit la consigne $r(t)$.

c) Fonction de transfert du système en boucle ouverte ou FTBO

Le système en boucle ouverte correspond au système fermé sans boucle de rétroaction, autrement dit, on ouvre ou on fait une coupure dans la chaîne de retour.

Définition : la fonction de transfert du système en boucle ouverte est égale au produit de la fonction de transfert de la chaîne directe $G(p)$ par celle de la chaîne de retour $H(p)$.

$$\begin{aligned} \text{FTBO} &= G(p)H(p) \\ &= [\text{fonction transfert chaîne directe}] \times [\text{fonction transfert chaîne de retour}] \end{aligned}$$

d) Relation entre FTBF et FTBO

$$\text{FTBF} = \left(\frac{G(p)H(p)}{1 + G(p)H(p)} \right) \cdot \frac{1}{H(p)} = \left(\frac{\text{FTBO}}{1 + \text{FTBO}} \right) \cdot \frac{1}{H(p)} = \frac{G(p)}{1 + \text{FTBO}}$$

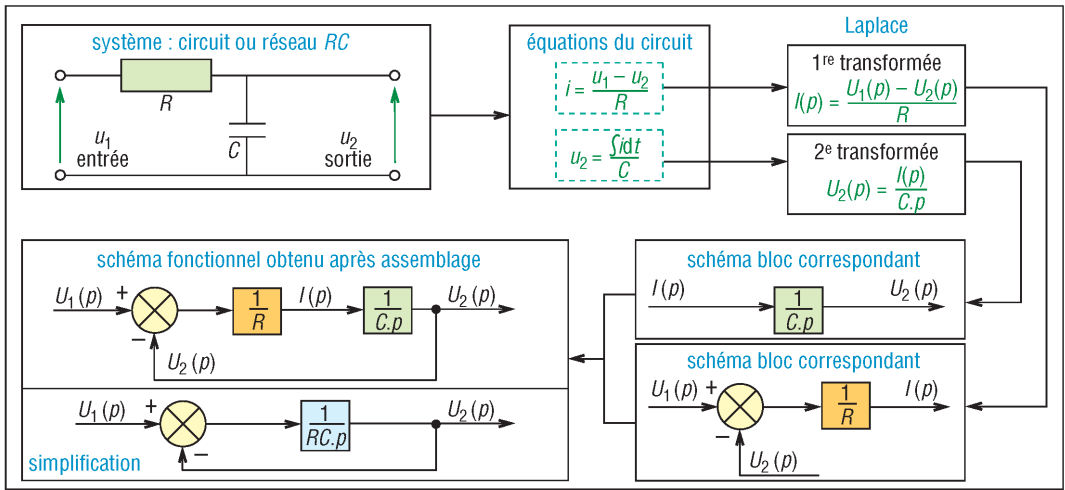
Remarque : les théories et méthodes développées par la suite utilisent la connaissance de la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) pour analyser les performances et le comportement de celle en boucle fermée (FTBF).

2. Tracé des schémas fonctionnels

Pour tracer le schéma fonctionnel d'un système, il faut, dans l'ordre :

- écrire les équations décrivant le comportement dynamique de chacun des éléments ;
- déterminer les transformées de Laplace de chaque équation (conditions initiales nulles) ;
- représenter chaque équation transformée sous la forme d'un schéma bloc ;
- assembler l'ensemble des schémas blocs pour obtenir le schéma fonctionnel du système ;
- simplifier, au besoin, le schéma obtenu et le mettre si possible sous forme canonique.

Exemple : circuit électrique RC, voir méthode de tracé figure 18.



18. Détermination du schéma fonctionnel d'un circuit RC.

3. Algèbre des schémas blocs - Table de base

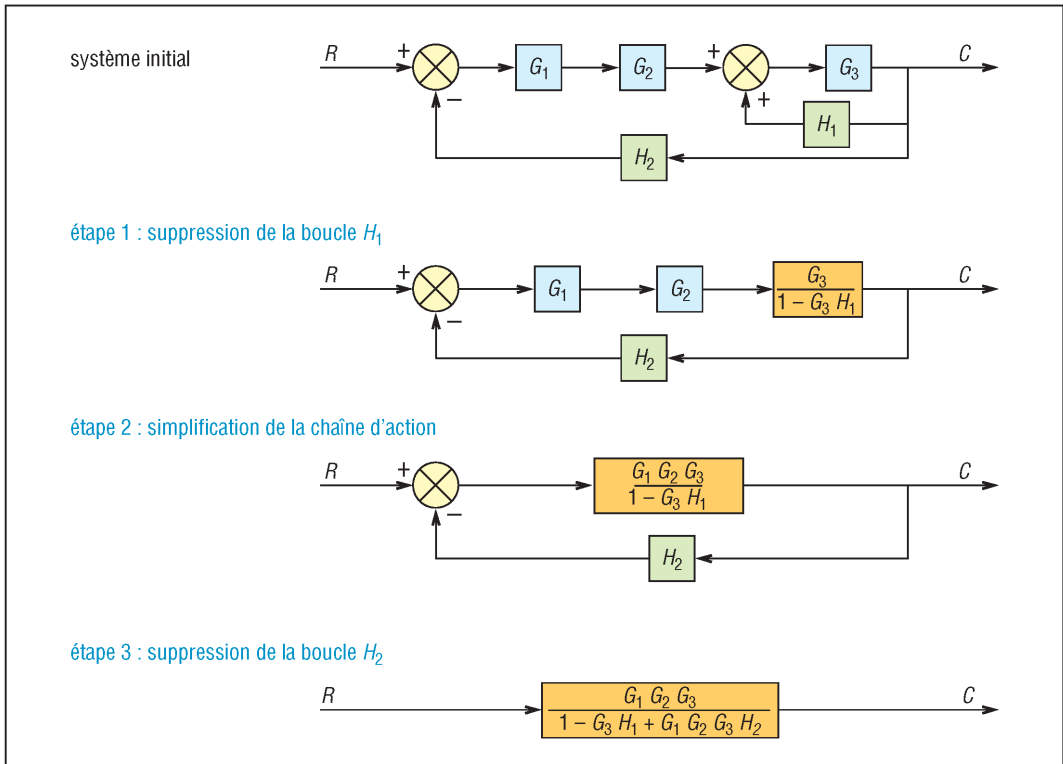
| Algèbre des schémas blocs | | |
|--|------------------|-------------------|
| type de transformation (équation) | schéma de départ | schéma équivalent |
| combinaison de blocs en cascade (ou en série) $Z = X(G_1G_2)$ $Z = (G_2G_1)X$ | | |
| déplacer un sommateur derrière un bloc $Z = G(X + Y)$ ou $Z = G(X - Y)$ | | |
| déplacer un sommateur devant un bloc $Z = GX + Y$ ou $Z = GX - Y$ | | |
| déplacer un point de dérivation devant un bloc $Y = GX$ | | |
| déplacer un point de dérivation derrière un bloc $Y = GX$ | | |
| association d'éléments en parallèle avec suppression d'une boucle $Z = G(X - HZ)$ | | |
| ramener le système à un système à retour unité | | |

19. Algèbre des schémas blocs. Table de base.

4. Réduction des schémas blocs

a) Exemple 1

Le système complexe initialement proposé figure 20 est réduit en trois étapes successives.



20. Exemple de système complexe à réduire.

Remarques : le signal H_1 arrive sur le sommateur avec un signe +, ce qui donne $1 - G_3 H_1$ au dénominateur de l'expression simplifiée de l'étape 1. Un signe - aurait donné $1 + G_3 H_1$.

Dans l'étape 2, la fonction de transfert de la chaîne d'action est égale au produit des trois fonctions de transfert de la chaîne d'action de l'étape 1.

b) Exemple 2 : accéléromètre

Le chariot de l'accéléromètre se déplace de $x_1(t)$, variable d'entrée. La masse m , libre de translater à l'intérieur du chariot (frottement négligé), se déplace de $x_2(t)$, variable de sortie. x_2 est mesurée à partir de la position d'équilibre lorsque $x_1 = 0$.

L'étude dynamique du système donne les équations différentielles suivantes :

$$F(t) = m \frac{d^2 x_2}{dt^2} \text{ et } F(t) = -b \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) - K(x_2 - x_1)$$

Transformées de Laplace des équations :

$$F(p) = mp^2 X_2(p) \text{ et } F(p) = -b[pX_2(p) - pX_1(p)] - K[X_2(p) - X_1(p)]$$

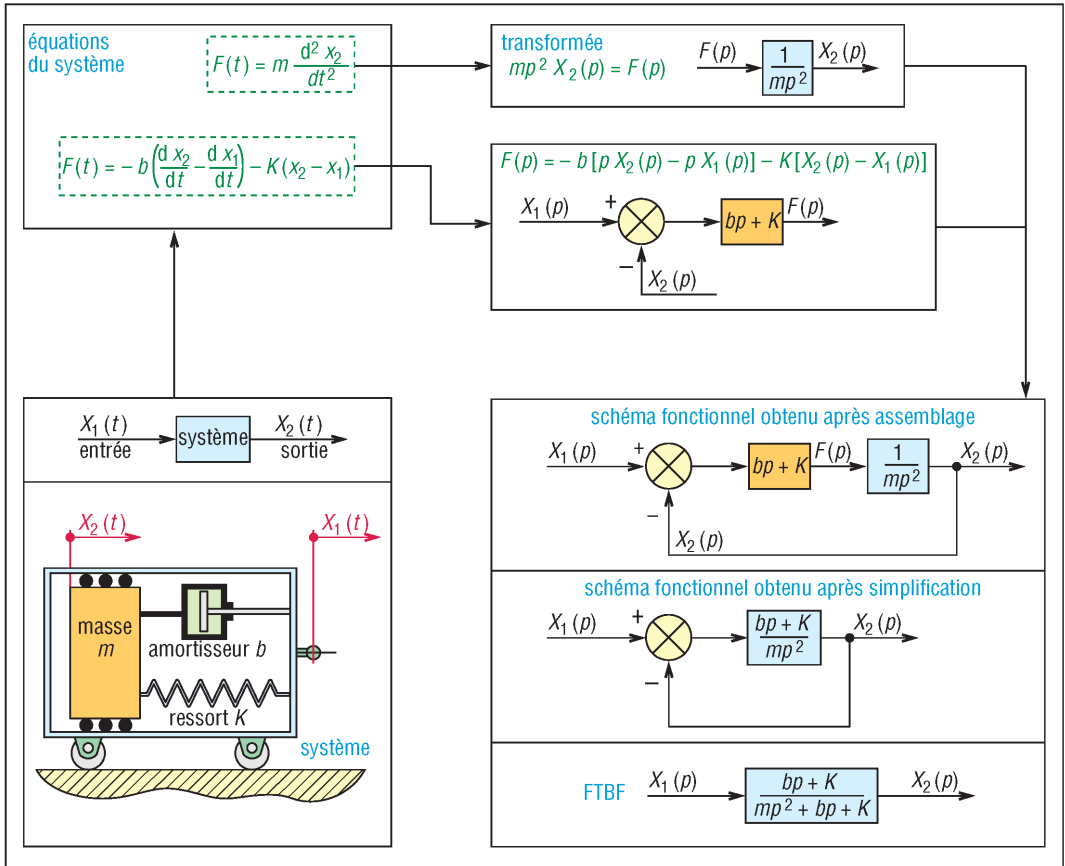
en combinant les deux transformées on obtient :

$$\frac{F(p)}{X_2(p)} = mp^2 = (bp + K) \left[\frac{X_1(p)}{X_2(p)} - 1 \right]$$

Après calcul, on obtient la fonction de transfert du système :

$$\frac{X_2(p)}{X_1(p)} = \frac{bp + K}{mp^2 + bp + K}$$

La fonction de transfert peut aussi s'obtenir en simplifiant directement le schéma fonctionnel, voir figure 21.



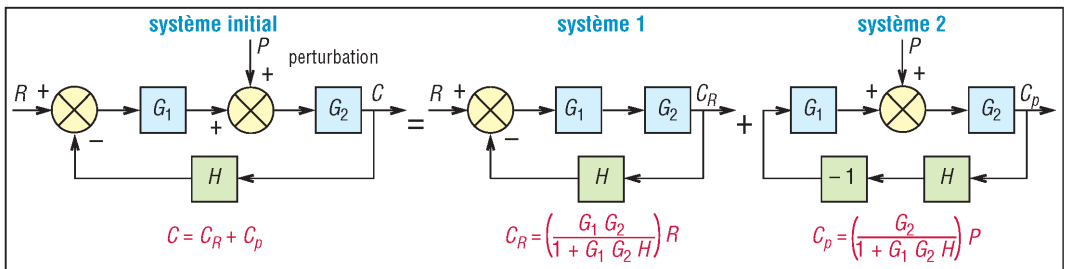
21. Accéléromètre.

5. Réduction d'un système asservi soumis à une perturbation P

Soit à réduire le système soumis à une perturbation P proposé figure 22.

Ce système comporte deux entrées, R l'entrée de référence et P la perturbation.

Dans la mesure où le système est linéaire, le problème global peut se ramener à la somme de deux problèmes simples : Système = Système 1 + Système 2.



22. Système soumis à une perturbation.

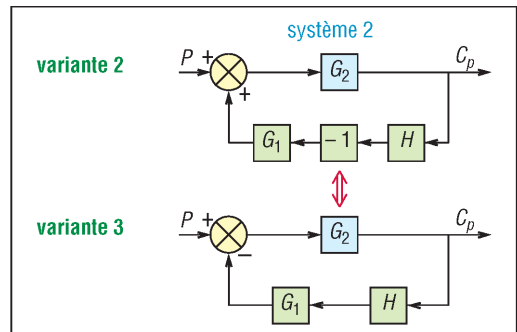
L'addition des deux solutions C_R (système 1) et C_P système 2, donne la réponse totale :

$$C = C_R + C_P = \left(\frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2 H} \right) R + \frac{G_2 P}{(1 + G_1 G_2 H)}$$

après simplification, on obtient :

$$C = \frac{G_2}{(1 + G_1 G_2 H)} (G_1 R + P)$$

Remarque : le système 2 peut être représenté sous plusieurs formes variantes (fig. 23).



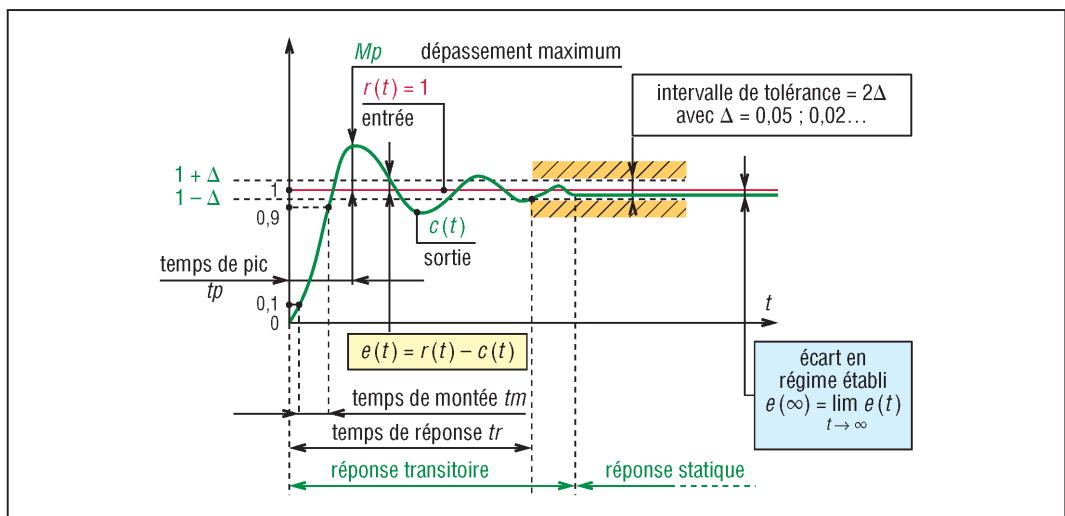
23. Système 2, formes variantes.

VI - Réponses des systèmes asservis

Le comportement dynamique d'un système, c'est-à-dire la façon dont celui-ci réagit au cours du temps, dépend de la nature de son entrée qui peut se présenter sous des formes variées. Les études temporelles usuelles utilisent quelques entrées types ou signaux tests : échelon, rampe, impulsion, sinusoïde... Des réponses plus complexes pourront toujours être obtenues par combinaison linéaire ou « superposition » des réponses types de ces signaux tests.

1. Définitions et notations

| Période transitoire : principaux paramètres | |
|---|--|
| Paramètres | Définitions |
| t_m | Temps de montée : temps nécessaire pour que la réponse passe de 10 à 90 % (ou 5 à 95 %, ou encore 0 à 100 %) de la valeur finale. |
| M_p | Dépassement maximum : valeur du dépassement maximum mesurée à partir de l'unité (ou de la valeur finale). Peut être exprimé en %. |
| t_r | Temps de réponse : temps mis par la réponse pour se stabiliser dans un intervalle compris entre +5 % et -5 % (ou entre +2 % et -2 %) de la valeur finale. |
| $e(\infty)$ | Écart en régime établi : valeur de l'écart $e(t)$ lorsque t tend vers l'infini. |



24. Réponse transitoire et réponse statique.

2. Entrées types ou signaux tests fondamentaux

Échelon : l'échelon est le passage instantané d'une entrée stable ou constante à une autre entrée stable ou constante. Par exemple, l'échelon unité correspond au passage de 0 à 1.

La **réponse indicielle** est la réponse d'un système à une entrée échelon unité.

Rampe : entrée variant progressivement, elle permet notamment d'observer la réponse d'un système lors d'un fonctionnement en mode poursuite.

Impulsion : signal d'entrée très court ou bref, mais suffisamment durable pour engendrer une sortie mesurable. L'impulsion permet d'observer la réponse d'un système à une perturbation soudaine et passagère.

Dans le cas d'une impulsion unité, ou impulsion de Dirac, l'aire sous la courbe $r(t) = \delta(t)$, quelle que soit la forme retenue pour celle-ci, est égale à 1.

| signal | échelon $R(p) = \frac{E_0}{p}$ | rampe $R(p) = \frac{a}{p^2}$ | impulsion $R(p) = A$ |
|-----------------|--|---|--|
| entrées de base | <p>$r(t) = E_0$ si $t \geq 0$ $r(t) = 0$ si $t < 0$</p> | <p>rampe a $r(t) = a \cdot t$ si $t \geq 0$ $r(t) = 0$ si $t < 0$</p> | <p>$r(t) = A \cdot \delta(t)$ $\delta(t) = 0$ si $t \neq 0$ $\delta(t) = \infty$ si $t = 0$ aire = A</p> |
| variantes | <p>échelon unité $r(t) = 1$ retardé E_0</p> | <p>rampe unité $r(t) = t$ 45° échelon et rampe</p> | <p>impulsion unitaire (aire = 1) $r(t) = \delta(t)$ $\frac{1}{a}$</p> |

25. Principaux signaux d'entrée fondamentaux.

3. Réponses des systèmes du 1^{er} ordre aux entrées types

Un système du 1^{er} ordre d'entrée $r(t)$ est un système dont la sortie $c(t)$ obéit à une équation différentielle du 1^{er} ordre qui peut se mettre sous la forme générale :

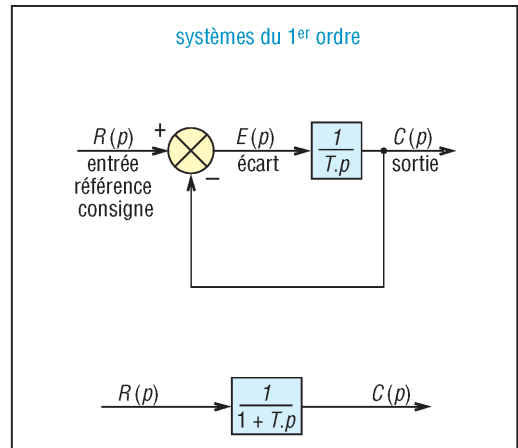
$$T \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = K \cdot r(t)$$

Paramètres : T constante du temps et K gain statique (constante).

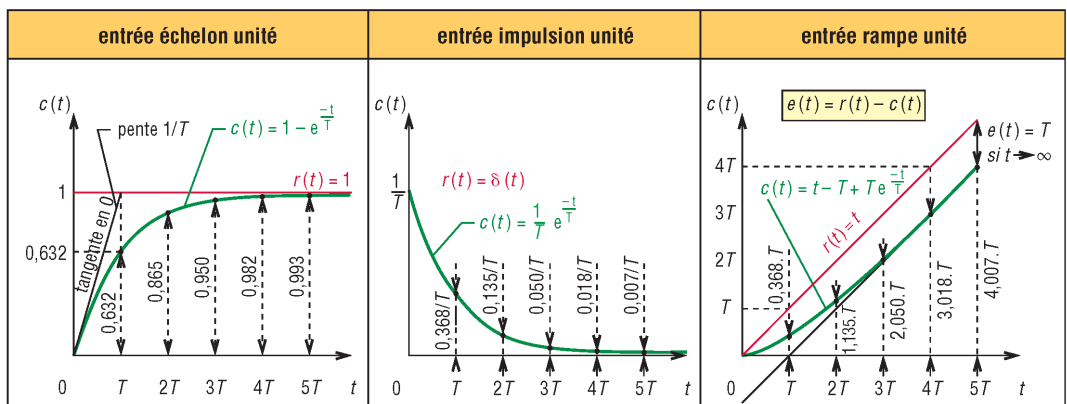
Fonction de transfert correspondante :

$$\frac{C(p)}{R(p)} = \frac{K}{1 + Tp}$$

Les propriétés générales des systèmes asservis du 1^{er} ordre et les réponses aux signaux d'entrée fondamentaux sont indiquées dans le tableau ci-après et dans les figures 26 et 27.



26. Schéma bloc des systèmes du 1^{er} ordre, $K = 1$.



27. Réponses des systèmes du 1^{er} ordre, $K = 1$.

| Réponses des systèmes du 1 ^{er} ordre aux principales entrées usuelles | | | |
|---|--|---|--|
| Entrée $t \geq 0$ [$r(t) = 0$ si $t < 0$] | Échelon $r(t) = E_0$ | Rampe $r(t) = at$ | Impulsion $r(t) = \delta(t)$ |
| Transformée $R(p)$ de $r(t)$ | $\frac{E_0}{p}$ | $\frac{a}{p^2}$ | 1 |
| Transformée $C(p) = \left(\frac{K}{1+Tp}\right)R(p)$ | $C(p) = \frac{E_0 K}{p(1+Tp)}$ | $C(p) = \frac{aK}{p^2(1+Tp)}$ | $C(p) = \frac{K}{1+Tp}$ |
| Décomposition en éléments simples | $C(p) = \frac{E_0 K}{p} - \frac{E_0 KT}{1+Tp}$ | $C(p) = \frac{aK}{p^2} - \frac{aKT}{p} + \frac{aKT^2}{1+Tp}$ | $C(p) = \frac{K}{1+Tp}$ |
| Réponse $c(t) t \geq 0$ | $c(t) = E_0 K(1 - e^{-t/T})$ | $c(t) = aK(t - T + Te^{-t/T})$ | $c(t) = \frac{K}{T} e^{-t/T}$ |
| Dérivée de $c(t)$ $\frac{dc(t)}{dt} = c'(t)$ | $\frac{dc(t)}{dt} = \frac{E_0 K}{T} e^{-t/T}$ $t = 0$, pente = $E_0 K/T$ $t = \infty$, pente = 0 | $\frac{dc(t)}{dt} = aK(1 - e^{-t/T})$ $t = 0$, pente = 0 $t = \infty$, pente = aK | $\frac{dc(t)}{dt} = -K e^{-t/T}$ $t = 0$, pente = $-K$ $t = \infty$, pente = 0 |
| Écart $e(t) = r(t) - c(t)$ et $e(\infty)$ | $e(t) = E_0 K e^{-t/T}$; $e(\infty) = 0$ | $e(t) = aKT(1 - e^{-t/T})$ $e(\infty) = T$ | si $t \rightarrow \infty$ $e(\infty) = 0$ |

4. Réponses des systèmes du 2^e ordre aux entrées types

De nombreux asservissements se comportent comme des systèmes du 2^e ordre. Un système du 2^e ordre, d'entrée $r(t)$, est un système dont la sortie $c(t)$ obéit à une équation différentielle du 2^e ordre de forme générale :

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = K \cdot r(t)$$

Paramètres : K : gain statique ; ξ : coefficient ou facteur d'amortissement ; ω_n : fréquence ou pulsation propre non amortie.

Fonction de transfert :

$$\frac{C(p)}{R(p)} = \frac{K}{1 + 2\xi(p/\omega_n) + (p/\omega_n)^2} = \frac{K\omega_n^2}{\omega_n^2 + 2\xi\omega_n p + p^2}$$

a) Réponses $c(t)$ des systèmes du 2^e ordre à une entrée échelon unité ($K = 1$)

$$\text{Si } R(p) = 1/p ; C(p) = \frac{\omega_n^2}{p(\omega_n^2 + 2\xi\omega_n p + p^2)}$$

Pour obtenir la réponse $c(t)$, il faut décomposer $C(p)$ en éléments simples et, à cette fin, déterminer les pôles de la fonction transfert ou zéros du dénominateur. Plusieurs cas sont possibles en fonction des valeurs du paramètre ξ .

$$\Delta = b^2 - 4ac = 4\xi^2\omega_n^2 - 4\omega_n^2 = 4\omega_n^2(\xi^2 - 1)$$

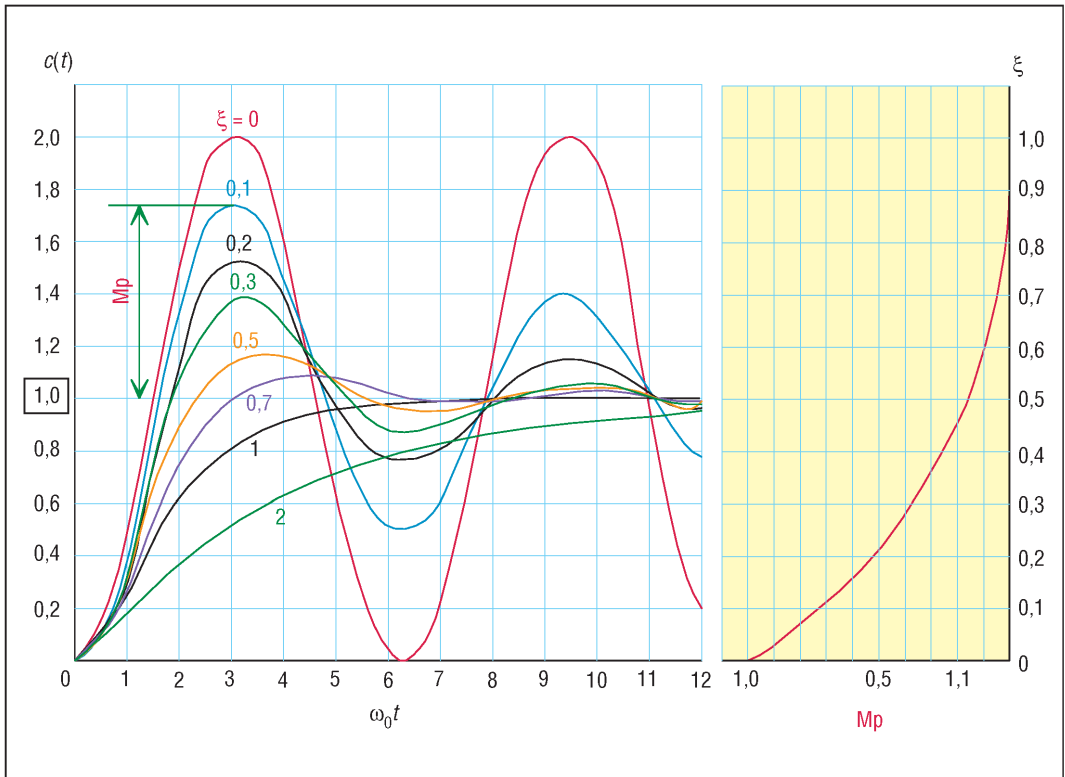
On a deux racines réelles si $\Delta > 0$, et deux racines ou pôles complexes si $\Delta < 0$.

$$\text{Posons : } \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

ω_d est appelée pulsation ou fréquence propre amortie du système.

Remarques : ω_n représente la fréquence d'oscillation du système lorsque l'amortissement devient nul. ω_d , observable expérimentalement, est toujours inférieure à ω_n . Si ξ augmente, ω_d diminue ; si $\xi > 1$, la réponse $c(t)$ engendrée n'a plus d'oscillation.

| Réponse des systèmes du 2 ^e ordre ($K = 1$) à une entrée échelon unité $r(t) = 1$, $R(p) = 1/p$ | | | |
|---|--|---|--|
| ξ | $\xi > 1$ | $\xi = 1$ | $0 \leq \xi < 1$ |
| $\Delta = 4\omega_n^2(\xi^2 - 1)$ | $\Delta > 0$ | $\Delta = 0$ | $\Delta < 0$ |
| Racines p_1 et p_2 | p_1 et p_2 réelles $p_1 = -\xi\omega_n - \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}$ $p_2 = -\xi\omega_n + \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}$ | racine double réelle : $p_1 = p_2 = -\omega_n$ | 2 pôles complexes conjugués p_1 et p_2 $p_1 = -\xi\omega_n - j\omega_d$ $p_2 = -\xi\omega_n + j\omega_d$ |
| $C(p)$ | $\frac{\omega_n^2}{p(p-p_1)(p-p_2)}$ | $\frac{\omega_n^2}{p(p-\omega_n)^2}$ | $\frac{\omega_n^2}{p[(p+\xi\omega_n)^2 + \omega_d^2]}$ |
| Décomposition | Fait partie des transformées usuelles (voir page 536) | Fait partie des transformées usuelles | $\frac{1}{p} - \frac{\xi\omega_n}{(p+\xi\omega_n)^2 + \omega_d^2} - \frac{p+\xi\omega_n}{(p+\xi\omega_n)^2 + \omega_d^2}$ |
| $c(t)$ avec $t \geq 0$ | $1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \left(\frac{e^{p_2 t}}{p_2} - \frac{e^{p_1 t}}{p_1} \right)$ | $1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t)$ | $1 - \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin \omega_d t - e^{-\xi\omega_n t} \cos \omega_d t$ |
| Écart $e(t) = c(t) - r(t)$ | $\frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \left(\frac{e^{p_2 t}}{p_2} - \frac{e^{p_1 t}}{p_1} \right)$ | $-e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t)$ | $e^{-\xi\omega_n t} \left(\cos \omega_d t + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \omega_d t \right)$ Lorsque $t \rightarrow \infty$, $e(t) = 0$ |
| Remarques | Si $\xi \gg 1$ l'une des deux exponentielles de $c(t)$ décroît plus rapidement que l'autre et peut être négligée. | | Si $\xi = 0$, la réponse n'est plus amortie et les oscillations continuent indéfiniment avec $\omega_n = \omega_d$ et $c(t) = 1 - \cos \omega_n t$ ($t \geq 0$) |



28. Réponses systèmes du 2^e ordre à une entrée échelon unité.

Principaux paramètres de la période transitoire :

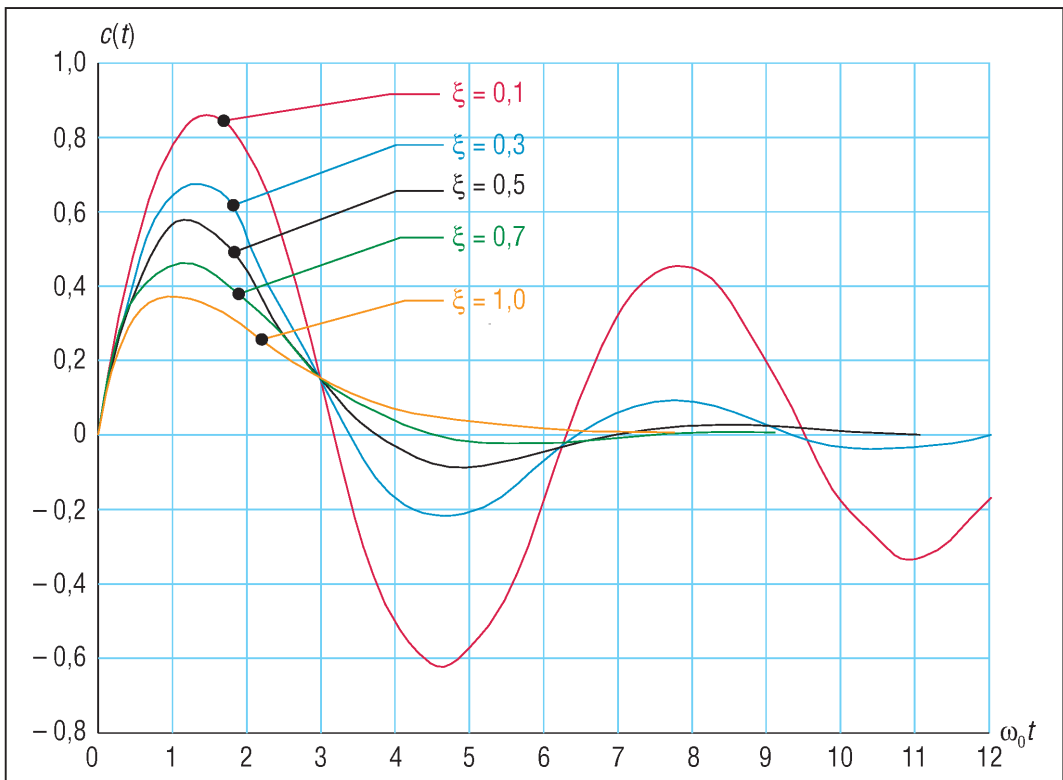
Temps de réponse : $tr = 4T = \frac{4}{\xi\omega_n}$ (critère $\pm 2\%$) ; $tr = 3T = \frac{3}{\xi\omega_n}$ (critère $\pm 5\%$)

Dépassement : $Mp = c(\pi/\omega_d) - 1 = e^{-(\xi/\sqrt{1-\xi^2})\pi}$; pour $\xi = 0$, $Mp_{\text{maxi}} = 1$ (ou 100%) ;

si $0,4 < \xi < 0,8$, alors $25\% > Mp > 2,5\%$

b) Réponses $c(t)$ des systèmes du 2^e ordre à une entrée impulsion

| Réponses des systèmes du 2 ^e ordre ($K=1$) à une entrée impulsion $r(t) = \delta(t)$ ou $R(p) = 1$ | |
|---|---|
| $C(p)$ | $\frac{1}{1 + 2\xi(p/\omega_n) + (p/\omega_n)^2} = \frac{\omega_n^2}{\omega_n^2 + 2\xi\omega_n p + p^2}$ |
| $c(t)$ $0 \leq \xi < 1$ | $\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin \omega_n \sqrt{1-\xi^2} t$ avec $t \geq 0$ |
| $c(t)$ $\xi = 1$ | $\omega_n^2 t e^{-\omega_n t}$ avec $t \geq 0$ |
| $c(t)$ $\xi > 1$ | $\frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2-1}} e^{-(\xi-\sqrt{\xi^2-1})\omega_n t} - \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2-1}} e^{-(\xi+\sqrt{\xi^2-1})\omega_n t}$ avec $t \geq 0$ |
| $c(t)_{\max}$ $0 < \xi < 1$ | $\omega_n \exp\left(-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right)$ |

29. Réponses des systèmes du 2^e ordre à une entrée impulsion unité.

VII - Précision des systèmes asservis, erreurs et écarts

L'écart $e(t)$ traduit la précision d'un système. L'écart en régime permanent ou établi $e(\infty)$ est égal à la valeur de $e(t)$ lorsque t tend vers l'infini.

La valeur des écarts en régime établi correspondant aux entrées types (échelon, rampe, parabolique...) est indicative du comportement des systèmes. Un système peut avoir un écart en régime établi acceptable avec certaines entrées et non tolérable avec d'autres.

1. Erreur en régime permanent ou établi (e_∞)

Pour un système mis sous forme canonique (**fig. 16**, p. 540), la relation entre $e(t)$ l'écart, $r(t)$ l'entrée ou consigne, et $b(t)$ la sortie mesurée, s'écrit : $e(t) = r(t) - b(t)$

Transformée : $E(p) = R(p) - B(p) = R(p) - H(p)C(p) = R(p) - H(p)G(p)E(p)$

$E(p)[1+G(p)H(p)] = R(p)$ ou $E(p) = R(p)/[1+G(p)H(p)]$

En utilisant le théorème de la valeur finale, on obtient l'erreur en régime permanent :

$$e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pE(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{pR(p)}{1+G(p)H(p)} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{pR(p)}{1+FTBO}$$

Exemple : système défini par $C(p) = \frac{9}{p+10} R(p)$

Avec une entrée échelon unité $R(p) = 1/p$: $C(p) = \frac{9}{p(p+10)}$

La transformée inverse de $C(p)$ donne : $c(t) = 0,9(1 - e^{-10t})$

Réponse statique : $c(\infty) = 0,9$.

Avec $b(t) = c(t)$, l'écart est : $e(t) = r(t) - c(t) = 1 - 0,9(1 - e^{-10t}) = 0,1 - 0,9e^{-10t}$

Écart en régime établi : $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pE(p) = 0,1$.

2. Erreur statique

Pour l'entrée échelon unité, $R(p)=1/p$, l'erreur en régime établi s'appelle erreur statique :

$$e(\infty) = \varepsilon_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p}{[1+G(p)H(p)]p} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{1+G(p)H(p)} = \frac{1}{1+Kp}$$

avec Kp constante d'erreur statique définie par : $Kp = \lim_{p \rightarrow 0} G(p)H(p) = \lim_{p \rightarrow 0} FTBO$.

3. Erreur de traînage

Dans le cas d'une entrée rampe unité, $R(p) = 1/p^2$, l'erreur en régime permanent est appelée erreur de traînage :

$$e(\infty) = \varepsilon_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p}{[1+G(p)H(p)]p^2} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{pG(p)H(p)} = \frac{1}{Kv}$$

avec Kv constante d'erreur de traînage définie par : $Kv = \lim_{p \rightarrow 0} pG(p)H(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p.FTBO$.

4. Erreur en accélération

De la même manière, pour une entrée parabolique $r(t) = t^2/2$ avec $R(p) = 1/p^3$, on définit une erreur en accélération :

$$e(\infty) = \varepsilon_2 = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p}{[1+G(p)H(p)]p^3} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{p^2G(p)H(p)} = \frac{1}{Ka}$$

avec Ka constante d'erreur en accélération : $Ka = \lim_{p \rightarrow 0} p^2G(p)H(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p^2.FTBO$.

Remarques : dans le cas d'une FTBO = $G(p)H(p) = \frac{K(1+T_a p)(1+T_b p)\dots(1+T_m p)}{p^\alpha(1+T_1 p)(1+T_2 p)\dots(1+T_p p)}$; le système est du type 0, type 1, type 2..., lorsque respectivement $\alpha = 0, \alpha = 1, \alpha = 2\dots$; pour ce cas, $Kp = Kv = Ka = K$.

| Type du système | Erreur en régime établi $e(\infty)$ | | |
|-----------------|--|---|---|
| | Entrée échelon $r(t) = 1$ Erreur statique ε_0 | Entrée rampe $r(t) = t$ Erreur de traînage ε_1 | Entrée parabolique $r(t) = t^2/2$ Erreur en accélération ε_2 |
| 0 | $\varepsilon_0 = 1/(1+K)$ | $\varepsilon_1 = \infty$ | $\varepsilon_2 = \infty$ |
| 1 | $\varepsilon_0 = 0$ | $\varepsilon_1 = 1/K$ | $\varepsilon_2 = \infty$ |
| 2 | $\varepsilon_0 = 0$ | $\varepsilon_1 = 0$ | $\varepsilon_2 = 1/K$ |

Un système de type 0 est incapable de suivre une entrée rampe en réponse statique. De façon générale, pour diminuer l'erreur statique ou augmenter la précision, il faut augmenter la classe du système et accroître le gain.

VIII - Étude harmonique ou fréquentielle

L'analyse fréquentielle ou harmonique est l'étude de la réponse en régime établi d'un système ayant une entrée sinusoïdale dont on fait varier la fréquence ou la pulsation ω (rad/s).

L'un des avantages du signal sinusoïdal, c'est la grande variété d'entrées possibles en faisant varier les fréquences et les amplitudes, notamment sur le plan expérimental (permet de déterminer des fonctions de transfert inconnues...).

L'étude nécessite l'utilisation d'une fonction de transfert complexe $F(p) = F(j, \omega) = F \cdot e^{j\varphi}$ en posant $p = j\omega$. Les tracés (Bode...) de l'amplitude $F = |F(j, \omega)|$ et de l'angle de phase $\varphi = \arg F(j, \omega)$ sont utilisés pour analyser le comportement et la stabilité des systèmes.

Remarque : le module ou l'intensité $|F(j, \omega)|$ de $F(j, \omega)$ est souvent appelé gain, ce gain ne doit pas être confondu avec le gain statique K .

1. Réponse d'un système à une entrée sinusoïdale

À une entrée sinusoïdale donnée correspond une sortie sinusoïdale qui ne diffère de l'entrée que par son amplitude et son angle de phase.

Soit un système défini par $C(p) = F(p) \cdot R(p)$

$$\text{avec } F(p) = \frac{K(p-z_1)(p-z_2)\dots(p-z_m)}{(p-p_1)(p-p_2)\dots(p-p_n)}$$

Les p_i sont les n pôles du système et les z_i les m zéros.

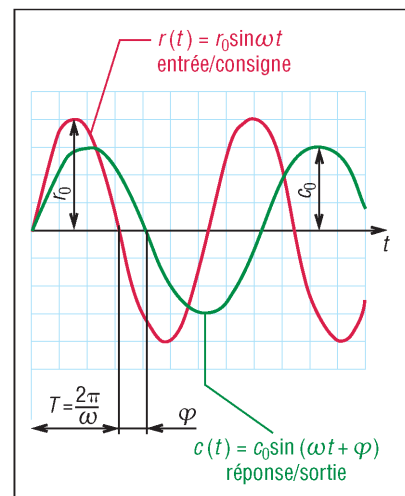
Choisissons une entrée sinusoïdale de forme générale $r(t) = r_0 \cdot \sin \omega t$; amplitude r_0 ; pulsation ω ; la fonction de

transfert de cette entrée est : $R(p) = \frac{r_0 \omega}{p^2 + \omega^2}$

$$C(p) = F(p) \cdot R(p) = \frac{K(p-z_1)(p-z_2)\dots(p-z_m)}{(p-p_1)(p-p_2)\dots(p-p_n)} \cdot \frac{r_0 \omega}{(p^2 + \omega^2)}$$

Après décomposition en éléments simples on obtient :

$$C(p) = \sum \text{termes transitoires forme } \left(\frac{K_i}{p-p_i} \right) + \text{terme statique forme } \left(\frac{\alpha p + \beta}{p^2 + \omega^2} \right)$$



30. Réponse à une entrée sinusoïdale.

Si le système est stable et lorsque t tend vers l'infini, les termes transitoires disparaissent ou tendent vers 0, seuls les termes statiques subsistent. La réponse obtenue (Laplace inverse) est de la forme :

$$c(t) = r_0 |F(j\omega)| \sin(\omega t + \varphi) = c_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{avec } \varphi = \arg F(j\omega)$$

La sortie $c(t)$ dépend uniquement de l'intensité de $|F(j\omega)|$ et de la phase φ de $F(j\omega)$.

2. Étude harmonique ou fréquentielle des systèmes du 1^{er} ordre

Reprenons le système général du premier ordre vu au paragraphe VI-3.

Fonction de transfert : $F(p) = \frac{K}{1+Tp}$; K = gain statique (constante) ; T = constante du temps.

Avec une entrée sinusoïdale $r(t) = r_0 \sin \omega t$, la réponse est de la forme : $c(t) = c_0 \sin(\omega t + \varphi)$.

Déterminons c_0 et φ en posant $p = j \cdot \omega$ dans la fonction de transfert.

$$F(j\omega) = \frac{K}{1+Tj\omega} = \frac{K}{1+j\omega T} = \frac{K(1-j\omega T)}{(1+j\omega T)(1-j\omega T)} = \frac{K(1-j\omega T)}{1+\omega^2 T^2} = \frac{K}{1+\omega^2 T^2} - j \cdot \frac{K\omega T}{1+\omega^2 T^2}$$

Le module (ou gain) est égal à la racine carrée des parties réelles et imaginaires au carré.

$$|F(j\omega)|^2 = |\operatorname{Re}(\omega)|^2 + |\operatorname{Im}(\omega)|^2 = \frac{K^2}{(1+\omega^2 T^2)^2} + \frac{K^2 \omega^2 T^2}{(1+\omega^2 T^2)^2} = \frac{K^2}{1+\omega^2 T^2}$$

$$|F(j\omega)| = \sqrt{\frac{K^2}{1+\omega^2 T^2}} = \frac{K}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} = \frac{c_0}{r_0}$$

$$\text{d'où : } c_0 = \frac{K r_0}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}}$$

$$\arg F(j \cdot \omega) = \varphi(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{-K\omega T}{K} \right)$$

$$\text{d'où : } \varphi(\omega) = -\tan^{-1}(\omega T)$$

Remarque : $F(j\omega) = \frac{K}{1+j\omega T} = \frac{K}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} e^{-j\varphi}$

IX - Analyse de Bode

L'analyse de Bode s'appuie sur les représentations graphiques en échelles logarithmiques de la réponse fréquentielle de la fonction de transfert en boucle ouverte FTBO = $G(p)H(p) = GH(j\omega)$ du système à analyser.

Les courbes de Bode comprennent deux tracés ou graphes fonction de la fréquence ω :

- une courbe d'amplitude ou de gain de la FTBO, ou diagramme (ou lieu) des gains,
- une courbe de phase de la FTBO, ou diagramme (ou lieu) des phases.

1. Principe et propriétés

Principe : la fonction de transfert peut être écrite sous la forme : $F(j\omega) = |F(j \cdot \omega)| e^{j\varphi}$

En appliquant les logarithmes népériens on obtient : $\ln F(j \cdot \omega) = \ln |F(j \cdot \omega)| + j\varphi(\omega)$

$F(j \cdot \omega)$ peut ainsi être caractérisée et analysée à partir de : $\ln |F(j \cdot \omega)|$ et $\varphi(\omega)$.

Le diagramme des gains utilise les logarithmes décimaux et le gain de Bode, défini par $20 \log_{10} |F(j \cdot \omega)|$, unités les décibels dB, est tracé en fonction de log ω .

La phase $\varphi(\omega)$ est tracée dans un autre système d'axes en fonction de $\log \omega$. Les deux graphes sont généralement mis en correspondance l'un sous l'autre sur un même diagramme.

Propriété, éléments en série : pour un système composé d'éléments en série, la fonction de transfert globale $G(p)$ est le produit des fonctions de transfert $G_i(p)$ de chaque élément :

$$G(p) = G_1(p).G_2(p).G_3(p)\dots = G(j.\omega) = G_1(j.\omega).G_2(j.\omega).G_3(j.\omega)\dots$$

$$\text{Amplitude ou gain correspondant : } |G(j.\omega)| = |G_1(j.\omega)|.|G_2(j.\omega)|.|G_3(j.\omega)|\dots$$

Le gain de Bode du système est égal à la somme des gains respectifs de chaque élément :
 $20\log_{10}|G(j.\omega)| = 20\log_{10}|G_1(j.\omega)| + 20\log_{10}|G_2(j.\omega)| + 20\log_{10}|G_3(j.\omega)| + \dots$

La phase du système est obtenue en additionnant les phases de chacun des éléments :

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots$$

Propriétés du graphe des gains :

Décade de fréquence : si un nombre X est multiplié par 10, sa valeur en décibel augmente de 20.

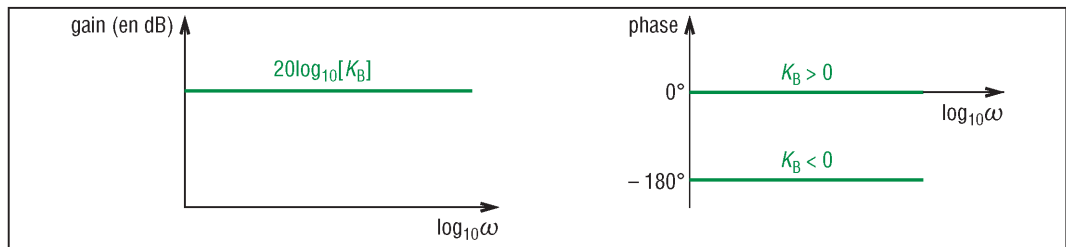
$$\text{Autrement dit : } 20\log_{10}[X.10^n] = 20\log_{10}X + 20n$$

Octave de fréquence : si un nombre X est multiplié par 2, sa valeur correspondante en décibel augmente de 6,02. Autrement dit :

$$20\log_{10}[X.2] = 20\log_{10}X + 6,02$$

2. Courbes de Bode d'une constante K_B

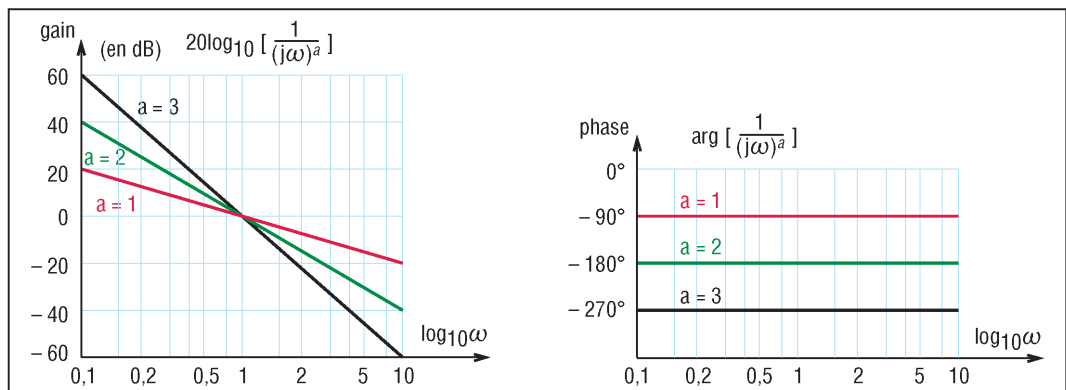
La constante K_B a pour gain $20\log_{10}|K_B|$ et pour phase $\varphi = 0^\circ$ si K_B est positif ; $\varphi = -180^\circ$ si K_B est négatif. Les courbes de Bode correspondantes sont des droites horizontales (**fig. 31**).



31. Courbes de Bode d'une constante K_B .

3. Courbes de Bode de $[1/(j\omega)^a]$

On est dans le cas des intégrateurs ou pôles d'ordre a à l'origine (a entier ≥ 0) et les courbes de Bode correspondantes sont des droites (**fig. 32**).



32. Courbes de Bode de $1/(j\omega)^a$.

$$\text{Gain de Bode : } 20\log_{10}\left|\frac{1}{(j\omega)^a}\right| = -a.20\log_{10}|j\omega| = -20 a \log \omega \text{ (en dB).}$$

Angle de phase : $\varphi = \arg [1/(j\omega)^a] = -a \cdot 90^\circ$.

Remarque : dans le cas des dérivateurs $(j\omega)^a$, a entier ≥ 0 , ou zéros d'ordre a , les courbes de Bode obtenues sont symétriques des précédentes par rapport aux axes horizontaux 0 dB et 0° . Par exemple, pour $a = 1$, la droite du gain passe par les points $[0, 1 ; -20]$ et $[1 ; 0]$; phase $90^\circ \dots$

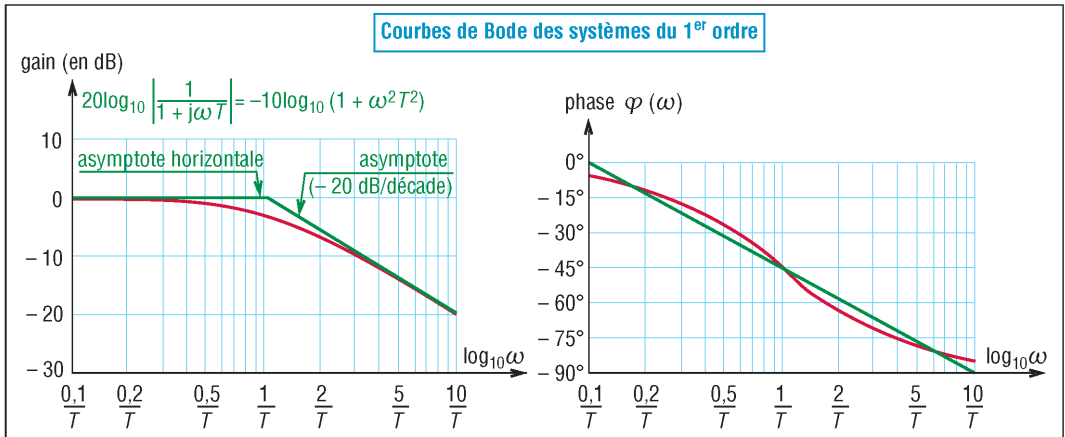
4. Courbes de Bode des systèmes du 1^{er} ordre

Les systèmes du 1^{er} ordre ont été abordés aux paragraphes VI-3 et VIII-2.

Rappels : $F(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega T} = \frac{K}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} e^{-j\varphi}$;

module : $|F(j, \omega)| = K \cdot \left| \frac{K}{1 + j\omega T} \right| = \frac{K}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}$; phase : $\varphi = \arg F(j\omega) = -\arctg(\omega T)$.

| Bode : systèmes du 1 ^{er} ordre | basses fréquences $\omega^2 T^2 \ll 1$ ou $\omega \ll 1/T$ | hautes fréquences $\omega^2 T^2 \gg 1$ ou $\omega \gg 1/T$ | moyennes fréquences $\omega^2 T^2 = 1$ ou $\omega_0 = 1/T$ |
|--|---|---|--|
| $F(j, \omega) = K/(1 + j\omega T)$ | $\approx K$ | $\approx K/j\omega T$ | $K/(1 + j\omega T)$ |
| $20\log_{10} F(j\omega) $ | $20\log_{10} K$ | $20\log_{10}(K/\omega T)$ $= 20\log_{10} K - 20\log_{10} \omega T$ | $20\log_{10}(K/\sqrt{2})$ $= 20\log_{10} K - 3,01 \text{ dB}$ |
| $\varphi = \arg F(j\omega)$ | $\arg K \approx 0$ | $\arg K - \arg j\omega T \approx -90^\circ$ | $-\arg[K/(1 + j)] = -45^\circ$ |
| asymptote à la courbe de gain | horizontale passant par $20\log_{10} K$ (ou 0 dB si $K = 1$) | penne de -20 dB par décade, passant par $20\log_{10} K$ pour $\omega = 1/T$ | |



33. Courbes de Bode de $1/(1 + j\omega T)$.

Remarques : une modification de K entraîne une translation verticale de la courbe du gain. Les diagrammes de Bode de $(1 + j\omega T)$ sont symétriques de ceux de $1/(1+j\omega T)$, symétrie par rapport à l'horizontale 0 dB pour le gain et symétrie par rapport à la verticale passant par $1/T$ pour la phase.

5. Courbes de Bode des systèmes du 2^e ordre

Les systèmes du 2^e ordre ont été abordés dans le paragraphe VI-4 ; posons $u = \omega/\omega_0$:

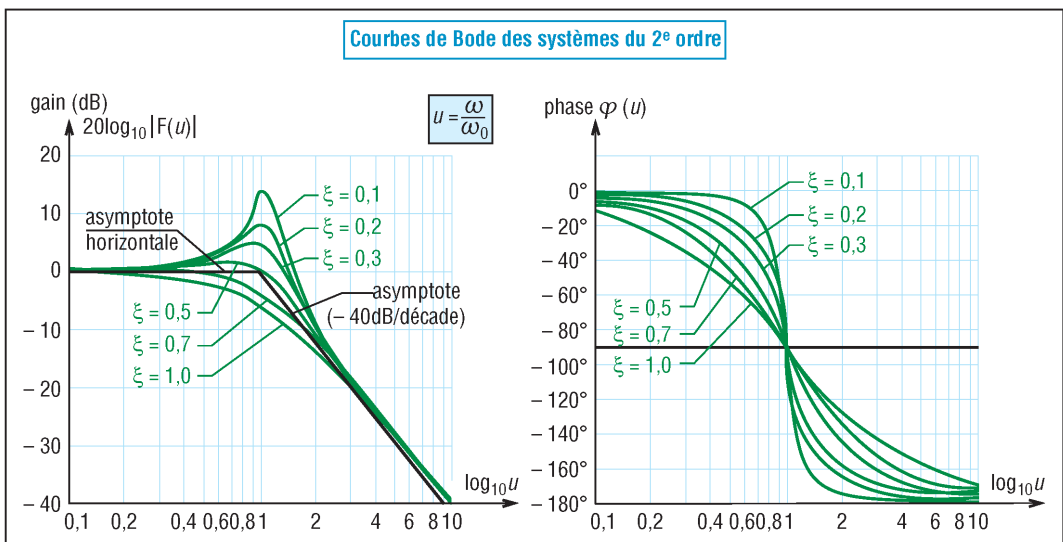
$$F(j\omega) = \frac{K}{1 + 2j\xi(\omega/\omega_0) - (\omega/\omega_0)^2} = \frac{K}{1 + 2j\xi u - u^2}$$

Gain : $20\log_{10} |F(j\omega)| = 20\log_{10} \left(\frac{K}{\sqrt{(1 - u^2)^2 + 4\xi^2 u^2}} \right) = 20\log_{10} K - 20\log_{10} \sqrt{(1 - u^2)^2 + (2\xi u)^2}$

$$\text{Phase : } \varphi(\omega) = -\text{Arctg}\left(\frac{2\xi u}{1-u^2}\right)$$

Il y a symétrie du graphe de phase par rapport au point ($u = 1$; 90°).

| Bode : systèmes du 2 ^e ordre | basses fréquences $\omega \ll \omega_0$ ou $u \rightarrow 0$ | hautes fréquences $\omega \gg \omega_0$ ou $u \rightarrow \infty$ | moyennes fréquences $u = \omega/\omega_0 = 1$ |
|---|---|--|--|
| $F(j.\omega)$ | $\approx K$ | $\approx -Ku^2$ | $K/(1 + 2\xi u - u^2)$ |
| $20\log_{10} F(j\omega) $ | $20\log_{10} K$ | $20\log_{10} K\sqrt{u^4}$ $= 20\log_{10} K - 40\log_{10}(\omega/\omega_0)$ | $20\log_{10} K\sqrt{4\xi^2}$ $= 20\log_{10} K - 20\log_{10} 2\xi$ |
| $\varphi = \arg F(j\omega)$ | $\varphi(\omega) \rightarrow 0$ | $\varphi(\omega) \rightarrow -180^\circ$ | $-\text{Arctg}\left(\frac{2\xi u}{\approx 0}\right) \approx -90^\circ$ |
| asymptote à la courbe de gain | horizontale passant par $20\log_{10} K$ (ou 0 dB si $K=1$) | penne de -40 dB par décade, passant par $20\log_{10} K$ pour $\omega = \omega_0$ | |



34. Courbes de Bode des systèmes du 2^e ordre pour $K = 1$.

Remarque : une modification de K amène une translation verticale des courbes de gain, les courbes de phase restent inchangées.

6. Phénomène de résonance des systèmes du 2^e ordre

Pour certaines valeurs du coefficient ξ , il existe des pulsations pour lesquelles la courbe de gain présente un maximum, on est en présence d'un phénomène de résonance.

Quand $0 \leq \xi \leq 1/\sqrt{2} = 0,707$, $|F(j\omega)|$ présente un maximum si $(1-u^2)^2 + 4\xi^2 u^2$ est minimum,

c'est-à-dire lorsque $u_r = \sqrt{1-2\xi^2}$ ou $\omega_r = \omega_0 \sqrt{1-2\xi^2}$ = fréquence de résonance.

$$|F(j\omega)| = \left(\frac{K}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4\xi^2 u^2}} \right) = \left(\frac{K}{\sqrt{(1-1+2\xi^2)^2 + 4\xi^2(1-2\xi^2)}} \right) = \frac{K}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$$

$$\text{Gain maxi : } M_r = |F(j\omega)|_{\text{maxi}} = |F(j\omega_r)| = \frac{K}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$$

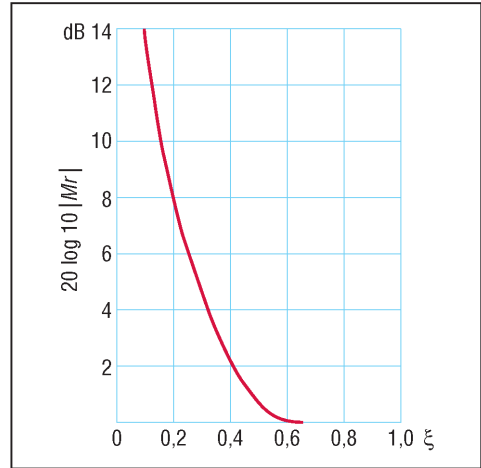
Exemple : pour $k = 1$ et $\xi = 0,1$; $M_r = 5,02$ et $20\log_{10} M_r = 14,02$.

Remarques : pour $\xi > 1/\sqrt{2}$, il n'y a pas de résonance et le gain décroît progressivement lorsque ω augmente.

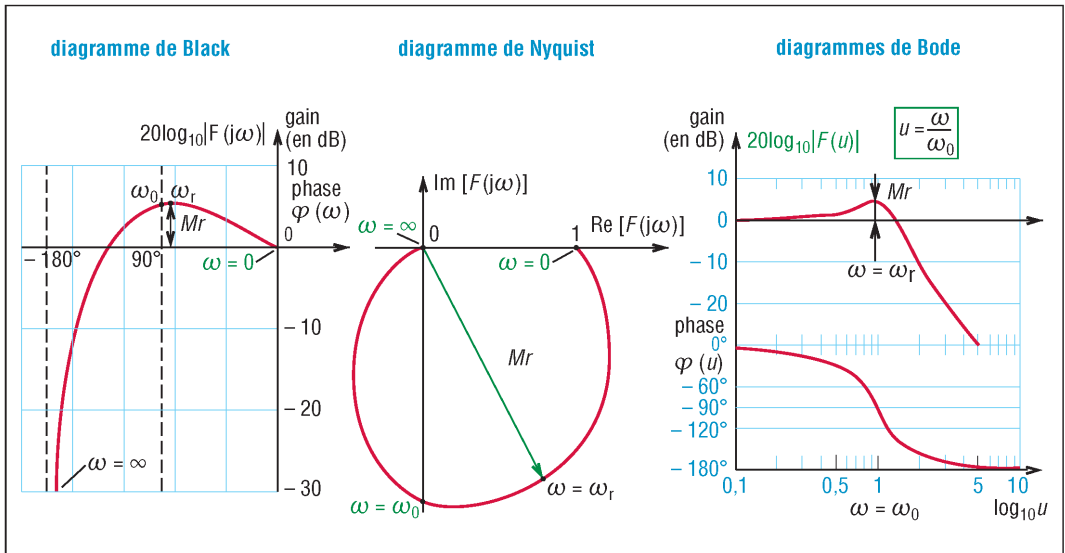
Si $\xi = 1/\sqrt{2}$, $M_r = 1$ et $20\log_{10} M_r = 0$.

Si $\xi \rightarrow 0$, $M_r \rightarrow \infty$, même chose pour $20\log_{10} M_r$, voir figure 35.

$$\begin{aligned} \varphi_r &= \text{Arg}F(j\omega_r) = -\text{Arctg}\left(\frac{\sqrt{1-2\xi^2}}{\xi}\right) \\ &= -90^\circ + \text{Arcsin}\left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \end{aligned}$$



35. Systèmes du 2^e ordre ($K = 1$), M_r fonction de ξ .



36. Phénomène de résonance des systèmes du 2^e ordre et diagrammes usuels.

X - Diagramme de Nyquist

Similaire à l'analyse de Bode, l'analyse de Nyquist, liée à la réponse fréquentielle, est une méthode de détermination graphique de la stabilité des systèmes en boucle fermée.

Le diagramme de Nyquist s'obtient indifféremment en coordonnées polaires ou en coordonnées rectangulaires (on a exactement le même graphe dans les deux cas de tracé).

- Sous forme rectangulaire, dans plan complexe : $F(p) = F(j\omega) = \text{Re}[F(j\omega)] + j \cdot \text{Im}[F(j\omega)]$; avec partie réelle $\text{Re}[F(p)]$ en abscisse et partie imaginaire $\text{Im}[F(p)]$ en ordonnée.
- Sous forme polaire (r, θ) : $F(p) = F(j\omega) = r e^{j\theta}$ avec $r = |F(j\omega)|$ et $\theta = \varphi = \text{Arg} F(j\omega)$

1. Graphes de Nyquist de $F(p) = F(j\omega) = 1/j\omega$ et $F(j\omega) = j\omega$

Le graphe en coordonnées polaires de l'intégrateur $F(p)=1/p = F(j\omega)=(1/j\omega)$ est l'axe imaginaire négatif tel que : $F(j\omega) = \frac{1}{j\omega} = \frac{j}{j^2\omega} = \frac{j}{-\omega} = -j \cdot \frac{1}{\omega}$ ou $F(j\omega) = \left[r = \frac{1}{\omega} ; \theta = \varphi = -90^\circ \right]$.

Le graphe en coordonnées polaires du dérivateur $F(p)=p = F(j\omega)=j\omega$ est l'axe imaginaire positif.

2. Graphe de Nyquist des systèmes du 1^{er} ordre $1/(1+j\omega T)$

Ces systèmes ont été abordés dans les paragraphes précédents.

Rappels :

$$F(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega T} = \frac{1-j\omega T}{1+\omega^2 T^2} = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} e^{-j\varphi}$$

avec T constante du temps ;

$$\text{Module} : |F(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}}$$

$$\text{Phase} : \varphi = \arg F(j\omega) = -\arctg \omega T$$

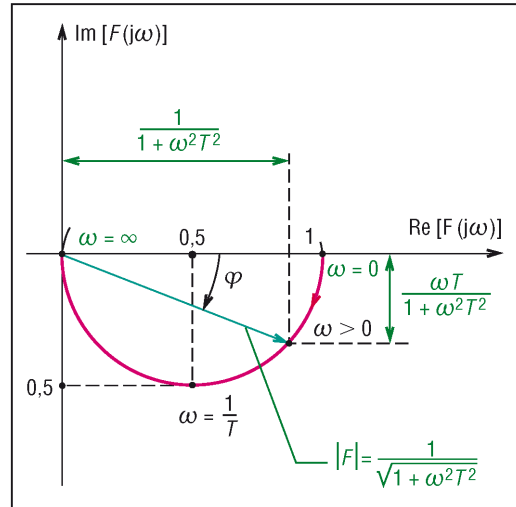
En coordonnées rectangulaires :

$$\operatorname{Re}(F(j\omega)) = \frac{1}{1+\omega^2 T^2} ; \operatorname{Im}(F(j\omega)) = \frac{-\omega T}{1+\omega^2 T^2}$$

En coordonnées polaires ($\varphi = \theta$) :

$$F(j\omega) = \left[r = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} ; \theta = -\arctg \omega T \right]$$

Graphe de Nyquist : lorsque ω varie de 0 à l'infini, la courbe polaire de Nyquist de la fonction de transfert est un demi-cercle de rayon 0,5 dont le centre est situé à 0,5 sur l'axe réel.



37. Diagramme de Nyquist des systèmes du 1^{er} ordre ($K = 1$).

3. Graphes de Nyquist des systèmes du 2^e ordre

Ces systèmes ont été vus dans les paragraphes précédents :

$$F(j\omega) = \frac{1}{1+2j\xi(\omega/\omega_0) - (\omega/\omega_0)^2}$$

Module :

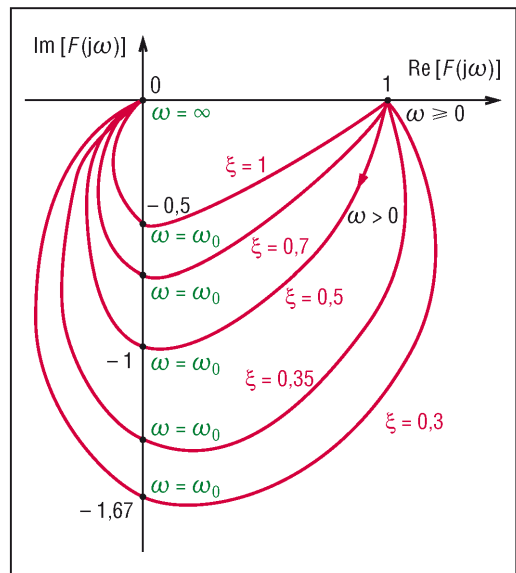
$$|F(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_0)]^2}}$$

$$\text{Phase} : \varphi(\omega) = -\operatorname{Arctg} \left(\frac{2\xi(\omega/\omega_0)}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \right)$$

En coordonnées rectangulaires :

$$\operatorname{Re}F(j\omega) = \frac{[1 - (\omega/\omega_0)^2]}{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_0)]^2} ;$$

$$\operatorname{Im}F(j\omega) = \frac{-j[2\xi(\omega/\omega_0)]}{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_0)]^2}$$



38. Diagramme de Nyquist des systèmes du 2^e ordre.

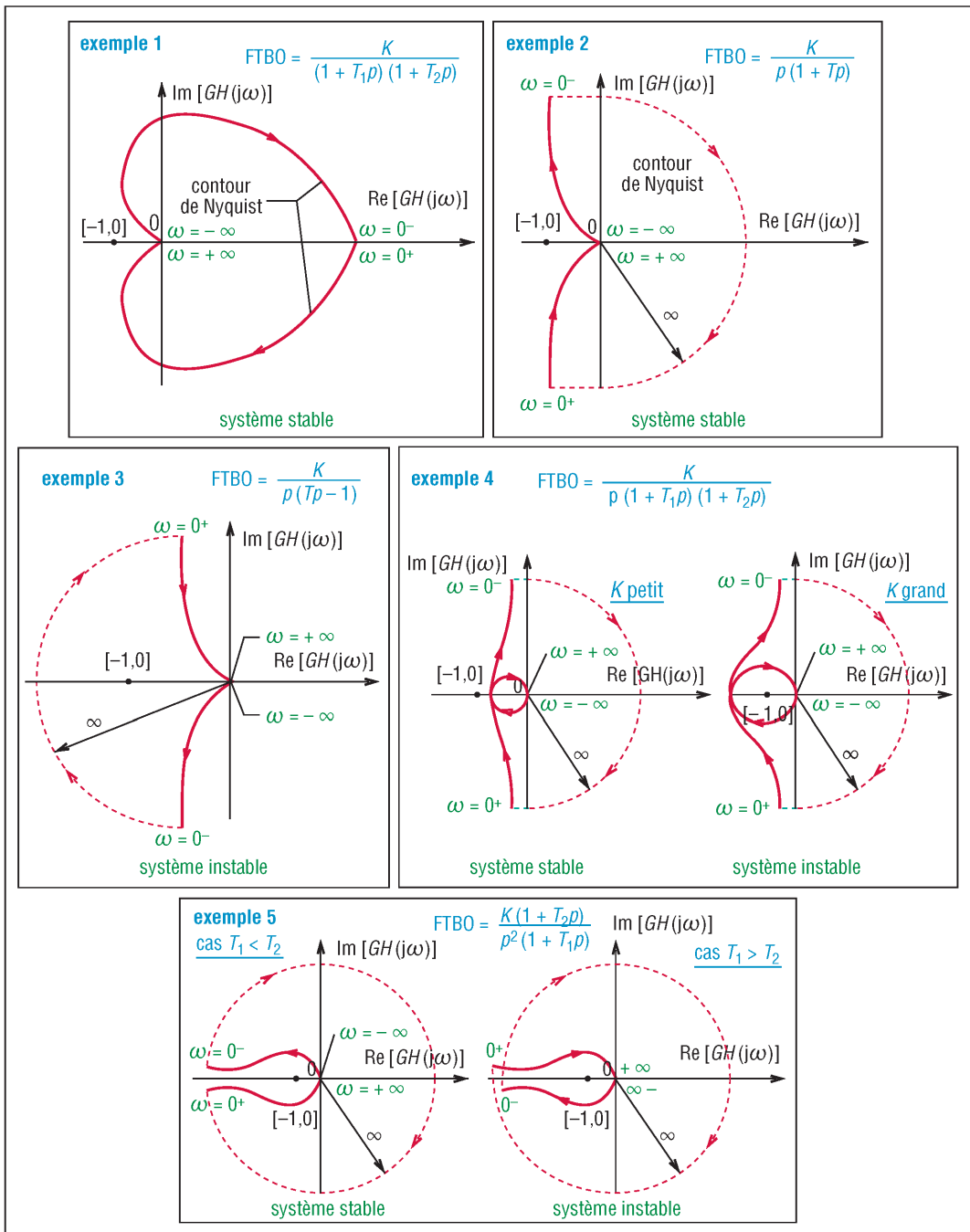
| Points particuliers | Coordonnées rectangulaires | | Coordonnées polaires | |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|---|
| | $\operatorname{Re}F(j\omega)$ | $\operatorname{Im}F(j\omega)$ | $r = F(j\omega) $ | $\theta = \varphi = \operatorname{Arg}F(j\omega)$ |
| $\omega = 0$ | 1 | 0 | 1 | 0° |
| $\omega \rightarrow \infty$ | 0 | 0 | 0 | -180° |
| $\omega = \omega_0$ | 0 | $-1/2\xi$ | $1/2\xi$ | -90° |

4. Stabilité - Critère du revers

Le critère du revers peut être considéré comme un cas particulier du critère de stabilité de Nyquist lorsque la FTBO est stable (système stable en boucle ouverte).

Remarque : un système peut être instable en boucle ouverte et stable en boucle fermée. Le critère de Nyquist, dont l'étude sort du cadre de cet ouvrage, permet de traiter ces cas.

Critère du revers : un système, stable en boucle ouverte, est stable en boucle fermée si et seulement si le lieu de Nyquist de la FTBO n'encercle pas le point critique $(-1 + j0)$ ou, autrement dit, si le point critique est à gauche lorsqu'on parcourt le lieu dans le sens des ω croissants. Il est instable dans le cas contraire.



39. Critère du revers et de Nyquist, exemples.

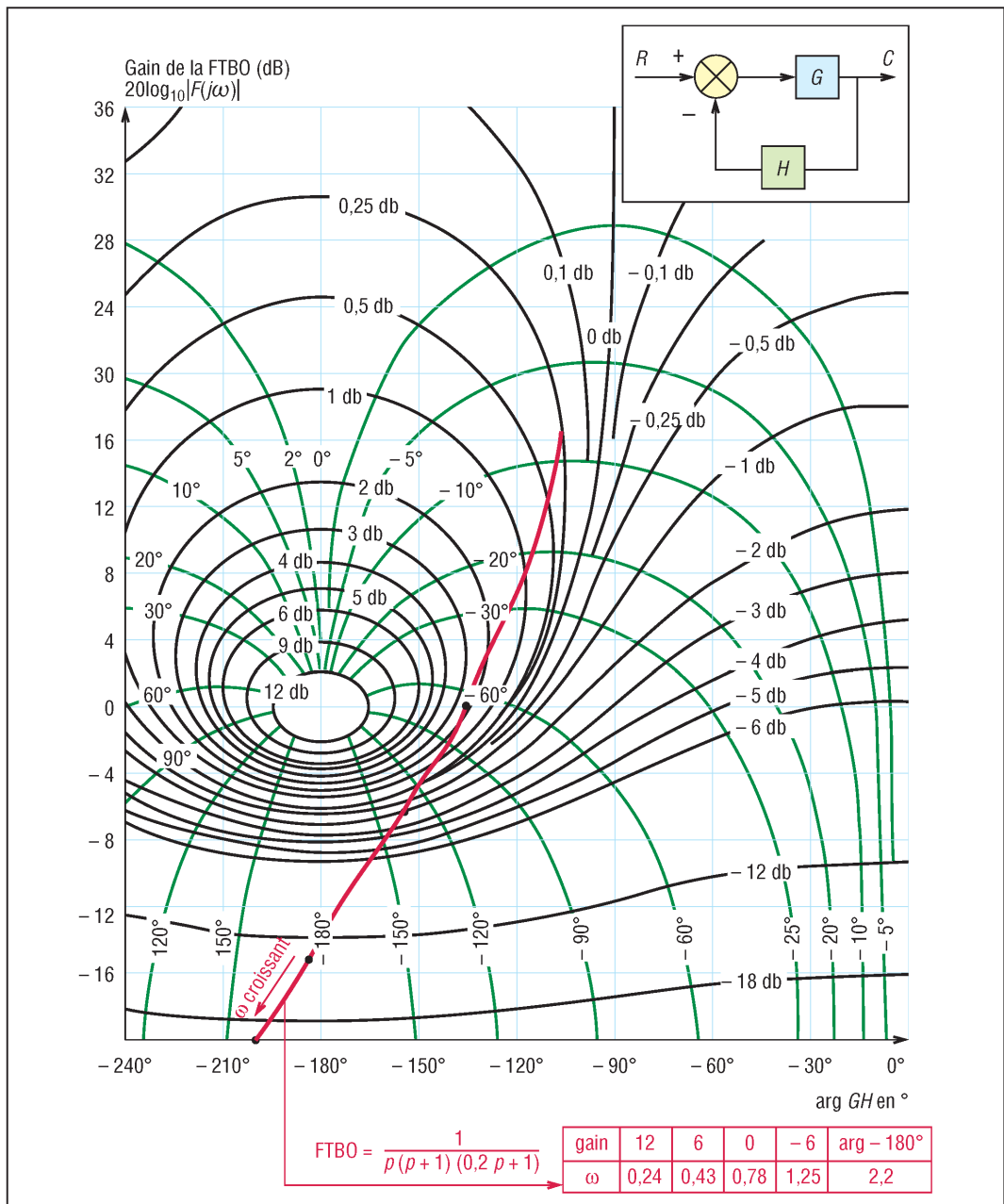
XI - Diagramme de Black

Le diagramme de Black, souvent utilisé en conception, proche de celui de Bode, reprend directement deux de ses coordonnées. Le diagramme est un graphe rectangulaire avec $20\log_{10}|F(j\omega)|$ en ordonnée et $\varphi = \arg F(j\omega)$ en abscisse.

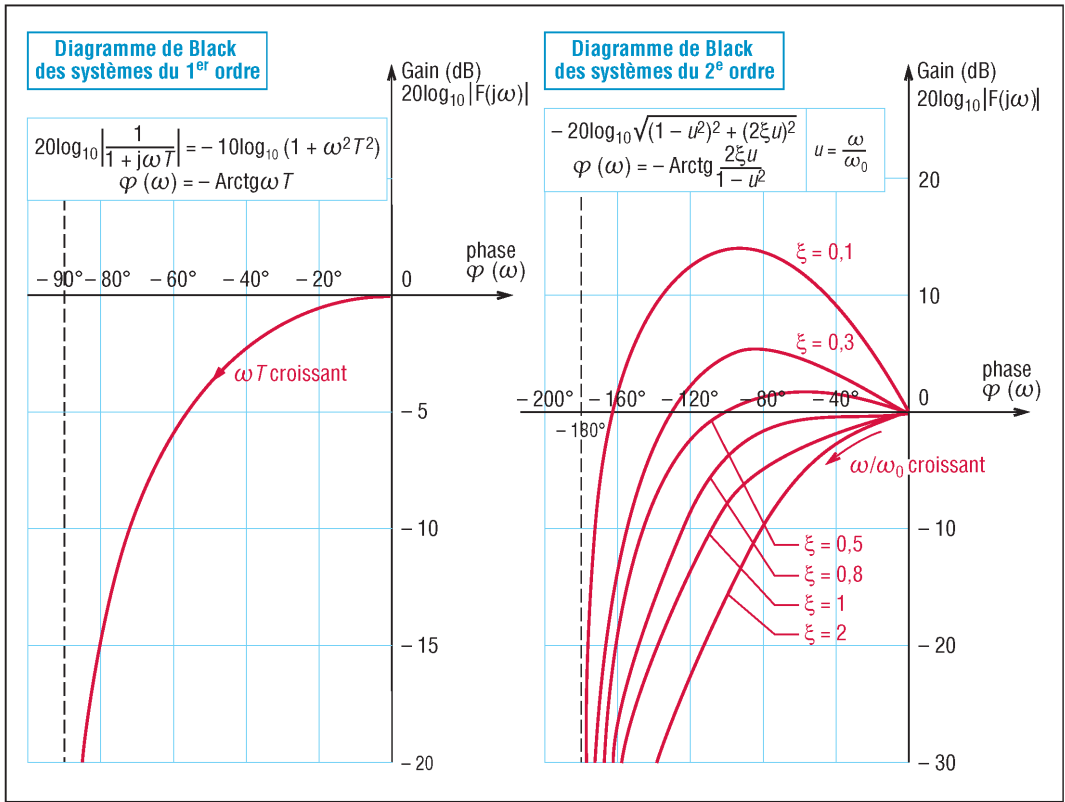
Le diagramme permet de déterminer facilement la réponse fréquentielle d'un système à retour unité (points ou la courbe obtenue coupe les courbes de « niveaux » du diagramme).

Remarques : le graphe de Black présente une symétrie de chaque côté de l'axe vertical passant par -180° . Le point critique $(-1 + j0)$ du diagramme de Nyquist correspond au point (0 dB, -180°) du diagramme de Black.

Stabilité : le système est stable si, en parcourant le lieu de Black dans le sens des ω croissants en boucle ouverte (FTBO), on laisse le point [0 dB ; -180°] à droite.



41. Graphe de Black/Nichols, exemple de tracé d'une FTBO stable (marge de phase 43° , $M_p = 1,22$; $\xi = 0,43$).



40. Diagrammes de Black des systèmes du 1^{er} et du 2^e ordre.

XII - Analyse des systèmes asservis - Stabilité

L'objectif des analyses, c'est la détermination de certaines caractéristiques essentielles comme le degré ou l'étendue de la stabilité d'un système, la rapidité, la précision, le comportement du système en régime permanent, la réponse transitoire, etc.

Diverses méthodes informatiques ou graphiques (Black, Bode, Nyquist) sont disponibles pour déterminer ces caractéristiques.

1. Stabilité des systèmes asservis, marges de gain et de phase

Un système dont la stabilité diminue est moins bien amorti, présente plus d'oscillations et a un temps de réponse plus long. Le gain, les retards et la présence d'intégrateurs ou de dérivateurs ont une influence sur la stabilité.

Savoir si un système est stable ou non ne suffit pas en général. S'il est stable, il faut aussi savoir s'il est proche ou non de l'instabilité.

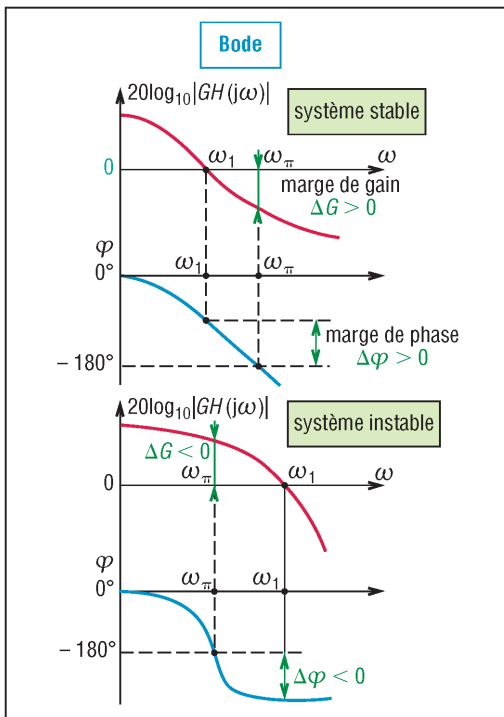
En pratique, on assure la stabilité des systèmes en prenant des marges de sécurité qui se traduisent par une distance à respecter entre le lieu de la FTBO (page 541) et le point critique.

a) Influence du gain, marge de gain

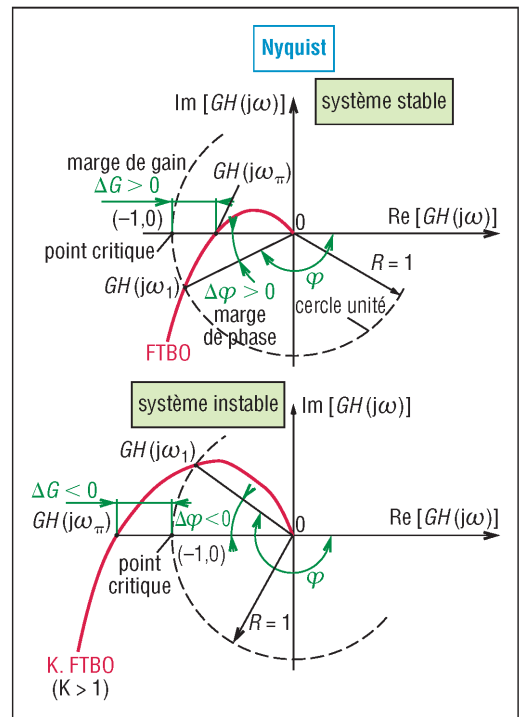
Lorsqu'on multiplie la FTBO d'un système par K (K réel > 0), le lieu de Nyquist correspondant se modifie ce qui influe sur la stabilité. Plus K croît, plus le lieu grandit et se rapproche du point critique ($-1 + j0$), moins il y a de stabilité (fig. 43 et 52 ci-après).

Marge de gain (ΔG en dB) : pour garantir la stabilité on se fixe une marge de gain ΔG sous la forme d'une distance à respecter entre le point critique et le point de la FTBO pour lequel la phase vaut -180° (à la fréquence ω_π d'inversion de phase).

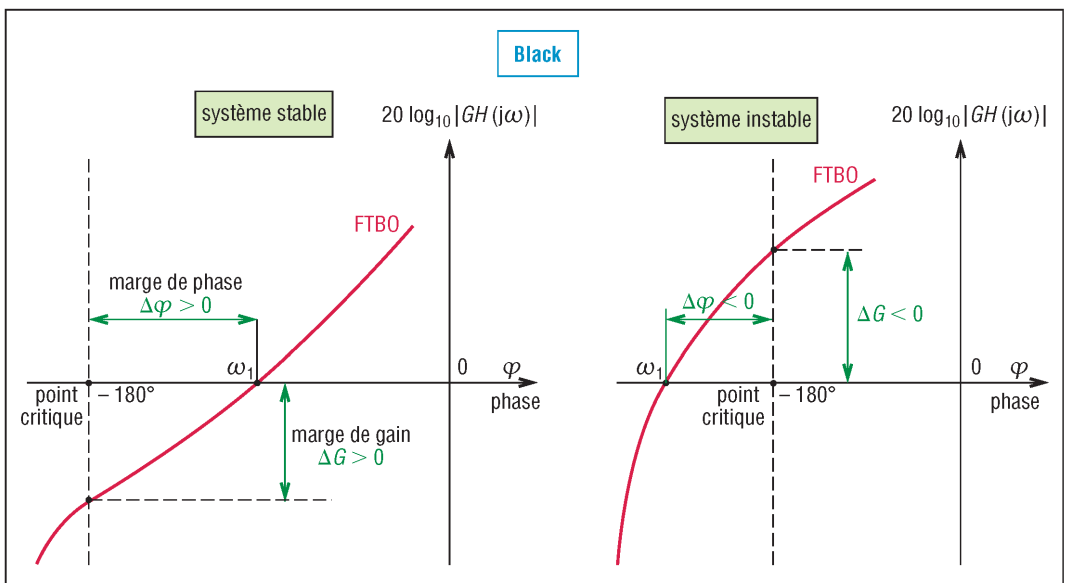
Marge de gain = 0 dB - |GH(jω_π)| = 0 dB - |FTBO(jω_π)| avec arg GH(jω_π) = -180°



42. Marge de phase et de gain, cas de Bode. FTBO = GH.



43. Marge de phase et de gain, cas de Nyquist.



44. Marge de phase et de gain, cas de Black/Nichols. FTBO = GH.

b) Influence de la phase, marge de phase

Pour qu'il y ait stabilité, le gain de la FTBO (FTBO = GH) doit être négatif lorsque la phase est de -180°. Pour respecter cette condition on se fixe une marge de phase.

Marge de phase Δφ ou φ_{MP} : c'est la différence entre la phase du point de la FTBO de gain nul (à la fréquence ω₁ d'inversion ou de coupure) et la phase du point critique.

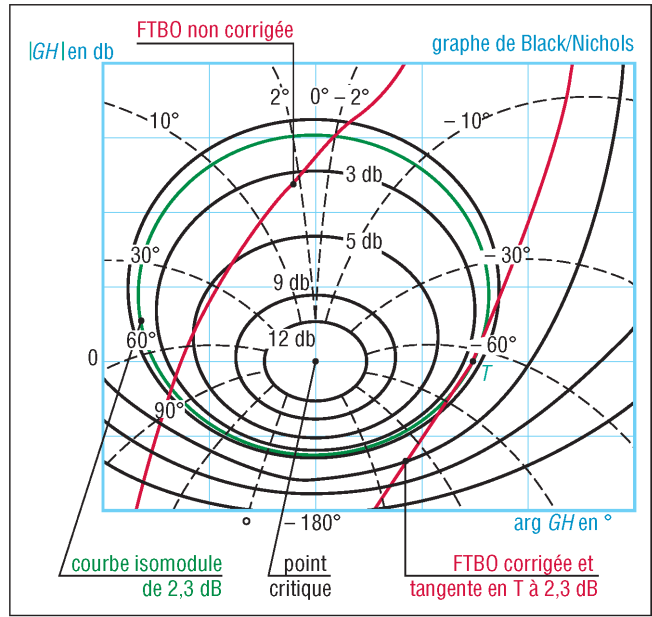
$\Delta\varphi = \varphi_{MP} = [180^\circ + \arg GH(j\omega_1)]$ avec $|GH(j\omega_1)| = 1$ ou $20\log_{10}|GH(j\omega_1)| = 0$

Remarque : en pratique, on utilise couramment une marge de phase de 45° pour assurer un bon compromis entre précision, stabilité et rapidité.

c) Gain maximum à la résonance M_r

Une autre façon de garantir une marge de stabilité suffisante consiste à limiter l'amplitude de la FTBF à la résonance. L'abaque de Black/Nichols permet de connaître cette amplitude à partir du lieu de la FTBO.

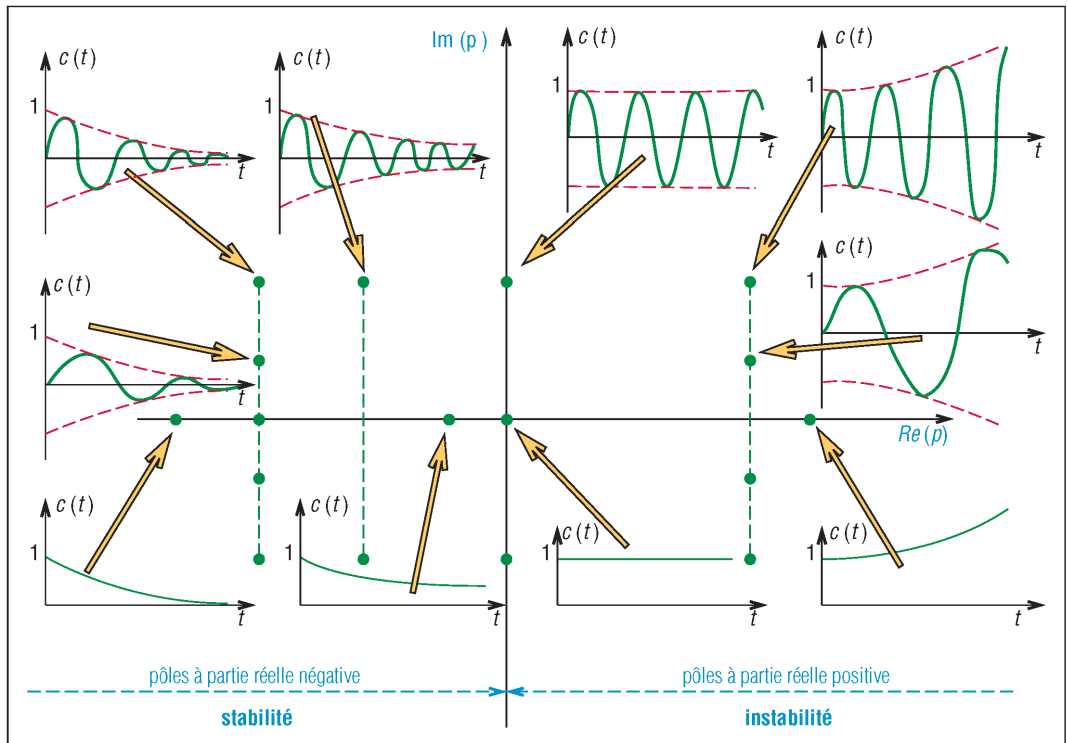
On admet généralement qu'un asservissement est correctement réglé lorsque le gain maxi à la résonance de sa réponse fréquentielle (FTBF) est proche de 2,3 dB. Ce gain maxi s'obtient au point de tangence (T) de la FTBO correspondante avec l'une des courbes isomodule du diagramme de Black/Nichols.



45. Marge de stabilité obtenue par le gain maxi à la résonance.

2. Stabilité, aspect mathématique

Un système en boucle fermée est stable si sa fonction de transfert FTBF n'a que des pôles à partie réelle négative. Lorsque le système est mis sous forme canonique, les pôles de la FTBF sont les zéros du dénominateur ou de l'équation caractéristique : $[1 + G(p)H(p) = 1 + FTBO = 0]$.

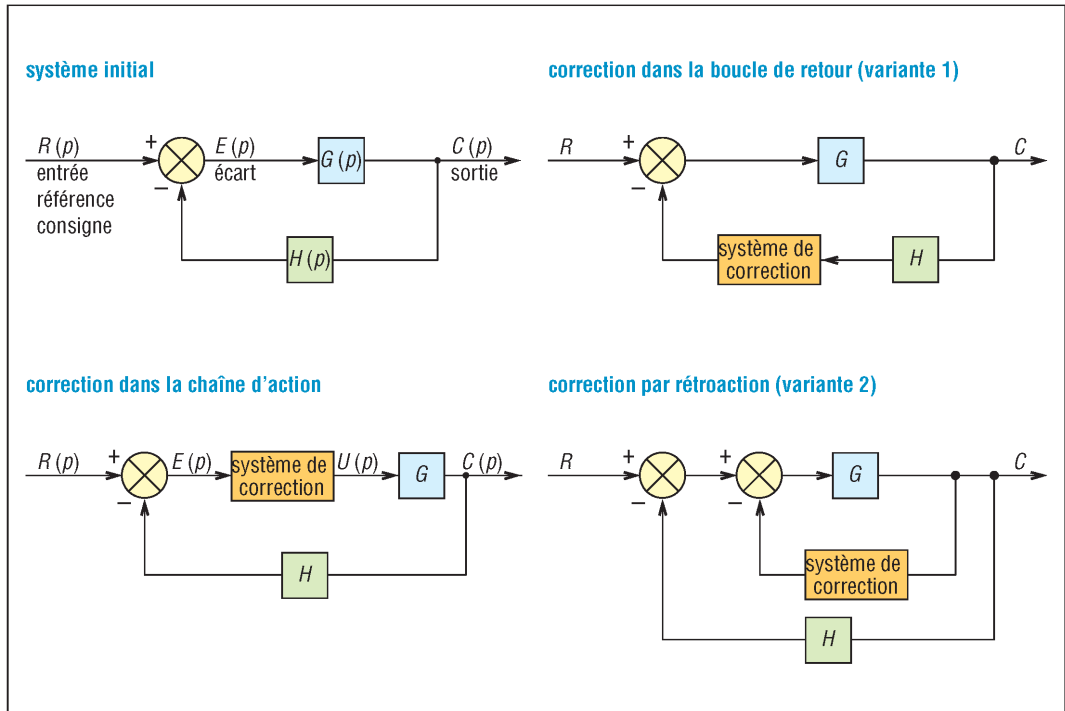


46. Lieu des pôles de la FTBF et allure des réponses impulsionnelles. Symétrie des réponses par rapport à $Re(p)$. FTBF : page 541.

Remarque : la réponse $c(t)$ figure 46 est la même pour un pôle ou son conjugué.

XIII - Correction des systèmes asservis

Pour obtenir les performances requises et un comportement désiré, il est souvent nécessaire d'ajouter des composants de correction à un système initial. Les correcteurs peuvent être insérés dans la chaîne d'action ou dans la chaîne de retour, les composants de départ G (processus) et H (retour) étant supposés fixés.



47. Principe de correction des systèmes asservis.

Remarque : le système doit avoir une réponse acceptable, à la fois en régime transitoire, où la stabilité est essentielle, et en régime permanent, où la précision est primordiale. Ces deux objectifs sont souvent en contradiction, car en cherchant à améliorer la précision, on dégrade en même temps la stabilité. Pour réaliser un bon compromis il faut souvent combiner plusieurs éléments de correction.

1. Correction proportionnelle

Le signal de sortie du correcteur $u(t)$ est proportionnel au signal d'entrée $e(t)$. La correction proportionnelle est une amplification à gain constant.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad ; \quad \frac{U(p)}{E(p)} = K_p \quad ; \quad \text{FTBF} = \frac{K_p G(p)}{1 + K_p G(p)H(p)} \quad ; \quad \text{FTBO} = K_p G(p)H(p)$$

Propriétés : l'action proportionnelle augmente la rapidité et a une action immédiate. Plus le gain est élevé (K_p grand) plus la réponse s'accélère, plus l'erreur statique diminue, mais plus la stabilité se dégrade (fig. 43 et 52).

Exemples : amplificateur (électronique), bras de levier et engrenage (en mécanique).

Remarques : la correction proportionnelle ne change pas la nature d'un système (un système de type α reste de type α) et n'introduit pas de nouveaux zéros ou pôles dans la FTBF. Par contre, elle affecte la position des pôles, diminuant ainsi la stabilité (fig. 52).

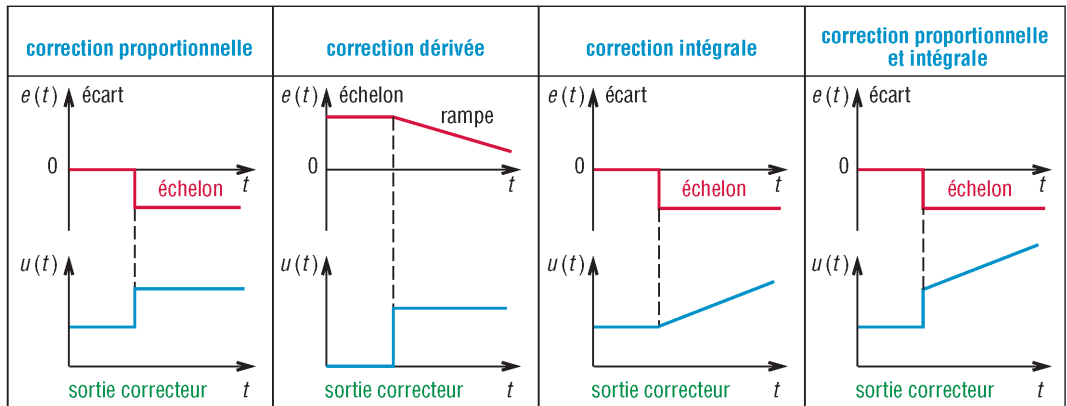
2. Correction dérivée

Le signal de sortie du correcteur $u(t)$ est proportionnel à la variation du signal d'entrée ou écart $e(t)$:

$$u(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} ; \quad \frac{U(p)}{E(p)} = K_d \cdot p ; \quad \text{FTBF} = \frac{K_d \cdot p \cdot G(p)}{1 + K_d \cdot p \cdot G(p)H(p)} ; \quad \text{FTBO} = K_d \cdot p \cdot G(p)H(p)$$

Propriétés : plus l'écart augmente rapidement, plus l'action dérivée accélère la réponse du système et inversement la ralentit si celui-ci diminue. Par exemple, pour une entrée échelon, il n'y a pas d'action dérivée, comme $e(t)$ ne varie pas, $u(t) = 0$. Avec une entrée rampe, la variation est constante, la sortie $u(t)$ est aussi constante (**fig. 48**).

L'action dérivée, en corrigeant les variations rapides de l'entrée, freine la montée au voisinage de la consigne et évite les dépassements éventuels.



48. Exemples de sorties corrigées.

Remarque : la correction dérivée ajoute un terme en p (dérivateur), ce qui réduit de 1 le type du système et augmente la stabilité (on augmente la phase de 90° et par là la marge de phase).

3. Correction proportionnelle et dérivée (PD)

Elle accroît la rapidité et revient à une correction par avance de phase. La partie dérivée permet de réagir plus vite à une variation du signal d'entrée, ce qui améliore le temps de réponse du système, alors que la partie proportionnelle du correcteur amplifie ces mêmes variations.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} ; \quad \frac{U(p)}{E(p)} = K_p + K_d p = K_p (1 + T_d p) ; \quad \text{FTBO} = [K_p + K_d p] G(p)H(p)$$

4. Correction intégrale

Le signal de sortie du correcteur $u(t)$ est proportionnel à l'intégrale du signal d'entrée $e(t)$ par rapport au temps t :

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt ; \quad \frac{U(p)}{E(p)} = \frac{K_i}{p} ; \quad \text{FTBO} = \frac{K_i}{p} G(p)H(p)$$

Propriétés : la correction intégrale prend en compte l'écart et le temps. Plus le temps grandit, plus la correction améliore la précision du système (diminue l'erreur statique) mais plus la stabilité se dégrade. Par exemple, pour une entrée échelon, l'intégrale de 0 à t représente l'aire sous le signal $e(t)$ et l'axe t . Si t croît, $u(t)$ augmente de manière constante, prenant en compte l'addition des erreurs passées.

Remarque : la correction intégrale ajoute un terme en $1/p$ (intégrateur), ce qui augmente de 1 le type du système et réduit la stabilité (on diminue la phase de -90° et, par là même la marge de phase).

5. Correction proportionnelle et intégrale PI

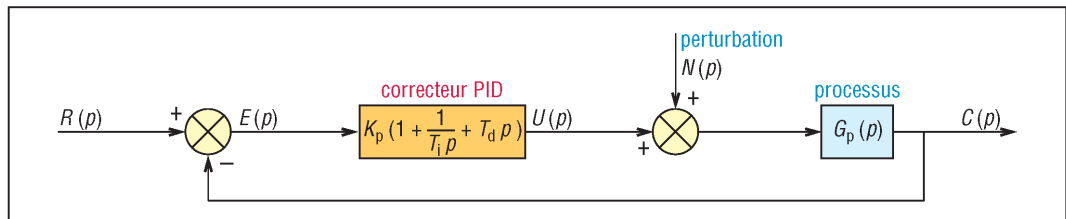
Elle revient à une correction par retard de phase. Elle compense en partie la diminution de la stabilité engendrée par la correction intégrale seule. Plus lente, elle permet de corriger les excès engendrés par la correction proportionnelle seule.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt ; \quad \frac{U(p)}{E(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) ; \quad \text{FTBO} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) G(p)H(p)$$

6. Correction Proportionnelle - Intégrale - Dérivée, Correcteur PID

Souvent utilisé, le correcteur PID est une sorte de correcteur universel réglable réunissant les possibilités des corrections proportionnelle, dérivée et intégrale.

a) Forme de base



49. Correction PID, variante de base.

Pour la forme de base proposée à retour unité, la loi reliant l'entrée $e(t)$ à la sortie $u(t)$ du correcteur s'écrit ($T_i = K_p/K_i$ et $T_d = K_d/K_p$) :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{et} \quad \frac{U(p)}{E(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right)$$

En l'absence de perturbation $n(t)$:

$$\text{FTBF} = \frac{Kp(1 + 1/T_i p + T_d p) \cdot G_p(p)}{1 + K_p(1 + 1/T_i p + T_d p) \cdot G_p(p)}$$

Remarque : le correcteur augmente le nombre de zéros de 2 et le nombre de pôles de 1.

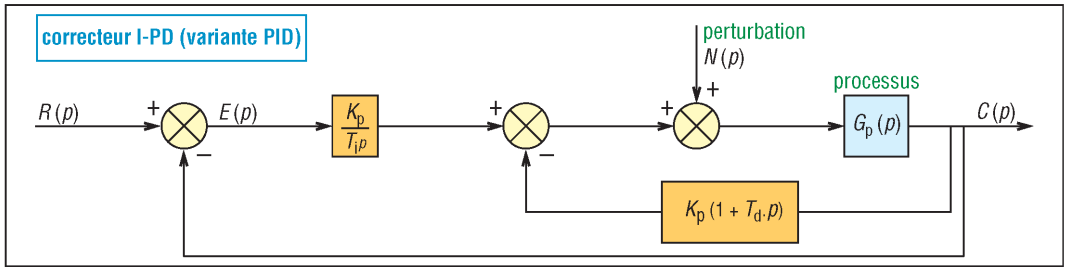
b) Variante, correction I-PD (fig. 50)

Dans ce cas d'utilisation, la consigne $r(t)$ est transmise par une action intégrale et l'action proportionnelle dérivée agit sur la mesure (signal de retour). Cette configuration évite les phénomènes de saturation du cas précédent qui sont la conséquence de trop grands signaux de commande engendrés par l'action dérivée lorsque l'écart change soudainement.

L'action proportionnelle dérivée sur le signal de retour permet d'avoir un plus grand éventail de choix de valeurs pour K_p et T_d et ainsi d'atténuer plus rapidement les effets d'une perturbation. Si le PID est globalement plus rapide que le I-PD, les réponses à la consigne $r(t)$ des deux variantes sont équivalentes.

En l'absence de perturbation $n(t)$:

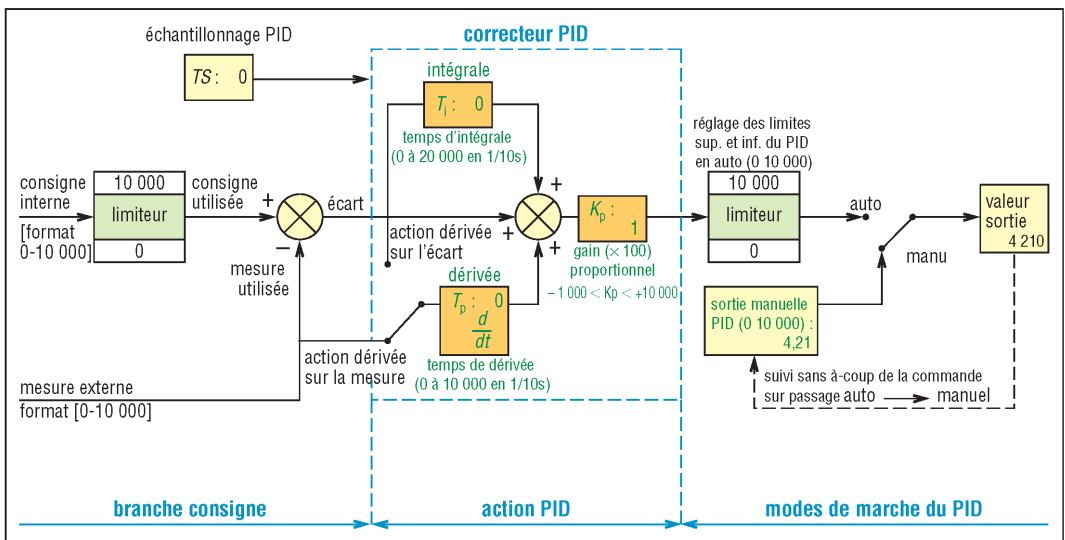
$$\text{FTBF} = \frac{(Kp/T_i p) G_p(p)}{1 + K_p(1 + 1/T_i p + T_d p) G_p(p)}$$



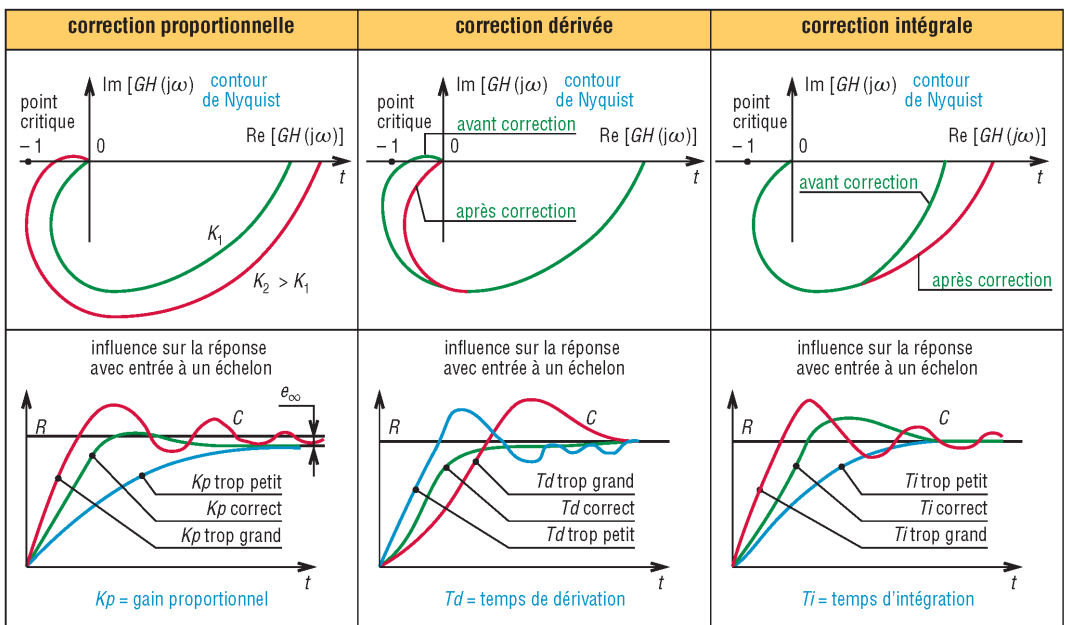
50. Correction PID, forme variante.

c) Exemple d'application industrielle

Les automates programmables industriels (API) possèdent généralement une fonction PID, avec gain proportionnel (Kp) réglable et des actions intégrale (Ti) et dérivée (Td) à temps réglables. Les caractéristiques peuvent être fixées par programmation et modifiées à la console. Schématiquement, le dispositif proposé figure 51 permet les deux variantes de fonctionnement précédentes, PID et I-PD.



51. Exemple de correcteur PID industriel.



52. PID, actions proportionnelle, dérivée et intégrale.

45

ÉCO-CONCEPTION : NORMALISATION, PROCESSUS, MÉTHODOLOGIE

OBJECTIFS

- Définir les principaux termes utilisés.
- Préciser les aspects, impacts et objectifs environnementaux.
- Indiquer les objectifs et approches de l'éco-conception.
- Développer la notion de cycle de vie.
- Développer le processus d'éco-conception.
- Décrire et développer une méthodologie normalisée.
- Fournir des éléments concernant l'étiquetage.

Tout produit a un impact sur l'environnement. Cet impact peut se produire au cours de l'une des phases de son cycle de vie ou tout au long de celui-ci : acquisition des matières premières et énergies, fabrication, distribution, utilisation, maintenance, valorisation et fin de vie. L'importance de ces impacts peut être faible ou significative, être à court ou à long terme, se produire au niveau local, national, d'une région du monde ou mondial...

L'éco-conception est une démarche de conception de produit (et de son emballage) dont le but est de permettre, à performances égales, de réduire ou minimiser les impacts environnementaux négatifs au long de son cycle de vie et cela dans un processus d'amélioration continu et de coûts maîtrisés. L'éco-conception n'est pas une activité isolée, mais fait partie intégrante d'un processus de conception et développement déjà existant (NF EN ISO 14006...).

La plupart des éléments de ce chapitre sont extraits, des normes du tableau ci-dessous. La méthodologie abordée paragraphe VII, extraite de la NF E 01 005, bien adaptée aux « produits mécaniques », propose une démarche pragmatique. Voir aussi XPE 01-006 et NFP 01-010.

| Principales normes nationales et internationales utilisées pour ce chapitre | | |
|---|-----------------|--|
| Type de normes | Référence norme | Titre – Objet |
| Prise en compte de l'environnement pour les produits | NF E 01 005 | Produits mécaniques – Méthodologie d'éco-conception (mise à jour de l'XPE 01 005) |
| | NF X 30-264 | Management environnemental – aide à la démarche d'éco-conception |
| | XP ISO/TR 14062 | Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit |
| | NF EN 62430* | Éco-conception pour les produits électriques et électroniques (* ou CEI 62430) |
| Analyse du cycle de vie (ACV) | NF EN ISO 14040 | ACV – Principes et cadre |
| | NF EN ISO 14041 | ACV – Définitions, objectif, champ d'étude et analyse inventaire |
| | NF EN ISO 14044 | ACV – Exigences et lignes directrices |
| | XP ISO/TS 14048 | ACV – Format de documentation des données |
| | FD ISO/TR 14049 | ACV – Exemples d'application de l'ISO 14041... |
| Étiquetage et déclarations environnementales | NF EN ISO 14020 | Principes généraux |
| | NF EN ISO 14021 | Marquage et déclarations – Auto-déclarations environnementales (Étiquetage de type II) |
| | NF EN ISO 14024 | Marquage et déclarations – Étiquetage environnemental de type I – Principes et méthodes |
| | NF EN ISO 14025 | Marquage et déclarations – Déclarations de type III – Principes et modes opératoires |
| | BP X 30-323 | Principes généraux pour l'affichage environnemental des produits de grande consommation |

I - Termes et définitions

La plupart des définitions de ce chapitre sont normalisées.

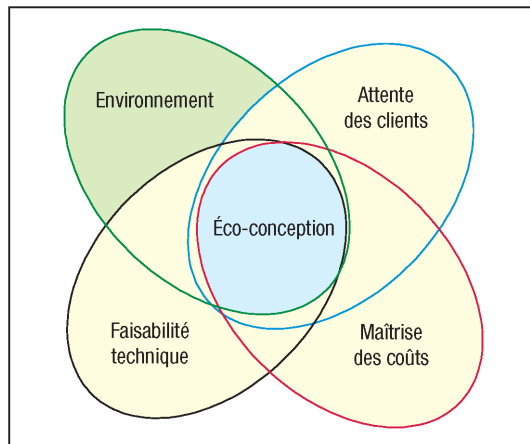
Conception et développement : ensemble d'activités ou processus qui utilisent une idée ou une exigence et la transforme en un produit.

Le processus suit, en général, une série d'étapes définies qui commence avec une idée de départ, la transforme en spécification formalisée débouchant sur la création d'un prototype de travail et sur la documentation nécessaire (plans, schémas...) pour permettre la production des biens ou la fourniture du service.

Éco-conception (ECD : Environmentally Conscious Design) : approche systématique qui prend en compte les aspects environnementaux dans le processus de conception en vue d'améliorer la performance environnementale du produit tout au long de son cycle de vie.

Remarque 1 : l'amélioration des performances environnementales sous-entend que la performance d'usage du produit (aptitude à l'emploi, durabilité...) ne soit pas dégradée.

Remarque 2 : l'éco-conception consiste à intégrer l'environnement dès la phase de conception des produits qu'il s'agisse de biens, de services ou de procédés. Cette intégration repose sur une approche globale et multicritère de l'environnement et est fondée sur la prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie des produits.



1. Notion d'éco-conception : principales contraintes.

Ligne directrice de conception (LD) : règle pour l'amélioration d'un aspect environnemental particulier du cycle de vie du produit. L'ensemble des lignes directrices constitue l'état de l'art des pistes à développer pour une (re)conception environnementale des produits.

| Terminologie liée à l'environnement | |
|---|--|
| Termes | Définitions |
| Environnement | Milieu dans lequel un organisme fonctionne, incluant l'air, l'eau, la terre, les ressources naturelles, la flore, la faune, les êtres humains et leurs interactions. |
| Aspect environnemental (AE) | Élément des activités, produits ou services d'un organisme, susceptibles d'interactions avec l'environnement. |
| Profil environnemental | C'est l'« image » environnementale du produit à un instant, donnée par la hiérarchisation des aspects environnementaux du produit sur son cycle de vie. |
| Impact environnemental | Toute modification, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des aspects environnementaux d'un organisme. |
| Catégorie d'impact | Classe représentant les points environnementaux étudiés à laquelle les résultats de l'inventaire du cycle de vie peuvent être affectés. Exemple : acidification, changement climatique... |
| Impact final par catégorie | Aspect de l'environnement naturel, de la santé ou des ressources, permettant d'identifier un point environnemental à problème. Exemples liée à l'acidification : forêt, végétation, récoltes, etc. |
| Indicateur de catégorie d'impact | Représentation quantifiable d'une catégorie d'impact. Exemple de résultat d'indicateur : kg équivalents de CO ₂ par unité fonctionnelle. |
| Indicateur de performance environnemental (IPE) | Expression qui fournit des informations sur la performance environnementale (en résultats mesurables concernant des aspects environnementaux) d'un organisme. |
| Étiquetage environnemental | Mode d'information du consommateur sur des aspects environnementaux du cycle de vie d'un produit par le biais d'une étiquette environnementale |

Cycle de vie (fig. 4) : phases consécutives et liées d'un système de produit, de l'acquisition des matières premières ou de la génération des ressources naturelles jusqu'à l'élimination finale.

| Termes et définitions liés à la notion de cycle de vie et à son étude | |
|---|---|
| Termes | Définitions |
| Analyse du cycle de vie (ACV ou LCA : Life Cycle Analysis) | Compilation et évaluation des entrants et sortants, ainsi que des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie. |
| Inventaire du cycle de vie (ICV) | Phase de l'analyse du cycle de vie impliquant la compilation et la quantification des intrants et des sortants pour un système de produits donné au cours de son cycle de vie. |
| Approche du cycle de vie (LCT : Life Cycle Thinking) | Prise en compte de tous les aspects environnementaux au cours de tout le cycle de vie des produits. |
| Évaluation de l'impact du cycle de vie (ACVI) | Phase de l'analyse du cycle de vie destinée à comprendre et évaluer l'ampleur et l'importance des impacts potentiels d'un système de produits sur l'environnement au cours de son cycle de vie. |
| Unité fonctionnelle | Unité de référence (performance quantifiée...) utilisée dans une analyse de cycle de vie. |

| Terminologies diverses | |
|-----------------------------|--|
| Autres Termes | Définitions |
| Produit | Tout bien ou tout service. Exemples de produit : transports (service) ; softwares (logiciel, dictionnaire...) ; matériels (pièces ou composants) ; produits issus de processus à caractère continu (lubrifiant...). |
| Co-produit | L'un quelconque de deux produits ou plus issus d'un même processus élémentaire ou d'un même système de produit. |
| Système de produits | Ensemble de processus élémentaires du point de vue matériel et énergétique, comportant des flux de produits et des flux élémentaires, et remplissant une ou plusieurs fonctions. |
| Processus | Ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des entrants (ou éléments d'entrée) en sortants (ou éléments de sortie). Les entrants d'un processus sont généralement les sortants d'autres processus et inversement. |
| Processus élémentaire | Plus petite partie prise en compte dans l'inventaire du cycle de vie (ICV) pour laquelle les données d'entrant et de sortant sont quantifiées. |
| Frontière du système | Ensemble de critères qui spécifient quels processus élémentaires font partie du système de produit. |
| Intrant | Flux de produit, de matière ou d'énergie qui entre dans un processus élémentaire. |
| Extrant | Flux de produit, de matière ou d'énergie qui sort d'un processus élémentaire. |
| Intrant auxiliaire | Matière entrante utilisée dans le processus élémentaire de production du produit, mais ne faisant pas partie du produit. |
| Revue critique | Processus destiné à s'assurer de la cohérence entre une étude d'analyse du cycle de vie et les principes et exigences spécifiées par la normalisation. |
| Déchets | Substances ou objets que le détenteur a l'intention d'éliminer ou qu'il est tenu d'éliminer (la définition ne se limite pas qu'aux déchets dangereux). |
| Émissions | Émissions dans l'air et rejets dans l'eau et le sol. |
| Fonctionnalité d'un produit | C'est le degré d'adaptation du produit à l'utilisation auquel il est destiné en termes d'aptitude à l'usage, de durée de vie, d'aspect extérieur, etc. |
| Chaîne d'approvisionnement | Ceux prenant part, par des liaisons aval et amont, à des processus ou des activités qui fournissent de la valeur sous forme de produits aux utilisateurs (chaîne interconnectée depuis les fournisseurs jusqu'à ceux qui participent aux traitements en fin de vie). Les expressions « chaîne de produits » et « chaîne de valeurs » sont souvent utilisées. |
| Organisme | Ensemble d'installations et de personnes avec des responsabilités, pouvoirs et relations. |
| Énergie primaire | Énergie totale contenue dans une ressource comme l'énergie potentielle de l'eau derrière un barrage ou celle du pétrole brut avant raffinage. |

II - Fondamentaux de l'éco-conception

1. Approches et démarches usuelles de l'éco-conception

Le processus de conception et de développement commence avec la spécification des fonctions du produit. Les paramètres environnementaux retenus pour l'éco-conception du produit seront définis à partir des aspects environnementaux significatifs hiérarchisés ayant été identifiés.

L'organisme doit ensuite évaluer différentes approches possibles de conception et de développement dans le but de réduire les impacts nocifs causés par le produit sur l'environnement tout au long de son cycle de vie et ne retenir que les meilleures.

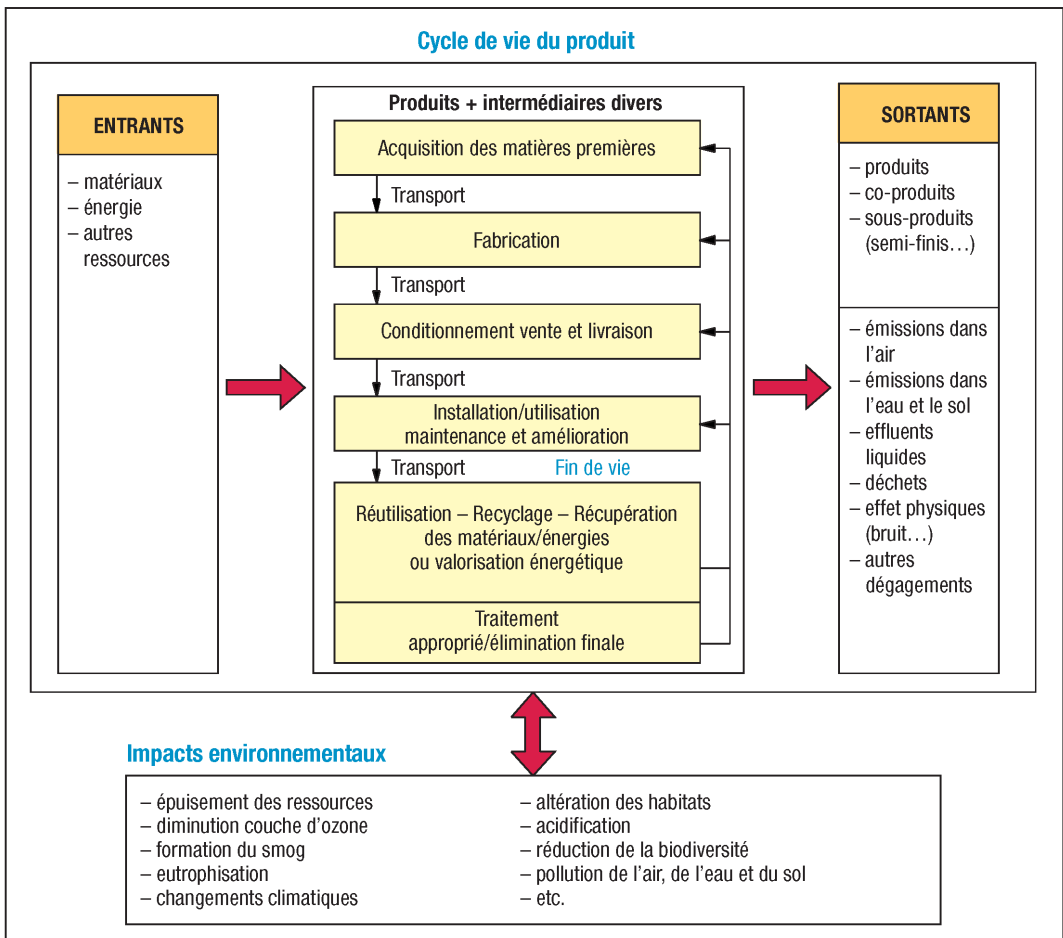
Remarque : Les choix et les compromis à envisager en éco-conception

En éco-conception, il faut faire les meilleurs compromis possibles en recherchant les solutions optimales pour le produit

– **Compromis entre les aspects environnementaux :** comme compromis réduction de masse/durée de vie, compromis réduction de masse/aptitude au recyclage...

– **Compromis entre bénéfices environnementaux économiques et sociaux :** les bénéfices peuvent être tangibles (coûts diminués, réduction des déchets...), intangibles (aspect pratique...) ou émotionnels (meilleure image...). Rendre un produit plus robuste peut améliorer sa durée de vie, mais aussi augmenter ses coûts.

– **Compromis entre aspects environnementaux, techniques et/ou de qualité :** l'utilisation d'un matériau particulier peut avoir un impact négatif sur la fiabilité et la durabilité en dépit d'avantages environnementaux procurés.



2. Exemples d'impacts environnementaux associés aux entrants, aux sortants et aux phases du cycle de vie d'un produit.

Le tableau suivant donne les approches usuelles, démarches et exemples de considérations potentielles de l'éco-conception utiles aux éco-concepteurs.

| Exemples typiques d'approches d'éco-conception régulièrement utilisées | |
|---|--|
| Approche d'éco-conception | Démarche ou méthode suivie, exemples |
| Examiner et s'occuper de la fonctionnalité du produit. Optimiser celle-ci | Examiner la fonctionnalité du produit, son niveau d'adaptation à l'utilisation à laquelle il est destiné (aptitude à l'usage, durée de vie effective, aspect visuel...). Envisager toutes les possibilités ou opportunités de multiplier les fonctions du produit, sa modularité, son contrôle automatique. Le comparer avec d'autres produits... |
| Améliorer l'efficacité des matériaux | Vérifier si l'impact environnemental des matériaux peut être réduit ; par exemple, en utilisant une quantité minimale de matériaux, ou en choisissant des matériaux à moindre impact, ou des matériaux renouvelables ou récupérés. Remarque : diminuer la masse ou le volume des produits réduit l'impact lié à l'épuisement des ressources, mais aussi la masse ou le volume d'expédition et donc les émissions liés aux transports. |
| Améliorer l'efficacité énergétique ou le rendement énergétique | Considérer la consommation totale d'énergie pendant tout le cycle de vie du produit, y compris en phase d'utilisation et vérifier si l'impact environnemental peut être réduit ; par exemple en diminuant la quantité de matériaux, ou en utilisant des énergies à moindre impact ou renouvelables... Exemple : améliorer l'efficacité énergétique en mode veille des appareils électroménagers. |
| Examiner la composition des matériaux. Éviter les substances et matériaux dangereux | Identifier les substances contenues dans le produit, y compris dans les composants achetés. Examiner la possibilité de réduire ou éviter l'utilisation de substances potentiellement dangereuses dans le produit. Vérifier les effets sur la santé humaine, la sécurité et l'environnement. Préférer les matériaux et les transports de moindre impact. |
| Privilégier une conception tournée vers la durabilité | Examiner la longévité du produit et sa facilité de service, son aptitude à la réparation et à sa maintenabilité. Examiner les possibilités d'améliorations environnementales avec les nouvelles technologies du moment. Remarque : allonger la durée de vie peut réduire les besoins en ressources, mais peut aussi retarder la mise en œuvre de progrès capables d'améliorer les performances environnementales. Il est judicieux d'avoir un équilibre entre durée de vie effective (temps de présence du produit sur le marché avant obsolescence) et durée de vie technique (durée de vie avant usure). En effet, certains produits sont jetés avant d'être usés ou avant d'être obsolètes parce qu'ils sont passés de mode ou ne sont plus utiles. |
| Privilégier une conception orientée vers une production et une utilisation plus propres | Sélectionner des techniques de production propres. Éviter l'utilisation de produits consommables et de matériaux auxiliaires dangereux. Adopter une approche globale du problème. |
| Optimiser le conditionnement | Examiner les matériaux utilisés pour le conditionnement et l'emballage du point de vue d'une utilisation efficace et avec des informations concernant le système de reprise. |
| Examiner l'ensemble du transport | Examiner les distances de transport au cours de la production et de la distribution du produit en tenant compte de la détermination efficace du volume et aussi celle de la masse du produit. |
| Choisir une conception tournée vers la valorisation, réutilisation, récupération et recyclage | Examiner les possibilités visant à faciliter le démontage et réduire la complexité des matériaux. Utiliser des matériaux, des sous-ensembles et des composants recyclables. Faciliter la récupération des ressources et des matériaux. Étudier la récupération des sous-ensembles et des composants. Remarque : concevoir des produits facilement démontables peut allonger la durée de vie par la réutilisation de pièces et encourager le recyclage. |
| Gérer au mieux la fin de vie du produit | Examiner la valeur des ressources pouvant être récupérés à partir des produits récupérés et à partir des processus. Examiner et analyser aussi les exigences de traitement des déchets, ainsi que leurs impacts économiques sur l'organisme. |
| De manière générale, utiliser l'espace avec modération | À envisager notamment lorsqu'une grande infrastructure ou des matériaux grands consommateurs d'espace sont utilisés dans le système de produit. |

2. Aspects fondamentaux de l'éco-conception (ECD)

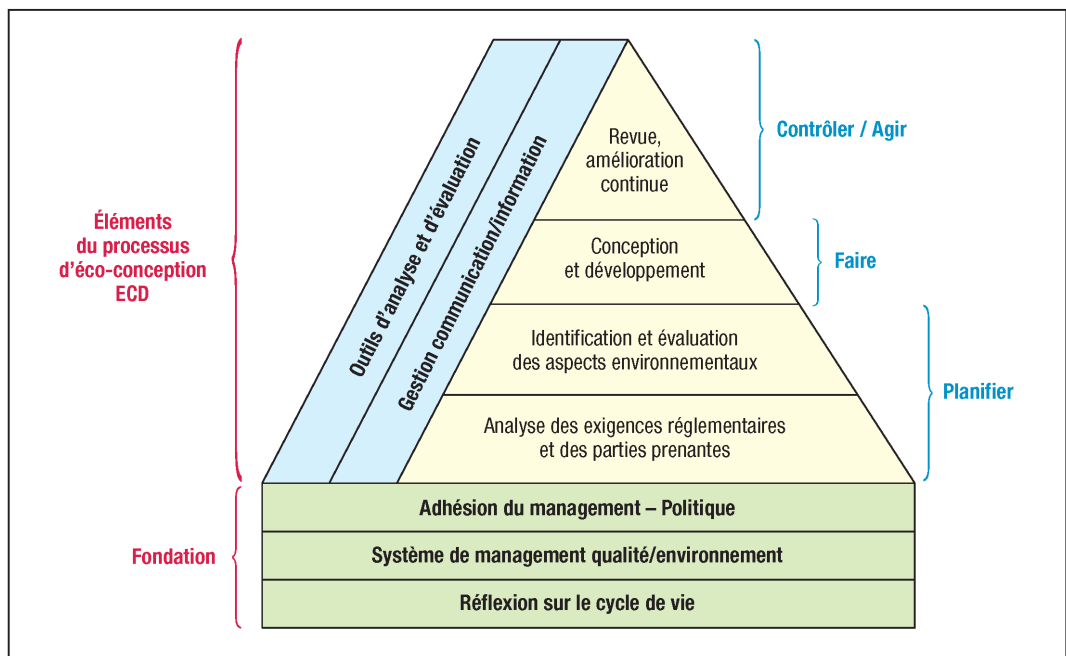
L'éco-conception est fondée sur l'approche du cycle de vie (LCT) du produit et il est nécessaire d'intégrer celle-ci au plus tôt dans le processus ECD (fig. 3).

a) Approche du cycle de vie

L'approche du cycle de vie (LCT) est essentielle pour réaliser une ECD qui exige la prise en compte, au cours du processus, des aspects environnementaux significatifs d'un produit au cours de toutes les phases de son cycle de vie. Il faut faire une approche globale depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit. (Voir figure 2).

Éléments clés :

Exemple : La consommation d'eau ou d'énergie d'un lave-linge ou d'un lave-vaisselle pendant sa phase d'utilisation génère les impacts environnementaux les plus importants de toutes les étapes de son cycle de vie. Prévoir et viser la diminution de ces consommations dès la phase de conception réduira donc efficacement les impacts.



3. Vue d'ensemble du processus d'éco-conception ECD. Extrait NF EN 62430. ECD produits électiques.

b) Exigences réglementaires et exigences des parties prenantes

L'éco-conception est menée dans le cadre des limites fixées par les exigences réglementaires et les parties prenantes, les changements technologiques, les tendances économiques ainsi que les politiques et les procédures de l'organisme. Ces exigences doivent être revues ou réexaminées de manière régulière afin que les modifications concernées soient comprises par l'entreprise qui entreprend l'ECD.

Les exigences réglementaires et celles des parties prenantes peuvent inclure :

- des restrictions et obligations résultant de réglementations nationales ou internationales ;
- des normes techniques et des accords volontaires ;
- des besoins du marché et des clients, les tendances et les attentes ;
- des attentes de la société en général et des investisseurs, comme par exemple les avancées technologiques.

c) Intégration dans le système de management

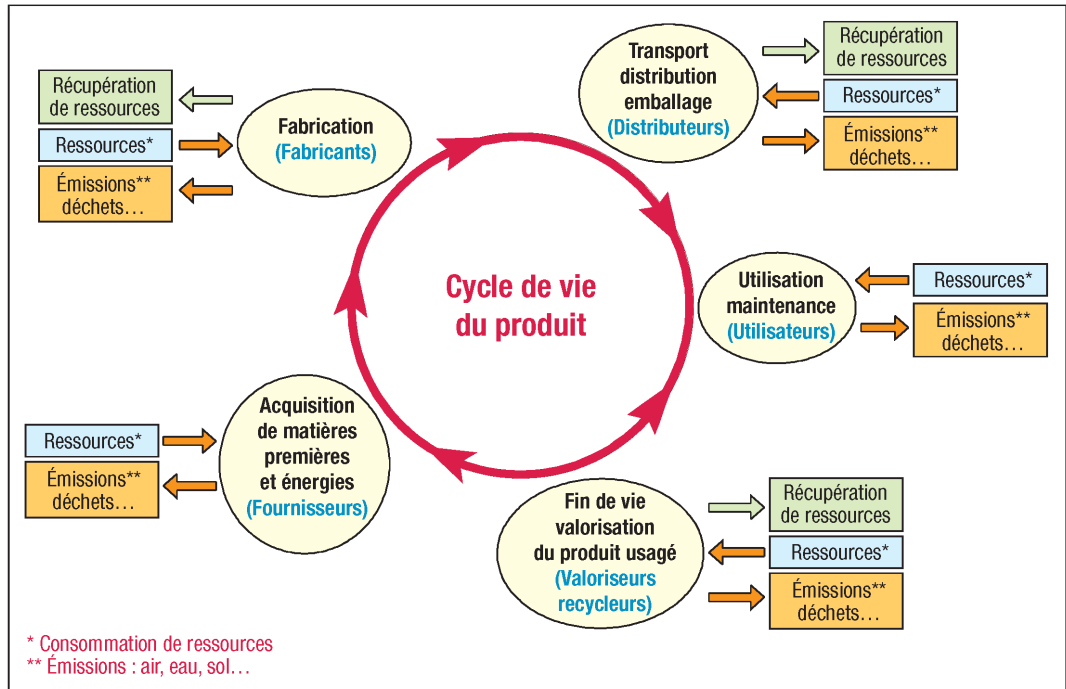
L'éco-conception et son objectif pour minimiser l'impact défavorable global d'un produit doivent être repris dans les politiques et les stratégies de l'organisme.

III - Analyse du cycle de vie

Les principaux termes ou vocabulaire (ACV, ICV, ACVI...) associés à ce paragraphe sont définies au paragraphe I page 569.

1. Rôle des analyses du cycle de vie (ACV)

Les analyses du cycle de vie (ACV ou LCA en anglais), avec les approches du cycle de vie (LCT) correspondantes, sont des outils fréquemment utilisés pour analyser les impacts environnementaux d'un produit dans la mesure où elles génèrent des informations quantitatives ou des résultats mesurables.



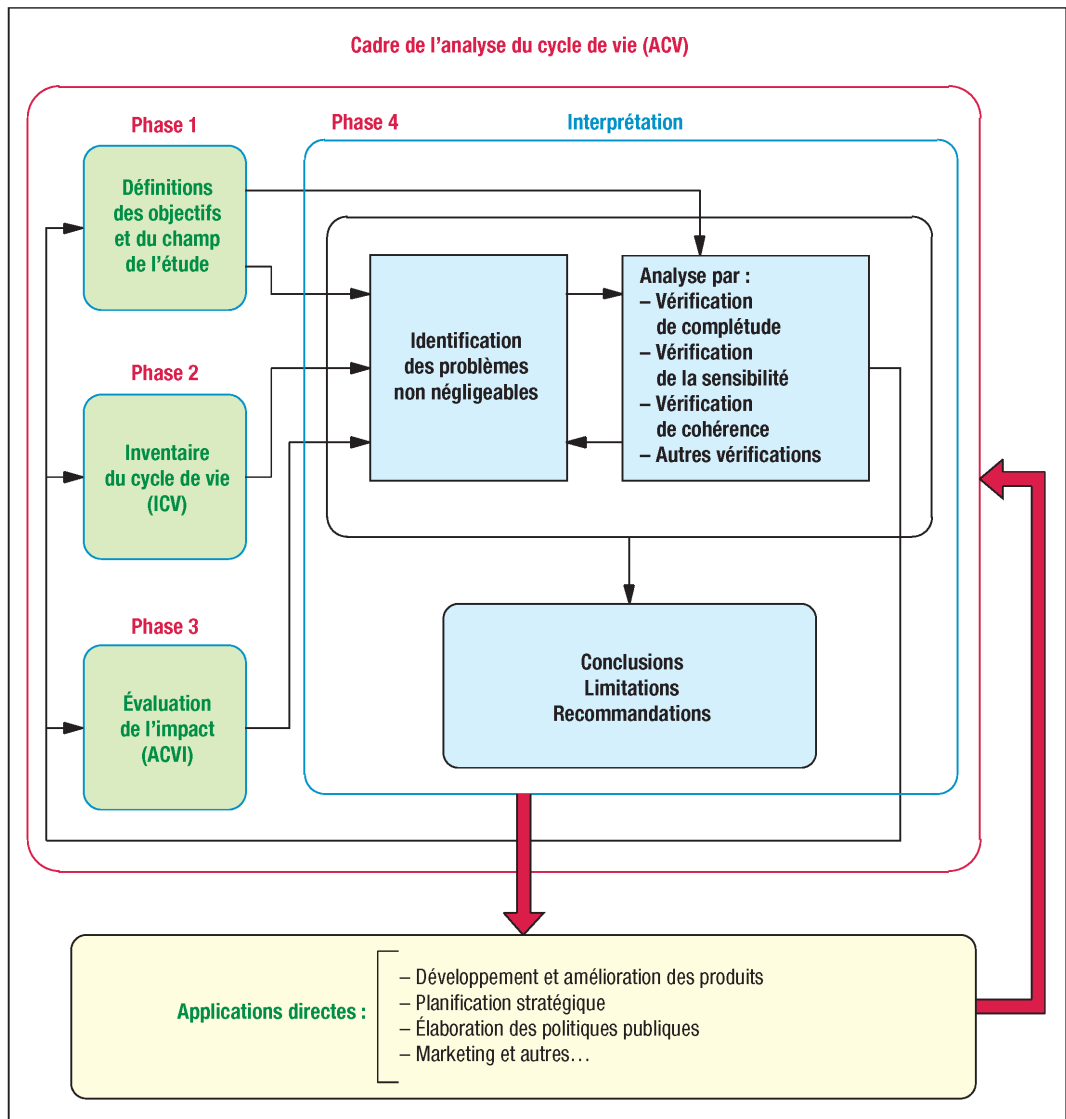
4. Principales phases du cycle de vie utilisées en éco-conception.

Les ACV prennent en considération l'ensemble du cycle de vie d'un produit, depuis l'extraction et de l'acquisition des matières premières, à l'utilisation, au traitement en fin de vie et à l'élimination finale des déchets en passant par la production d'énergie et de matière ainsi que la fabrication. Les résultats des ACV et ICV (inventaires du cycle de vie) constituent des données utilisables par un grand nombre de processus de décision et de conception et sont fondamentales en éco-conception.

Approche systémique : l'ACV modélise le cycle de vie d'un produit sous la forme d'un système de produits (système caractérisé par sa fonction et pas uniquement d'après les produits finaux) qui remplit une ou plusieurs fonctions définies. Les systèmes de produits se subdivisent en processus élémentaires qui sont reliés entre eux par des flux de produits intermédiaires et/ou des déchets destinés au traitement, à d'autres systèmes de produits par des flux de produits et à l'environnement par des flux élémentaires.

2. Phases des analyses du cycle de vie

Les études d'analyse du cycle de vie (ACV) comprennent quatre phases principales : la définition des objectifs et du champ de l'étude ; un inventaire ; une évaluation de l'impact et une interprétation. Cette analyse implique la compilation et l'évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels pour un système de produits au cours du cycle de vie.



5. Phases usuelles d'une étude ACV (analyse du cycle de vie) et relations entre phases.

• **Les études d'inventaire du cycle de vie (ICV)** comportent trois phases : définition des objectifs et du champ de l'étude ; un inventaire et une interprétation. Cette analyse implique la compilation et la quantification des intrants et des extrants d'un système de produits au cours du cycle de vie. Contrairement à l'ACV, il n'y a ici pas d'évaluation de l'impact.

• **Phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie (ACVI) :** cette phase est destinée à comprendre et à évaluer l'ampleur et l'importance des impacts potentiels d'un système de produits sur l'environnement au cours de son cycle de vie.

Une ACVI comprend l'ensemble des indicateurs des différentes catégories d'impact (fig. 7). Cet ensemble représente le profil ACVI du système de produit. Certains éléments de l'analyse sont obligatoires et d'autres facultatifs (fig. 6).

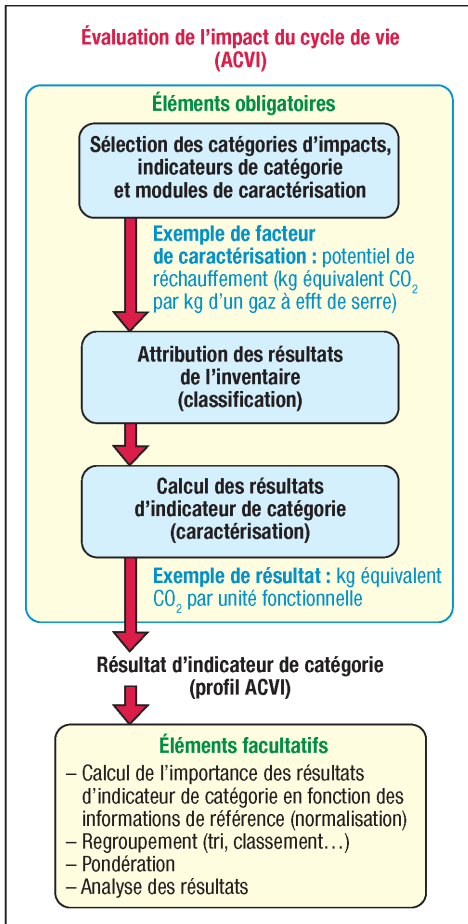
Remarque : il faut avoir suffisamment de données issues d'une ICV préliminaire pour réaliser correctement une ACVI et obtenir des résultats d'indicateurs d'ACVI.

3. Cadre méthodologique d'une ACV

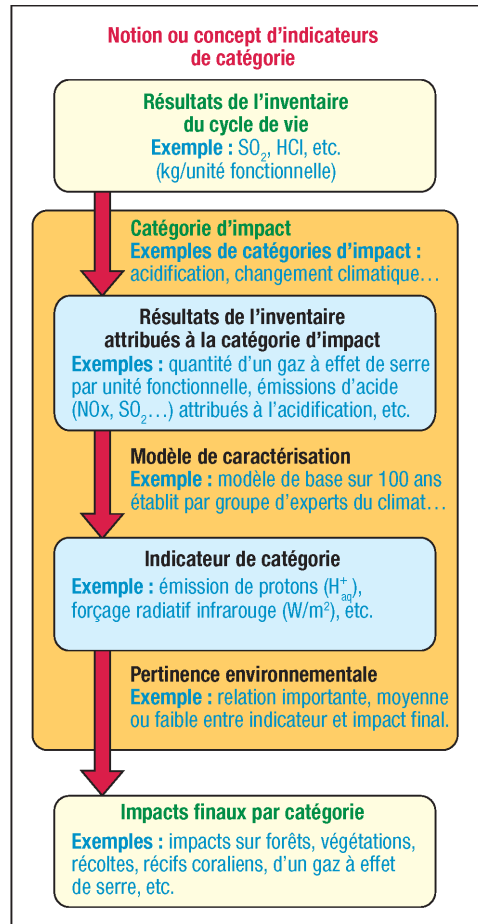
Lors d'une ACV, les exigences de l'ISO 14044 doivent être appliquées :

- définition des objectifs et du champ de l'étude ;
- un inventaire du cycle de vie (ICV) ;
- une évaluation de l'impact du cycle de vie (ACVI) (voir fig. 6) ;

- une interprétation du cycle de vie ;
- la communication des résultats ;
- une revue critique (vérification des résultats, conformité...).



6. Évaluation de l'impact du cycle de vie (ACVI).



7. Notion d'indicateur de catégorie.

| Exemples d'approche du cycle de vie (LCT) permettant d'identifier les phases significatives du cycle de vie et les aspects environnementaux pertinents (source NF EN 62430) | | | | | | |
|---|--|---|---|---|---|--|
| Aspect environnemental | Approvisionnement en matières premières | Fabrication | Conditionnement, transport et distribution | Installation et maintenance | Utilisation | Fin de vie |
| Matières premières Consommation d'énergie | - Quels types de matières premières et d'énergie sont nécessaires ? - Quelle quantité ? | - Y a-t-il besoin de matières premières et d'énergie en fabrication ? - Quelle quantité ? | - Conditionnement pour le transport ? Moyens de transport utilisés ? - Distance de transport ? | - Matières et énergies pour déballer, monter, nettoyer ou réparer ? - Quel type et quelle quantité ? | - Faut-il des matières premières et énergies pour fonctionner ? - Quel type et quelle quantité ? | - Faut-il des Matières premières et énergies en fin de vie ? - Quel type et quelle quantité ? |
| Émission | - Y a-t-il production d'émissions ? Quel type ? Vers où ? - Quelles quantités ? | - Y a-t-il production d'émissions en fabrication ? - Quel type ? - Vers où ? - Quelles quantités ? | - Y a-t-il production d'émissions en transport ? - Quel type ? - Vers où ? - Quelles quantités ? | - Y a-t-il production d'émissions ? - Quel type ? - Vers où ? - Quelles quantités ? | - Y a-t-il production d'émissions en utilisation ? - Quel type ? - Vers où ? - Quelles quantités ? | - Y a-t-il production d'émissions en fin de vie ? - Quel type ? - Vers où ? - Quelles quantités ? |
| Effet physique (bruit, vibrations, rayonnements, etc.) | - Y a-t-il des effets physiques ? | - Y a-t-il des effets physiques en fabrication ? | - Y a-t-il des effets physiques au cours du transport ? | - Y a-t-il des effets physiques à l'installation ? - Effets en maintenance ? | - Y a-t-il des effets physiques au cours de l'utilisation ? | - Y a-t-il des effets physiques en fin de vie ? |

Suite tableau page 576.

| Exemples d'approche du cycle de vie (LCT) permettant d'identifier les phases significatives du cycle de vie et les aspects environnementaux pertinents (source NF EN 62430) Suite page 575 | | | | | | |
|--|--|--|--|--|---|--|
| Aspect environnemental | Approvisionnement en matières premières | Fabrication | Conditionnement, transport et distribution | Installation et maintenance | Utilisation | Fin de vie |
| Matières et consommation d'énergie | <ul style="list-style-type: none"> – Quels types de matières et d'énergie sont nécessaires ? – Quelle quantité ? | <ul style="list-style-type: none"> – Y a-t-il besoin de matières et d'énergie en fabrication ? – Quelle quantité ? | <ul style="list-style-type: none"> – Conditionnement pour le transport ? – Moyens de transport utilisés ? – Distance de transport ? | <ul style="list-style-type: none"> – Matières et énergies pour déballer, monter, nettoyer ou réparer ? – Quels types et quelle quantité ? | <ul style="list-style-type: none"> – Faut-il des matières et de l'énergie pour fonctionner ? – Quels types ? – Quelle quantité ? | <ul style="list-style-type: none"> – Faut-il des matières et de l'énergie en fin de vie ? – Quels types ? – Quelle quantité ? |
| Production de déchets | <ul style="list-style-type: none"> – Quels types de déchets sont-ils produits ? – Quelle quantité ? | <ul style="list-style-type: none"> – Quels types de déchets sont produits en fabrication ? – Quelle quantité ? | <ul style="list-style-type: none"> – Transport et distribution, quels types de déchets produits ? – Quelle quantité ? | <ul style="list-style-type: none"> – Installation, maintenance types de déchets produits ? – Quelle quantité ? | <ul style="list-style-type: none"> – Quels types de déchets sont produits pendant l'utilisation ? – Quelle quantité ? | <ul style="list-style-type: none"> – Quels types de déchets sont produits en fin de vie ? – Quelle quantité ? |
| Possibilité de valorisation, recyclage ou récupération | <ul style="list-style-type: none"> – Est-il possible de récupérer des matériaux et de l'énergie ? | <ul style="list-style-type: none"> – Est-il possible de valoriser les pièces des produits rejetés et de récupérer des matériaux et de l'énergie ? | <ul style="list-style-type: none"> – Est-il possible de valoriser ou recycler le conditionnement ou l'emballage ? | <ul style="list-style-type: none"> – L'entretien est-il facile ? – Peut-on valoriser des pièces ? – Peut-on récupérer des matériaux et de l'énergie ? | <ul style="list-style-type: none"> – Est-il possible de récupérer des matériaux et de l'énergie utilisés en cours d'usage ? | <ul style="list-style-type: none"> – Est-il facile à démonter ? – Peut-on valoriser des pièces ou des composants ? – Valorisation énergétique des déchets engendrés ? |
| Remarques : pour chaque phase du cycle de vie et chaque aspect environnemental, il faut identifier les matériaux et/ou processus d'un produit qui peuvent causer un impact significatif sur l'environnement. Les matériaux et/ou processus identifiés comme significatifs deviennent des paramètres environnementaux significatifs, mettant ainsi en évidence les phases du cycle de vie les plus significatives. | | | | | | |

IV – Processus d'éco-conception

Le processus général d'une étude d'éco-conception varie sensiblement selon les types de produits : (produits mécaniques (La NF E 01-005 propose une méthodologie ; voir paragraphe VI), produits électriques ou électroniques (voir la NF EN 62430), services, etc...) et les organismes le réalisant. Plusieurs voies menant au succès sont possibles. La **Fig. 8** propose une approche générale et les paragraphes suivants les grandes lignes extraites de la normalisation.

1. Analyse des exigences environnementales réglementaires et des parties prenantes

C'est la première étape à réaliser en liaison avec l'identification des aspects environnementaux (AE). Les exigences réglementaires et celles des parties prenantes fixent le cadre de base dans lequel le produit est développé. L'organisme doit assurer, selon ce qui approprié que :

a) Les exigences environnementales applicables dictées par les autorités réglementaires compétentes et les parties prenantes sont identifiées et couvrent : les fonctions concernées du produit ; les phases du cycle de vie concernées ; les aspects environnementaux concernés du produit ; la zone géographique du marché visé ; les activités concernées de l'organisme.

b) Les exigences actuelles et nouvelles sont à la fois revues régulièrement et identifiées.

c) Une analyse systématique de ces exigences est réalisée et documentée, identifiant les fonctions, les phases du cycle de vie affectées des produits, les activités associées et les responsabilités dans l'organisme et la (ou les) action(s) en résultant devant être prises.

d) Les exigences nouvelles ou modifiées qui apparaissent au cours de la phase de conception sont évaluées en ce qui concerne leur effet sur le produit et que les modifications nécessaires sont affectées.

Remarques : les étapes **a)** et **b)** planifient (voir aussi fig. 9), l'étape **c)** consiste à faire et l'étape **d)** à contrôler et agir. Ces étapes sont en partie détaillées tableau page 579.

2. Identification et évaluation des aspects environnementaux et des impacts correspondants

L'organisme doit établir une procédure de manière à identifier les aspects environnementaux et les impacts des produits correspondants. Cette procédure doit inclure les étapes suivantes :

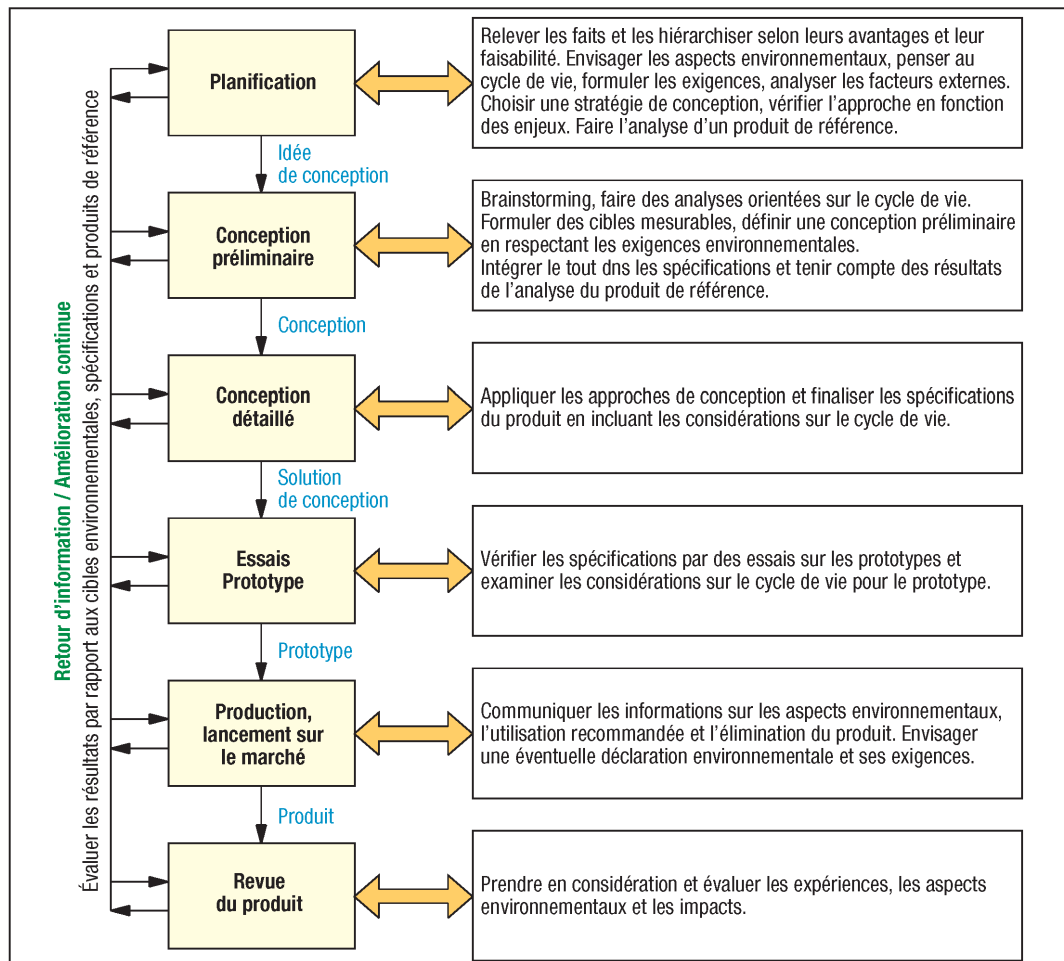
a) Identification des aspects environnementaux et des impacts correspondants

Pour chaque phase du cycle de vie, identifier les entrants comme les matières premières, l'énergie et les autres ressources utilisés ainsi que les sortants (le produit lui-même, produits semi-finis, rebuts, déchets, émissions...). Tous ont des impacts sur l'environnement. Si cela est réalisable l'approche quantitative est encouragée.

b) Évaluation des impacts environnementaux liés aux aspects environnementaux (AE) pertinents identifiés (tous les aspects ayant une influence suffisante...).

c) Détermination des aspects environnementaux significatifs

Une fois tous les AE identifier, ceux qui sont suffisamment significatifs sont évalués et hiérarchisés selon leur contribution à l'impact global sur l'environnement.



8. Prise en compte des aspects environnementaux dans le processus de conception et développement des produits.

3. Conception et développement

Faire le choix d'une solution de conception suite à un arbitrage entre les différents aspects environnementaux, réglementaires (santé, sécurité, c.e.m., etc.), la ou les fonctions du produit, les exigences techniques, la qualité, les performances, les risques commerciaux et les aspects économiques. Étapes à réaliser :

a) Spécification des fonctions du produit.

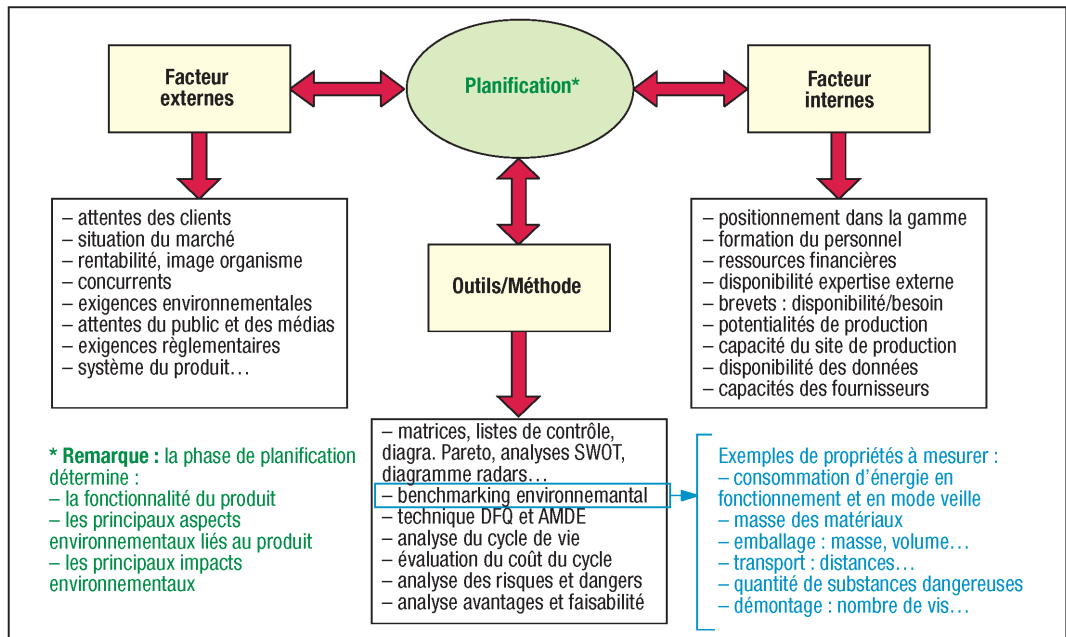
b) Définition des paramètres environnementaux significatifs à partir de l'analyse des exigences réglementaires et des parties prenantes et évaluation des aspects environnementaux.

c) Identification des stratégies d'amélioration environnementales applicables à ces paramètres.

d) Développement des cibles environnementales fondées sur des stratégies d'amélioration.

e) Développement d'une spécification de produit couvrant les cibles environnementales.

f) Développement de solutions techniques pour satisfaire aux cibles environnementales tout en prenant en compte d'autres considérations de conception.



9. Planification du processus d'éco-conception.

4. Revue et amélioration continue

Une procédure pour la revue et l'amélioration continue des aspects environnementaux significatifs des produits tout au long du cycle de vie doit être établie, mise en œuvre et maintenue. L'organisme doit conduire des revues de conception pour évaluer si la conception choisie pour le produit satisfait aux cibles définies dans la spécification lorsque qu'une phase de conception essentielle est terminée ou lorsque l'un des AE significatifs est affecté. Au besoin, des actions d'amélioration doivent être mises en œuvre.

5. Partage d'informations pour l'ECD

Dans le cadre du processus ECD, les organismes de la chaîne d'approvisionnement doivent tenir à disposition des informations concernant leurs produits et catégories de produits à l'intention des organismes impliqués dans la conception et le développement pour leur permettre d'atteindre les objectifs ECD.

Exemples d'informations à échanger : ressources utilisées dans le produit, processus de fabrication et nécessaires au fonctionnement du produit ; émissions générées par le produit ; lignes directrices pour l'amélioration ; traitement en fin de vie ; l'auto-déclaration indiquant la conformité aux exigences réglementaires et clients...

| Exemples de procédures usuelles pour le processus ECD (extraits NF EN 62430) | | | |
|--|--|--|--|
| Phase | Tâches générales | Questions essentielles | Outils usuels |
| 1 Planification du produit (Voir aussi fig. 9) | a) Identifier et lister les différents paramètres environnementaux associés à chaque phase du cycle de vie du produit. | Quels sont les impacts environnementaux significatifs au cours des phases pertinentes du cycle de vie du produit ? | |
| | a) Identifier les exigences réglementaires et celles du marché, les besoins des clients et des autres parties prenantes et les relier aux aspects environnementaux à obtenir tout au long du cycle de vie. | Qui sont les parties prenantes et qu'attendent-elles des attributs environnementaux des produits ? | Liste de contrôle ECD |
| | a) Essai de performance par rapport aux produits concurrents et aux produits précédemment réalisés. | Quelles sont les forces et les faiblesses de ces produits dans le domaine de l'environnement ? | Essais de performances ECD ; QFD environnemental |
| | b) Acquérir toutes les informations sur la chaîne logistique. | Quelles sont les informations nécessaires sur les phases pertinentes du cycle de vie ? | |
| | b) Identifier les aspects environnementaux et les paramètres pertinents significatifs : – Noter les aspects environnementaux ; significatifs pour chaque phase du cycle de vie. – Analyser et évaluer les impacts sur l'environnement, compiler les résultats. | Quelles sont les opportunités d'amélioration ? Comment transposer les besoins des clients, les résultats d'essais et d'analyse environnemental dans les tâches d'amélioration ? | État de l'art ECD QFD environnemental Outils d'analyse LCT |
| 2-a Conception de base (Identification des fonctions et des solutions pour le produit) | c) Établir des cibles environnementales (objectifs de performances) et les exigences pour le produit dans la spécification de conception. | Quelles doivent être les spécifications cibles pour remplir les objectifs environnementaux ? | |
| | c) Analyser les fonctions prévues du produit de façon à pouvoir, au besoin, les modifier pour atteindre les cibles environnementales du produit. | Quelles sont les fonctions essentielles du produit ? Quelles sont les nouvelles fonctions potentielles ? | |
| | c) Assembler les solutions pour obtenir chaque fonction exigée pour le produit envisagé. | Comment générer des variantes de concept du produit ? | |
| | c) Évaluer les variantes par rapport à des critères de type économique, technique, social et environnemental. Sélectionner et évaluer une solution modèle par rapport aux objectifs de performances environnementales. | Comment choisir la meilleure variante de concept ? Les objectifs de performances environnementales sont-ils satisfaits ? | QFD environnemental Liste de contrôle ECD Outils d'analyse LCT |
| 2-b Conception détaillée (Identification de la structure du produit, composants et matériaux) | c) Détailler et optimiser la conception du produit pour satisfaire aux exigences environnementales et aux exigences de performances. | | |
| | c) Optimiser la conception du produit en détail en prenant en compte différents processus de cycles de vie (comme conditionnement, transport). | | |
| 2-c Évaluation de la conception (S'assurer que le produit, satisfait aux spécifications environnementales et autres) | d) Conduire une analyse des impacts sur l'environnement sur l'ensemble du cycle de vie du produit. | Le produit satisfait-il à l'objectif de performance environnementale spécifié ? | Essais de performance ECD Liste de contrôle ECS, QFD environnemental Outils d'analyse LCT |

| Phase | | Tâches générales | Questions essentielles | Outils usuels |
|--|----|---|--|---------------|
| 2-c Évaluation de la conception (S'assurer que le produit, satisfait aux spécifications environnementales et autres) | d) | Évaluer et tester le prototype par rapport à des critères de type économique, technique, social et environnemental. | | |
| 3 Lancement de la production | d) | Préparer les informations sur le produit pour les parties prenantes pour couvrir l'ensemble du cycle de vie, y compris le traitement en fin de vie. | Quels sont les documents d'accompagnement et quelles instructions faut-il préparer ? Quelles données environnementales doivent être jointes ? | |
| | d) | Revue et vérification des résultats et prise en compte des réactions et avis si nécessaire. | La cible environnementale du produit a-t-elle été atteinte ? | |
| * Les lettres a-b-c-d font références aux mêmes lettres du paragraphe IV-1. | | | | |

V - Étiquetage environnemental

Il permet d'identifier visuellement et rapidement une démarche d'éco-conception ou un produit conçu avec cette démarche. Il y a trois familles principales d'étiquetages environnementales : les écolabels officiels (ou étiquetages de type I), les autodéclarations (ou étiquetages de type II) et les étiquetages de type III ou « éco-profil ».

1. Principes généraux - NF EN ISO 14020

Par principe, les étiquettes et déclarations environnementales donnent des informations vérifiables, exactes et qui ne soient pas de nature à induire en erreur, concernant un produit ou un service par rapport à son profil environnemental global, ou sur un aspect environnemental particulier ou encore sur plusieurs aspects.

Les utilisateurs, acheteurs et autres peuvent utiliser ces informations pour choisir les produits ou les services qu'ils souhaitent sur la base de facteurs environnementaux.

Étiquette environnementale, déclaration environnementale (définition) : revendication indiquant les aspects environnementaux d'un produit ou d'un service.

Remarque : une étiquette peut se présenter sous la forme d'une déclaration, d'un symbole ou d'un graphique sur le produit ou sur l'emballage, dans une documentation, un bulletin technique ou encore une publicité.

| Principes généraux (règles) devant être appliqués aux étiquettes et déclarations NF EN ISO 14020 | |
|--|--|
| Principes | Énoncé des principes |
| Principe n° 1 | Les étiquettes doivent être exactes, vérifiables pertinentes et ne pas induire en erreur. |
| Principe n° 2 | Elles ne doivent pas être préparées, adaptées et mises en œuvre avec pour objectif ou conséquence la création d'obstacles inutiles aux échanges internationaux. |
| Principe n° 3 | Elles doivent reposer sur une méthodologie scientifique suffisamment détaillée et exhaustive pour corroborer l'assertion et dont les résultats sont exacts et reproductibles. |
| Principe n° 4 | Les informations relatives à la procédure, à la méthodologie et à tous les critères utilisés pour corroborer les étiquettes doivent être disponibles et pouvoir être fournies sur demande. |
| Principe n° 5 | Le développement des étiquettes doit prendre en compte tous les aspects pertinents du cycle de vie du produit. |
| Principe n° 6 | Les étiquettes ne doivent pas décourager les innovations permettant de maintenir la performance environnementale ou celles qui permettent de l'améliorer. |
| Principe n° 7 | Toutes les exigences administratives ou toutes les demandes d'informations concernant les étiquettes doivent se limiter à celles nécessaires à l'établissement de la conformité avec les normes et critères applicables aux étiquetages et déclarations. |
| Principe n° 8 | Il convient que le processus de développement des étiquettes comprenne une consultation participative et ouverte des parties intéressées. Il convient que des efforts raisonnables soient mis en œuvre pour obtenir le consensus au cours du processus. |
| Principe n° 9 | Les informations portant sur les aspects environnementaux des produits et services d'une étiquette ou d'une déclaration environnementale doivent être mises à la disposition des acheteurs existants ou potentiels par l'auteur de l'étiquette. |

2. L'autodéclaration ou la déclaration de type II - NF EN ISO 14021

Les autodéclarations environnementales ou étiquetage de type II sont des déclarations environnementales effectuées sans certification par un organisme tiers indépendant. Ces déclarations, ou arguments environnementaux déclarés, pour un produit ou un service sont effectuées sous la seule responsabilité des entreprises, fabricants, importateurs, distributeurs, détaillants ou toute autre entité susceptible de tirer profit de ces déclarations.

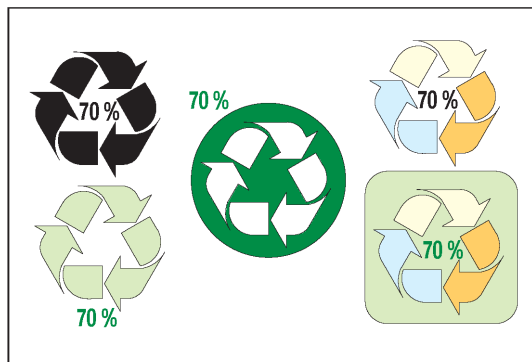
Principe : avant d'effectuer toute déclaration, des mesures d'évaluation doivent être mises en œuvre (selon les normes internationales reconnues et acceptées) par l'organisme pour obtenir des résultats fiables et reproductibles nécessaires à la vérification de la dite déclaration. Les principes généraux énoncés au paragraphe 1 s'appliquent ici.

La norme (NF EN ISO 14021) fournit et sélectionne une terminologie précise (voir tableau), largement connue et acceptée, à utiliser pour les étiquetages ou déclarations. Chaque terme y est défini avec précision ainsi que ses conditions d'utilisation et éventuellement une méthodologie d'évaluation.

| Les 17 termes définis par l'ISO 14021 à utiliser préférentiellement dans les autodéclarations environnementales de type II | |
|--|---|
| Terme | Définition-utilisation du terme |
| Compostable | Caractéristique d'un produit, emballage ou composant associé qui permet sa dégradation biologique générant ainsi une substance relativement homogène et stable de type humus. |
| Dégradable | Caractéristique d'un produit ou d'un emballage qui lui permet de se décomposer dans des conditions particulières jusqu'à un certain point dans un temps donné. |
| Conçu pour être désassemblé | Caractéristique de conception qui permet au produit d'être désassemblé à la fin de sa durée de vie, de façon que des composants et des pièces puissent être réutilisés, recyclés, récupérés en vue d'une valorisation énergétique, ou de manière générale, détournés du flux de déchets. |
| Allongement de la durée de vie | Produit conçu pour une utilisation prolongée, sur la base d'une durabilité améliorée ou bien d'une caractéristique d'aptitude à l'évolution qui entraîne une utilisation réduite de ressources ou la réduction des déchets générés. |
| Énergie récupérée | Caractéristique d'un produit fabriqué en utilisant de l'énergie récupérée d'un matériau ou de l'énergie qui aurait été perdue, mais qui au contraire a été collectée par des processus volontaires. |
| Recyclable | Caractéristique d'un produit, emballage ou composant associé qui peut être prélevé sur le flux des déchets par des processus et des programmes disponibles, et qui peuvent être collectés, traités et remis en usage sous la forme de matières premières ou de produits. |
| Contenu recyclé | Proportion en masse de matériau recyclé dans un produit ou un emballage. Seuls les matériaux « pré-consommateur » et post-consommateur » (voir définitions suivantes) doivent être considérés comme des matériaux recyclés. Voir aussi boucle de Möbius (fig. 10). |
| Matériau pré-consommateur | Matériau détourné du flux des déchets pendant le processus de fabrication. En est exclue la réutilisation de matériaux tels que ceux issus du retraitement, rebroyage et les résidus générés par un processus et pouvant être récupérés par le même processus que celui qui les a générés. |
| Matériau post-consommateur | Matériau généré par les ménages ou par les installations commerciales, industrielles ou institutionnelles dans leur rôle d'utilisateur final du produit, et qui ne peut plus servir à l'usage pour lequel il a été conçu. Ceci comprend les retours de matériaux de la chaîne de fabrication. |
| Matériau recyclé | Matériau qui fait l'objet d'une nouvelle mise en œuvre à partir d'un matériau récupéré (pour valorisation) au moyen d'un processus de fabrication et transformé en produit fini ou en composant pour être intégré à un produit. Voir aussi boucle de Möbius (fig. 10). |
| Matériau récupéré | Matériau qui, autrement, aurait été éliminé comme déchet ou utilisé pour la valorisation énergétique, mais qui a été collecté et récupéré (pour valorisation) comme matériau d'apport, à la place d'une nouvelle matière première, dans un processus de recyclage ou de fabrication. |
| Consommation réduite d'énergie | Réduction de la consommation d'énergie associée à l'utilisation d'un produit assurant la fonction pour laquelle il a été conçu comparativement à l'énergie utilisée par les autres produits assurant une fonction équivalente. |
| Utilisation réduite des ressources | Réduction (en %) de la quantité de matière, d'énergie ou d'eau utilisée pour produire ou distribuer un produit, un emballage ou un composant associé spécifié comparativement aux autres produits (précédents, concurrents...) assurant une fonction équivalente. |
| Consommation réduite d'eau | Réduction de la quantité d'eau associée à l'utilisation (uniquement) d'un produit assurant la fonction pour laquelle il a été conçu par comparaison à la quantité d'eau utilisée par les autres produits assurant une fonction équivalente. |
| Réutilisable | Caractéristique d'un bien ou d'un emballage qui a été conçu et pensé pour accomplir, pendant son cycle de vie, un certain nombre de trajets, de rotations ou d'utilisations pour la même tâche pour laquelle il a été conçu. |
| Rechargeable | Caractéristique d'un bien ou d'un emballage qui peut être rempli avec le même produit, ou un produit similaire, plusieurs fois, dans sa forme d'origine et sans traitement supplémentaire, à l'exception des exigences spécifiées telles que le nettoyage ou le lavage. |
| Réduction des déchets | Réduction de la quantité de matière (masse) entrant dans le flux des déchets en raison d'une modification d'un produit, du procédé ou de l'emballage. |

Remarques : les déclarations peuvent être comparatives et évaluées par rapport à un procédé ou un produit précédent, à un autre procédé ou un autre produit ; impliquer des aspects environnementaux du cycle de vie du produit ; être fondées sur des pourcentages, etc.

Objectifs de la norme : harmoniser l'utilisation des termes pour éviter les confusions et mauvaises interprétations, améliorer l'information et stimuler les améliorations relatives à l'environnement.



10. Exemples de boucles de Möbius pour déclaration de contenu recyclé (ici 70 % du contenu recyclé).

3. Étiquetage environnemental de type I - NF EN ISO 14024

Ce sont les écolabels officiels (attribués sous la responsabilité des pouvoirs publics) pour lesquels les produits labellisés font l'objet d'une certification par un organisme tiers qui garantit la qualité d'usage et les caractéristiques environnementales (et ceci suite à la réalisation d'une étude exhaustive sur les impacts environnementaux des produits et la tenue de réunions avec les différentes parties prenantes). Il y a près de 30 écolabels officiels au niveau international.

a) Définitions normalisées complémentaires

| Termes | Définitions |
|--|---|
| Programme de label environnemental de type I | Programme volontaire, basé sur de multiples critères et engageant une tierce partie, consistant à attribuer une licence qui autorise l'utilisation de labels environnementaux sur les produits, indiquant qu'un produit particulier est préférable pour l'environnement, dans le cadre d'une catégorie de produits donnée (groupe de produits ayant une fonction équivalente) et en fonction de considérations ayant trait au cycle de vie. |
| Organisme de délivrance de l'écolabel | Tierce partie (sur le sujet en question personne ou organisme indépendant des parties en cause : fournisseur, acheteur...), et ses agents, qui conduisent un programme de label environnemental de type I. |
| Certification | Procédure par laquelle une tierce partie donne une assurance écrite qu'un produit, un processus ou un service est conforme aux exigences spécifiées. |
| Licence (pour le label environnemental de type I) | Document délivré conformément aux règles d'un système de certification par lequel un organisme de délivrance de l'écolabel accorde à une personne ou un organisme le droit d'utiliser un label environnemental de type I pour ses produits ou services conformément aux règles du programme de label environnemental. |

b) Objectifs, principes et méthodes du label de type I

Le label environnemental de type I suit les principes généraux énoncés au paragraphe 1. Les autres principes concernent la nature volontaire du programme, la relation avec la législation, la prise en compte du cycle de vie et la sélectivité (seuls les produits préférables pour l'environnement sont éligibles).

| Méthode ou processus d'obtention d'un label environnemental de type I | | |
|---|--|--|
| N° | Étape | Observations |
| 1 | Consultation des parties intéressées | Elle est mise en place par l'organisme de délivrance de l'écolabel. La consultation est un processus continu s'étendant aux étapes suivantes. |
| 2 | Choix des catégories de produit (ou groupe de produits ayant une fonction équivalente) | Il faut réaliser une étude de faisabilité afin de préciser quelles sont les catégories de produits susceptibles d'être adoptés par le marché. |
| 3 | L'établissement, la révision et la modification des critères environnementaux du produit | Choisir les critères environnementaux à partir des étapes du cycle de vie et en utilisant les principaux indicateurs environnementaux issus des analyses successives (ACV, IVC, ACVI...). |
| 4 | L'identification des caractéristiques fonctionnelles du produit | Identifier les caractéristiques fonctionnelles du produit ; choisir les éléments clés de la performance caractérisant la fonction ; vérifier que ces éléments clés sont applicables à tous les produits de la catégorie ; identifier les niveaux de performance nécessaires. |
| 5 | L'établissement des méthodes de certification et divers éléments administratifs du programme | Diffuser les résultats précédents (critères, caractéristiques...) ; établir les modalités de modification des critères environnementaux (date, importance, complexité...) |

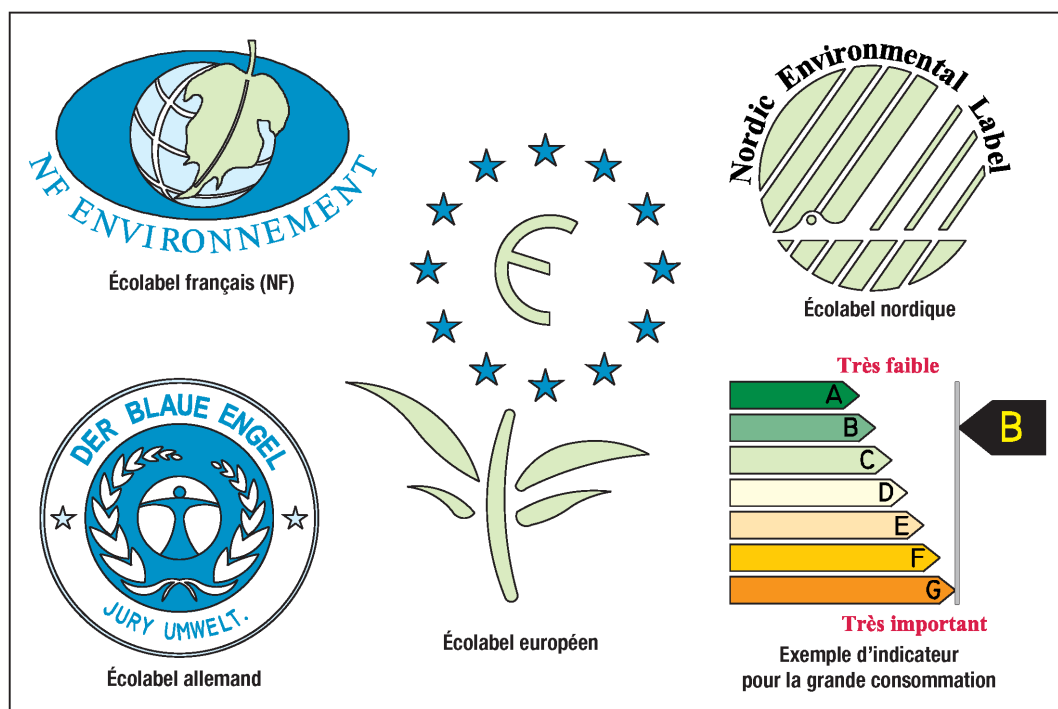
c) Certification

L'organisme de délivrance de l'écolabel est responsable de l'attribution des licences aux demandeurs. La licence n'est accordée que si le demandeur est en conformité avec les règles générales du programme et si le produit est conforme à la fois aux critères environnementaux et aux caractéristiques fonctionnelles du produit applicables à sa catégorie de produits.

Remarque : la certification par un écolabel est la marque ou un signe officiel de reconnaissance garantissant les avantages environnementaux ou la qualité environnementale d'un produit. Les écolabels font l'objet d'un contrôle et satisfont à un cahier des charges.

Exemples d'écolabels : la marque « NF ENVIRONNEMENT » avec son logo (fig. 11) est l'écolabel français, propriété de AFNOR qui en assure la gestion et la promotion.

L'écolabel européen (fig. 11) est le label écologique propre à tous les membres de l'union européenne. Il donne lieu, pour chaque catégorie de produits labellisés, à l'élaboration d'un cahier des charges. En France, les demandes de labellisation sont adressées à AFNOR.



11. Exemples usuels d'écolabels et d'indicateur pour les produits de grande consommation.

4. Déclarations environnementales de type III - NF EN ISO 14025

Ce sont essentiellement des déclarations de type « éco-profil » dont le but est de traduire partiellement des résultats d'une analyse de cycle de vie (ACV). Il s'agit d'informations standardisées permettant de comparer des produits entre eux.

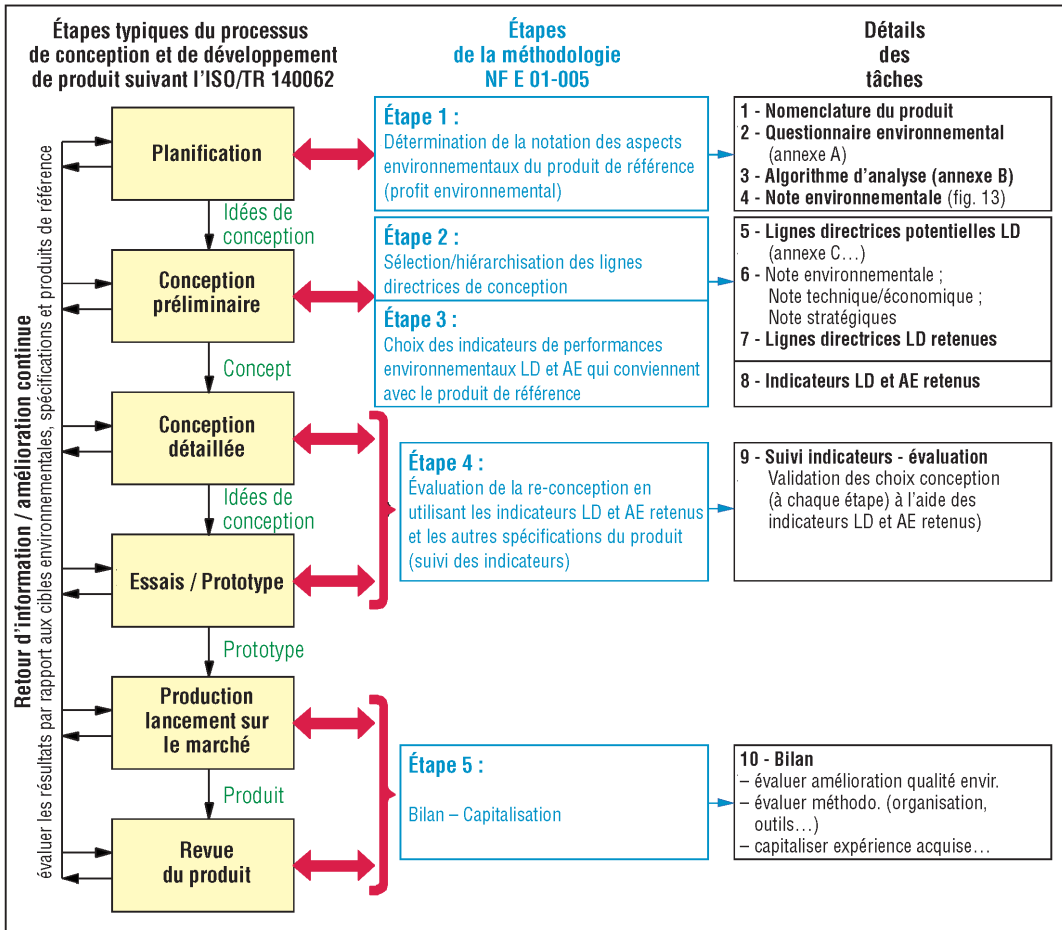
Plus précisément, les déclarations de type III présentent ou fournissent des informations environnementales quantifiées (paramètres prédéterminés ou données chiffrées) sur le cycle de vie d'un produit (étapes...) avec des données additionnelles relatives aux aspects environnementaux des produits dans le but de permettre des comparaisons de produits remplissant la même fonction.

Remarque : les déclarations de type III (sous forme de déclaration environnementale de produit...) sont principalement destinées à un usage interentreprises, mais leur utilisations pour la communication avec des particuliers n'est pas exclue.

VI - Méthodologie d'éco-conception

La méthodologie, extrait de la NF E 01-005, propose une démarche globale de réduction des impacts environnementaux lors de la conception des produits. Elle est bien adaptée aux produits mécaniques (et aux PME). Par rapport au processus général (du V), c'est une méthode simplifiée dans la mesure où elle permet d'améliorer les performances environnementales sans faire une analyse complète du cycle de vie (ACV ; comme dans l'ISO 14040).

1. Méthodologie : étapes



12. Méthodologie d'éco-conception : description et principales étapes du processus.

a) Étape 1 : détermination du profil environnemental du produit à (re)concevoir.

L'étape permet d'établir la notation (7 notes entre 0 et 4) des sept principaux aspects environnementaux (AE) d'un produit. Puis, en fonction de l'importance relative de leur impact l'environnemental, de les hiérarchiser afin d'en établir un profil environnemental (fig.13). Bien adaptée à la re-conception, la méthode s'applique aussi à une nouvelle conception sous réserve de bien formaliser les hypothèses nécessaires à la réalisation du projet.

| | | | |
|--|-----------------------------------|------------------------|------------------------|
| Les 7 aspects environnementaux | MP : matières premières | F : fabrication | U : utilisation |
| FV ou FV-R : recyclabilité en fin de vie | S : substances dangereuses | T : transport | Emb : emballage |

Mode opératoire : décrire le produit et les limites du projet (référence produit, description, caractéristiques, marchés visés, attentes environnementales...). Établir une nomenclature du produit (y compris revêtement et peinture) et de son emballage.

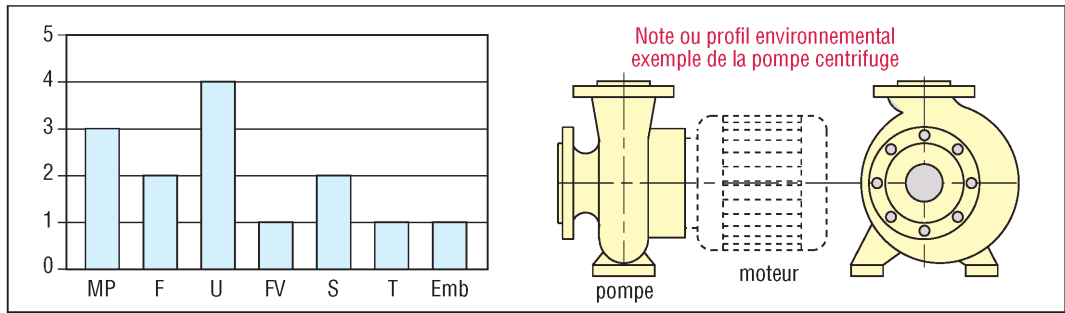
Utiliser et remplir le questionnaire environnemental de l'annexe A (§ 2 ; tableaux 1 et 2) ; répondre à toutes les questions. À partir des réponses fournies, utiliser et appliquer les cinq

arbres de décision ou algorithme de l'annexe B (§ 3). Enregistrer les résultats obtenus pour chacun des 7 aspects environnementaux, les classer pour obtenir le profil env. du produit.

| Description du produit (exemple d'une pompe centrifuge mono-étagée) | |
|---|---|
| 1 | Nom du produit : Pompe centrifuge XXX de type YY |
| 2 | Débit au meilleur rendement : 30 m ³ /h |
| 3 | Hauteur énergétique au meilleur rendement : 30 m |
| 4 | Consommation énergétique annuelle totale : 8 631 kWh/an |
| 5 | Poids total 43 750 g |
| 6 | Temps de fonctionnement : 2 250 h/an |
| 7 | Rendement au point de consigne : 60 % |
| 8 | Type de marché : industriel, pompage de l'eau en secteur industriel ou agricole |
| 9 | Attentes connues de ces marchés : empreinte carbone du produit, respect réglementation (ErP, ...) |

| Exemple de nomenclature pour éco-conception (produit+emballage) | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|---------------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|------------|---------------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------|
| 1 - Produit (exemple de la pompe centrifuge mono-étagée) | | | | | | | | | | |
| Pièce | Nombre de composants par pièce | Nombre de pièces par produit <i>N</i> | Nombre total de pièces <i>N.n</i> | Masse unitaire <i>M</i> (kg) | Masse totale <i>N.m</i> (kg) | Matériau | Taux de recyclabilité <i>Tr</i> | Masse (kg) matériau recyclable <i>N.m.Tr</i> | Substance dangereuse identifiée | Nom et adresse du fournisseur |
| Roue | 1 | 1 | 1 | 12 | 123 | fonte | 1 | 12 | | |
| Corps | 1 | 1 | 1 | 55 | 55 | fonte | 1 | 55 | | |
| Adaptateur | 1 | 1 | 1 | 97 | 97 | fonte | 1 | 97 | | |
| Arbre | 1 | 1 | 1 | 8 | 8 | inox | 1 | 8 | | |
| Paliers | 4 | 3 | 12 | 1 | 3 | inox | 1 | 3 | | XX Europe |
| Joints | 10 | 1 | 10 | 0,2 | 0,2 | Élast/carb | 0 | 0 | | YY Europe |
| Fixations | 3 | 1 | 3 | 0,6 | 0,6 | Acier all | 1 | 0,6 | | ZZ Europe |
| Peinture | 1 | 1 | 1 | 0,1 | 0,1 | Revêt. | 0 | 0 | Plomb | |
| Notice | 1 | 1 | 1 | 0,1 | 0,1 | papier | 1 | 0,1 | | |
| Total | | | ∑ N.n = 31 | | | | | | | |
| Masse totale du produit <i>Mtot</i> (kg) = 181 | | | Masse identifiée du produit (kg). ∑ N.n = 176 | | | | | | | |
| % masse identifiée du produit (kg) = 97,2 % | | | Taux recyclabilité du produit identifié : <i>Tr</i> = 175,7/181 = 97 % | | | | | | | |
| 2 - Emballage (de la pompe) | | | | | | | | | | |
| Pièce | Nombre de composants par pièce | Nombre de pièces par produit <i>N</i> | Nombre total de pièces <i>N.n</i> | Masse unitaire <i>M</i> (kg) | Masse totale <i>N.m</i> (kg) | Matériau | Taux de recyclabilité <i>Tr</i> | Masse (kg) matériau recyclable <i>N.m.Tr</i> | Substance dangereuse identifiée | Nom et adresse du fournisseur |
| Enveloppe | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | PEBD | 0 | 0 | | |
| Palette | 1 | 1 | 1 | 1 | 7 | Carton | 1 | 7 | | XY Europe |

| Exemple de la pompe: résultats obtenus à partir de l'annexe A et de l'algorithme de l'annexe B | | | | | | | | | | |
|--|--|--|---------------|----------------|---|-----------|----------|----------|----------------|--|
| Arbre décision | Réponses aux questions <i>Q_i</i> | | Résultats | Arbre décision | Réponses aux questions <i>Q_i</i> | | | | Résultats | |
| MP F FV | QB2 : oui à consomme de l'énergie | | F = 2 | T | QB8 : oui à usage fréquent QB7 : durée 8 ≥ 5 ans QB1 : 1 à 100 pièces | | | | T = 1 | |
| | QB8 : oui à usage fréquent QB7 : durée de vie ≥ 5 ans QB8 : oui à usage fréquent | | MP = 3 | | | | | | | |
| | QB9 : taux de recyclabilité <i>Tr</i> 90 % | | FV = 1 | S | QB11a : oui pour contient des métaux lourds (Pb...) | | | | S = 3 | |
| U | QB8 : usage fréquent QB2 : oui à consommation énergie | | U = 4 | Emb | QB13 : oui à emballage final QB8 : produit à usage fréquent QB14 : emb recyclable en partie | | | | Emb = 2 | |
| résumé | Aspect environnemental (AE) | | MP | F | U | FV | S | T | Emb | |
| | Note environnementale | | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 1 | 2 | |



13. Note environnementale ou profil environnemental d'un produit obtenu en fin d'étape 1 de la méthodologie.

b) Étape 2 : sélection/hiérarchisation des lignes directrices (LD) de conception

Objectif : pour chacun des 7 aspects environnementaux (AE) obtenus étape 1, proposer des lignes directrices (LD) pertinentes permettant l'amélioration environnementale du produit. Les LD retenues devront ensuite être hiérarchisées en tenant compte des autres contraintes du projet : techniques, économiques, stratégiques...

Mode opératoire : à partir de l'annexe C (tableau C, § 4), sélectionner les lignes directrices (LD) les plus significatives par rapport au profil environnemental obtenu tout en les adaptant au produit. Les noter et les classer (à partir de notes environnement, technique/éco. et stratégique), puis choisir les (LD) à retenir (« notes les plus élevées »...) :

| Exemple de tableau récapitulatif type pour sélectionner et hiérarchiser les lignes directrices | | | | | | | | |
|--|---------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------|------------------|--------------------------------|---------|---------|
| AE | Ligne directrice LD | Note * environnementale | Note ** technique/économique | Note *** stratégique | Note **** finale | Ligne directrice retenue ***** | Étape 3 | Étape 4 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

* Note environnementale 0 à 4 (note issue du profil issu de l'étape 1).
 ** Note technique/économique de 0 à 4 : 0 si non faisabilité techniq. et non compatibilité avec cahier des charges ; 1 si pas de conflit technique mais contraintes lourdes en investissement ; 2 si piste envisageable mais exigeant des études préalables en R&D ; 3 si solution technique déjà existante, faisabilité à tester mais coût non négligeable ; 4 si solution rapide à coût acceptable, ou déjà mise en œuvre ou encore prioritaire.
 *** Note stratégique de 1 à 3 : 1 si solution en conflit avec d'autres priorités ; 2 si solution neutre mais intéressante en terme d'image ; 3 si solution ayant un intérêt stratégique prioritaire (réglementation, demandes clients...)
 **** Note finale obtenue par exemple en multipliant les trois notes précédentes (des coefficients sont possibles)
 ***** Répondre par oui non ; un nombre final de 3 ou 4 LD retenues peut être considéré comme raisonnable.

Remarque : cette étape est une phase clé de la méthodologie, car elle implique des choix déterminants pour toute la conception.

c) Étape 3 : choix des indicateurs AE et LD de performance environnementale

À chaque ligne directrice retenue étape 2 doit être associé un indicateur qualitatif ou quantitatif, appelé « indicateur de LD » qui permettra de suivre en phase conception les différents scénarii possibles. L'indicateur peut être associé à un objectif chiffré.

L'indicateur AE retenu (annexe C, tableau C2) pour chaque aspect environnemental privilégié, peuvent être, ou non, un seul ou une combinaison de plusieurs indicateurs LD.

| Exemple type de tableau utilisé pour choisir les indicateurs LD et AE appropriés en relation avec le produit de référence | | | | | | |
|---|---------|------------------------------|---------------------|--------------------|--|---------|
| AE | Étape 2 | Étape 3 | | | | Étape 4 |
| | | Type d'indicateur (LD ou AE) | Nom de l'indicateur | Méthodes associées | Valeur de l'indicateur du produit de référence | |
| U | | LD | Masse produit | pesage | 22 kg | |
| | | | | | | |

d) Étape 4 : suivi des indicateurs et évaluation de la re-conception réalisée

Évaluer les choix de conception à l'aide des « indicateurs LD et AE » retenus étape 3 afin de confirmer les orientations choisies, identifier des problèmes éventuels et proposer les actions nécessaires. À chaque étape de la conception, vérifier la pertinence des voies de solutions choisies en utilisant les indicateurs retenus et en tenant compte des autres spécifications du produit. Pour chaque voie validée enregistrer la valeur des indicateurs.

| Exemple de la pompe centrifuge mono-étagée : LD, indicateurs sélectionnés et ceux retenus | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-------------|------------|-------------|-------------|------------|---------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------|------------------|-----------|
| Étape 2 | | | | | | | Étape 3 | | | | Étape 4 | |
| AE | LD sélectionnée | Note envir. | Note tech. | Note strat. | Note finale | LD retenue | Type indicat. | Nom indicateur | Méthodes associées | Valeur indicateur | | Observat. |
| | | | | | | | | | | avant re-concep. | après re-concep. | |
| U | Améliorer rendement énergétique | 4 | 2 | 2 | 24 | oui | LD/AE | Index efficacité énergét. mini. | Norme réglementaire | À mesurer | À mesurer | |
| U | Favoriser le bon usage du produit | 4 | 3 | 3 | 36 | oui | LD | Nombre d'instructions | Notice utilisation | À mesurer | À mesurer | |
| U | Améliorer durabilité et fiabilité | 4 | 2 | 2 | 16 | oui | | | | | | |
| MP | Réduire la masse | 3 | 2 | 3 | 18 | oui | LD | Masse produit | Mesure de la masse | 181 kg | À mesurer | |
| MP | Matériau avec moins de CO ₂ et énergétiq | 3 | 2 | 2 | 12 | non | | | | | | |
| MP | | | | | | | AE | Contenu carb. et énergé matériaux | Base de données Eco-invent | À calculer | À calculer | |
| F | Réduire consommat. énergie par produit | 2 | 2 | 2 | 8 | non | | | | | | |
| F | Optimiser fabricat. par concept. modulaire | 2 | 2 | 3 | 12 | non | | | | | | |
| F | | | | | | | AE | Conso. énergét. en production | Mesure en entreprise | À mesurer | À mesurer | |
| S | Éliminer/remplacer subst. dangereuses | 3 | 2 | 3 | 18 | oui | LD | Peinture sans plomb | Notice tech peinture | Peint avec Pb | À enregist. | |
| S | | | | | | | AE | Ident. Subst dang. matériaux | Questionnaire environn. | Présence Pb | À enregist. | |
| T | Modes de transport moins polluants | 1 | 3 | 1 | 3 | non | | | | | | |
| T | Réduire masse du produit | 1 | 2 | 2 | 4 | non | | | | | | |
| T | | | | | | | AE | Produit + masse emb. | Mesure de la masse | 189 kg | À mesurer | |
| FV | Faciliter desassembl. | 1 | 2 | 3 | 6 | non | | | | | | |
| FV | Réutilisat. pièces | 1 | 3 | 1 | 3 | non | | | | | | |
| FV | | | | | | | AE | Taux recyclab. | nomenclature | 97 % | calculer | |
| Emb | Emball. réutilisable | 2 | 2 | 3 | 12 | non | | | | | | |
| Emb | | | | | | | AE | % mat biodégrad | Masses comp | 87,5 % | mesurer | |

e) Étape 5 : bilan – capitalisation

Évaluer les résultats des étapes 1 à 4 en prenant en compte l'amélioration de la qualité environnementale du produit avant et après re-conception (respect des indicateurs, objectifs chiffrés ou tendances avant et après, non dégradation des AE...). Évaluer aussi la mise en œuvre de la méthodologie (organisation, outils...). Capitaliser enfin l'expérience acquise : connaissances, possibilité d'application à d'autres produits, etc.

| Exemple type de documentation des indicateurs LD et AE avant et après re-conception | | | | | | | |
|---|-----------------------------------|---------------------------|---------------------|--|---------------------------|---------------------|--------------------------------|
| AE | Indicateur LD de ligne directrice | Valeur de l'indicateur LD | | Indicateur AE | Valeur de l'indicateur LD | | Méthode de calcul ou de mesure |
| | | avant re-conception | avant re-conception | | avant re-conception | après re-conception | |
| MP | Masse (kg) | 105 | 98 | Impact CO ₂ des matériaux du produit (kg/CO ₂ éq.) | 208 | 257 | Méthode interne XXX |

Remarque complémentaire : les résultats de chaque étape de conception doivent être formalisés par des documents validés par l'équipe de projet (revue de projet). Un exemple de modèle de présentation est donné à la suite.

| Exemple de modèle de cahier des charges d'éco-conception | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------|----------|-------------|------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|---------------|-----------------------------|----------|--------------|
| AE | LD | Notation | prioritaire | indicateur suivi | indicateur référentiel | fonction pilote | Outils associés | Valeur indicateur suivi | | Valeur indicat. référentiel | | Observations |
| MP | Réduire masse du produit | 28 | X | Masse (kg) | Impact Environnemental | Concepteur | Nomenclature | avant recon 10 | après recon 8 | avant 52 | après 41 | |
| | | | | | | | | | | | | |

2. Annexe A - Questionnaire environnement

À compléter éventuellement pour les besoins de la conception. Répondre à toutes les questions, la réponse « je ne sais pas » étant considéré comme le cas le plus défavorable.

| Annexe A – tableau 1-Questionnaire environnement (NF E 01-005) | | | |
|---|--|---|--|
| A1 Réglementation européenne | | | |
| Question | Réponse | Question | Réponse |
| Le produit est-il soumis à la directive 2012/19/CE sur les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEE) ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non | Le produit est-il soumis à la directive 2009/125/CE sur l'éco-conception des produits liés à l'énergie... | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non |
| Le produit est-il soumis à la directive 2011/65/CE sur la limitation des substances dangereuses ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non | En tant que produit emballé, le produit est-il soumis à la directive 2004/12/CE sur les emballages ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non |
| Le produit est-il soumis à la directive 2000/53/CE sur les véhicules hors d'usage (VHU) ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non | Le produit est-il soumis à une autre réglementation portant sur un ou plusieurs aspects environnementaux ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non |
| A2 Analyse environnementale | | | |
| A2.1 Matières premières (hors emballage) (MP) | | A2.2 Fabrication (hors emballage) (F) | |
| QB1) Combien le produit contient-il de pièces ? | <input type="checkbox"/> ≤ 100 <input type="checkbox"/> > à 100 | QC3) Le produit contient-il des matériaux renouvelables ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non |
| QC1) Le produit contient-il des matériaux rares ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> Zinc <input type="checkbox"/> Cuivre <input type="checkbox"/> Nickel <input type="checkbox"/> Plomb <input type="checkbox"/> Argent <input type="checkbox"/> Étain <input type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/> non | QC4) Sur l'ensemble des opérations de fabrication du produit et de ses composants, le plus grand nombre d'opérations présentant un risque pour l'environnement se situe-t-il plutôt ? | <input type="checkbox"/> chez les sous-traitants et fournisseurs <input type="checkbox"/> sur site de fabrication interne |
| QC2) En dehors des métaux votre produit contient-il des matériaux recyclés ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/> ne sait pas | QC5) Le processus de fabrication utilise-t-il des substances candidates à autorisation ? | <input type="checkbox"/> oui – préciser <input type="checkbox"/> non |
| A2.3 Utilisation (U) | | | |
| Question | Réponse | Question | Réponse |
| QB2) Le produit consomme-t-il de l'énergie durant sa phase utilisation ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non | QC6) Si oui (QB2), quel type d'énergie (source d'énergie directe du produit) ? * (produits pétroliers, gaz, etc.) | <input type="checkbox"/> Électricité <input type="checkbox"/> Énergie Primaire * <input type="checkbox"/> source alternative <input type="checkbox"/> renouvelable <input type="checkbox"/> procédé récup. <input type="checkbox"/> autre |
| QB3) Le produit est-il destiné à être intégré dans un ensemble plus grand ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non | QB4) Si oui (QB3) peut-il modifier l'efficacité du fonctionnement normal de cet ensemble (durée de vie, rendement, etc.) ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non |
| QB5) Si le produit est intégré dans un ensemble comment est sa durée de vie par rapport à cet ensemble ? | <input type="checkbox"/> durée > <input type="checkbox"/> durée ↔ <input type="checkbox"/> durée < | QB6) Le produit fonctionne-t-il avec des consommables ou sert-il à appliquer un autre produit ou a-t-il besoin d'un entretien régulier avec des produits spécifiques ? | <input type="checkbox"/> oui – préciser <input type="checkbox"/> non |
| QC7) Si oui à la question QB6, l'utilisation de consommable ou autre produit occasionnelle : | QC7a) des déchets <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> dangereux <input type="checkbox"/> non dangereux <input type="checkbox"/> non | QC7b) des émissions ou des fuites (air, eau, sol...) <input type="checkbox"/> oui : établir une liste des émissions, identifier celles qui présentent un risque pour l'environnement | <input type="checkbox"/> sol <input type="checkbox"/> métaux lourds** <input type="checkbox"/> hydrocarbures <input type="checkbox"/> substances halogénées <input type="checkbox"/> autres |
| –*eau : Ag, Al, As, Cd, Cu, Fe, Cr6, Cr3, Hg, Ni, Pb, Sn, Zn. –**sol : As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn. | | <input type="checkbox"/> air <input type="checkbox"/> gaz à effet de serre CO ₂ , <input type="checkbox"/> oxydes soufre SOx <input type="checkbox"/> oxydes azote NOx <input type="checkbox"/> COV (directive 1999/13EC) <input type="checkbox"/> monoxyde de carbone CO <input type="checkbox"/> particules <input type="checkbox"/> autres | <input type="checkbox"/> eau <input type="checkbox"/> métaux lourds* <input type="checkbox"/> hydrocarbures <input type="checkbox"/> nitrates <input type="checkbox"/> phosphates <input type="checkbox"/> composés azotés <input type="checkbox"/> PCB Poly-Chloro-Biphényles <input type="checkbox"/> autres |
| | | <input type="checkbox"/> non pas d'émission ou de fuite | <input type="checkbox"/> autre que air, eau et sol |

Suite tableau : page 589.

| Questions | Réponses | Questions | Réponses |
|---|--|--|--|
| QC8) pendant sa durée de vie, le produit requiert-il de la maintenance préventive en fonctionnement normal ? | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non | QB7) Quelle est la durée de vie de votre produit ? Préciser le cas échéant l'unité et les intervalles de valeurs associées en vous basant sur les produits équivalents sur le marché. * en X cycles de fonctionnement ou... | <input type="checkbox"/> 0 à 2 ans ou *... <input type="checkbox"/> 2 à 5 ans ou *... <input type="checkbox"/> > à 5 ans ou *... |
| QB8) Le produit est-il (plusieurs réponses possibles) <input type="checkbox"/> à usage unique (cartouche pour pistolet scellement...) <input type="checkbox"/> à usage occasionnel (tondeuse...) <input type="checkbox"/> à usage fréquent intermittent ou continu (pompe, machine outil...) | | | |

Annexe A – Tableau 2 – Questionnaire environnement (NF E 01-005)

| A2 Analyse environnementale (suite) | |
|---|--|
| A2.4 Recyclabilité en fin de vie (hors emballages) – (FV) | |
| QB9) Indiquer l'estimation du taux de recyclabilité (T_r) du produit (au besoin voir formule ci-contre) <input type="checkbox"/> $T_r < 80\%$ <input type="checkbox"/> $80\% \leq T_r < 90\%$ <input type="checkbox"/> $T_r \geq 90\%$ | <p>Taux de recyclabilité (T_r)</p> $T_r = \frac{(\sum_{i=1}^N r_i m_i)}{M_{tot}} \cdot 100\%$ <p>avec :</p> <p>T_r : taux de recyclabilité en %</p> <p>M_{tot} = masse totale du produit (hors emballage) en kg</p> <p>N : quantité de pièces du produit</p> <p>m_i = masse du matériau ou composant i acheté ou pièce i en kg</p> <p>r_i = taux de recyclabilité du matériau i, composant ou pièce i acheté</p> <p>$r_i = 1$ pour les matériaux métalliques</p> <p>$r_i = 1$ pour le verre</p> <p>$r_i = 0,3$ pour les plastiques (sauf données spécifiques)</p> <p>$r_i = 0,8$ pour composants achetés ou pièces constituées de plusieurs métaux non identifiés</p> <p>$r_i = 0,5$ pour composants achetés ou pièces constituées de plusieurs métaux avec 1 ou 2 autres matériaux non métalliques</p> <p>$r_i = 0$ pour composants achetés ou pièces constituées de plusieurs plastiques, pour les composants électroniques, pour les bi-composants ou pièces surmoulées plastiques</p> |
| QC9) le produit contient-il des composants ou sous-ensembles réutilisables en fin de vie ? <input type="checkbox"/> oui – préciser <input type="checkbox"/> non | |
| QC10) si oui (QC9) l'entreprise est-elle organisée pour récupérer les composants ou les pièces usés et les rénover ? <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non | |
| QC11) comment est intégrée la maintenance du produit lors de sa conception ? <input type="checkbox"/> en remplaçant les pièces du produit <input type="checkbox"/> en facilitant les réparations <input type="checkbox"/> en donnant des indications à l'utilisateur sur l'utilisation adéquate du produit <input type="checkbox"/> autre | |
| A2.5 Substances dangereuses (S) | |
| Questions | Réponses |
| QB10) Le produit contient-il des composants électriques ou électroniques ? (la plupart peuvent contenir des substances dangereuses au titre du règlement n°1272/2008) | <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non |
| QB11) Le produit (produit, composants, emballages) contient-il * à votre connaissance certaines des substances suivantes : | <p>QB11a) des métaux ou dérivés classés comme dangereux tels que : plomb, mercure, cadmium, chrome.</p> <p>QB11b) des retardeurs de flamme dangereux (les bromés contenus dans les plastiques : poly-bromo-biphényle (PBB), éthers diphenyliques polybromés (PBDE), etc.</p> <p>QB11c) des molécules contenant des matériaux halogénés (avec atomes de fluor, brome, chlore : exemple : PTFE, PVC...).</p> <p>QB11d) d'autres* substances réglementés ou « à risque » sur le marché ? Règlement 2006/1907 (REACH)... *phtalates dans les jouets, nickel, colorants azoïques...</p> |
| (* au niveau de ses matériaux, éléments d'alliages, revêtements, traitements de surface, encre, colorants, additifs, etc.) | <p><input type="checkbox"/> oui ou ne sait pas <input type="checkbox"/> non</p> <p><input type="checkbox"/> oui ou ne sait pas <input type="checkbox"/> non</p> <p><input type="checkbox"/> oui ou ne sait pas <input type="checkbox"/> non</p> <p><input type="checkbox"/> oui ou ne sait pas <input type="checkbox"/> non</p> |
| A2.6 Transport (T) | |
| Questions | Réponses |
| QB12) Quelle est la répartition géographique des fournisseurs et sous traitants de matériaux, pièces et composants en % de leur volume (nombre ou masse de produits achetés) total = 100 ? | <input type="checkbox"/> régionale (ou rayon < 100 km) : ... % <input type="checkbox"/> nationale (ou rayon < 500 km) : ... % <input type="checkbox"/> européenne (ou rayon < 1 000 km) : ... % <input type="checkbox"/> mondiale (ou rayon > 1 000 km) : ... % |
| QC12) Quelle est la répartition géographique de vos expéditions, en % de leur volume (nombre ou masse de produits vendus) ? | <input type="checkbox"/> régionale (ou rayon < 100 km) : ... % <input type="checkbox"/> nationale (ou rayon < 500 km) : ... % <input type="checkbox"/> européenne (ou rayon < 1 000 km) : ... % <input type="checkbox"/> mondiale (ou rayon > 1 000 km) : ... % |

Suite tableau : page 590.

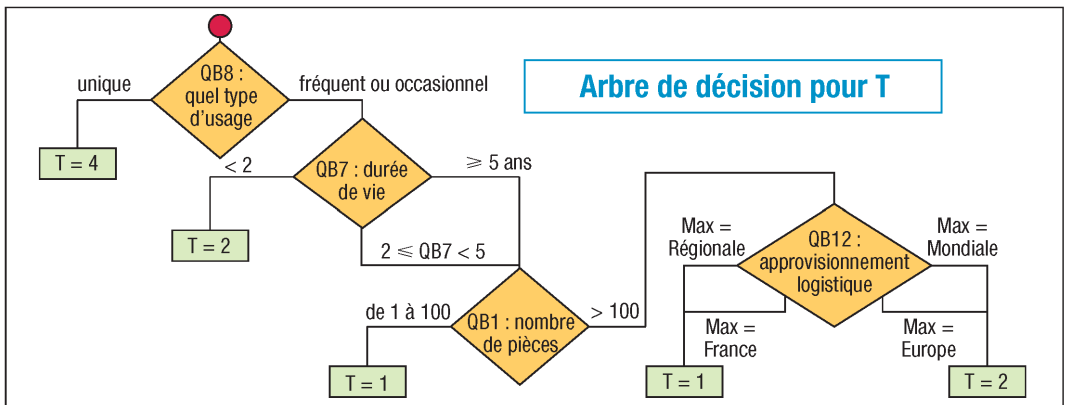
| A2.7 Emballage (Emb) | | | |
|--|--|---|---|
| Questions | | Réponses | |
| QB13) Le produit est-il livré au client dans un emballage ? <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non | | QB14) Si oui cet emballage est-il recyclable ? <input type="checkbox"/> oui, 100 % <input type="checkbox"/> oui, en partie <input type="checkbox"/> non | |
| QC13) Les emballages d'approvisionnement sont-ils : | | QC13a) recyclables ? <input type="checkbox"/> oui, 100 % <input type="checkbox"/> oui, en partie <input type="checkbox"/> non | QC13b) recyclables ? <input type="checkbox"/> oui, 100 % <input type="checkbox"/> oui, en partie <input type="checkbox"/> non |
| QC14) les emballages de regroupement et de transport (palette, film plastique, caisse navette, etc.) sont-ils : | | QC14a) réutilisables ? <input type="checkbox"/> oui, 100 % <input type="checkbox"/> oui, en partie <input type="checkbox"/> non | QC14b) recyclables ? <input type="checkbox"/> oui, 100 % <input type="checkbox"/> oui, en partie <input type="checkbox"/> non |

3. Annexe B : algorithmes d'analyses

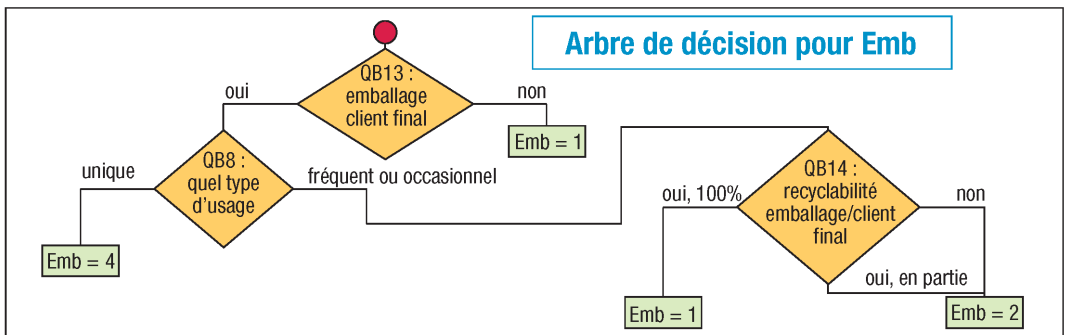
Les 5 Algorithmes à appliquer à l'étape 1 pour hiérarchiser les aspects environnementaux (MP, F, U, FV, S, T et Emb) à partir du questionnaire environnement des tableaux 1-2-3 annexe A. Les numéros des questions (Q22...) sont identifiés sur l'algorithme et les tableaux.

Remarque : si le produit est soumis à une réglementation portant sur un ou plusieurs des sept aspects environnementaux, cet aspect devient prioritaire et sa note doit être automatiquement remontée à 4 (toute obligation règlementaire doit être systématiquement prise en compte quelle que soit la note environnementale obtenue).

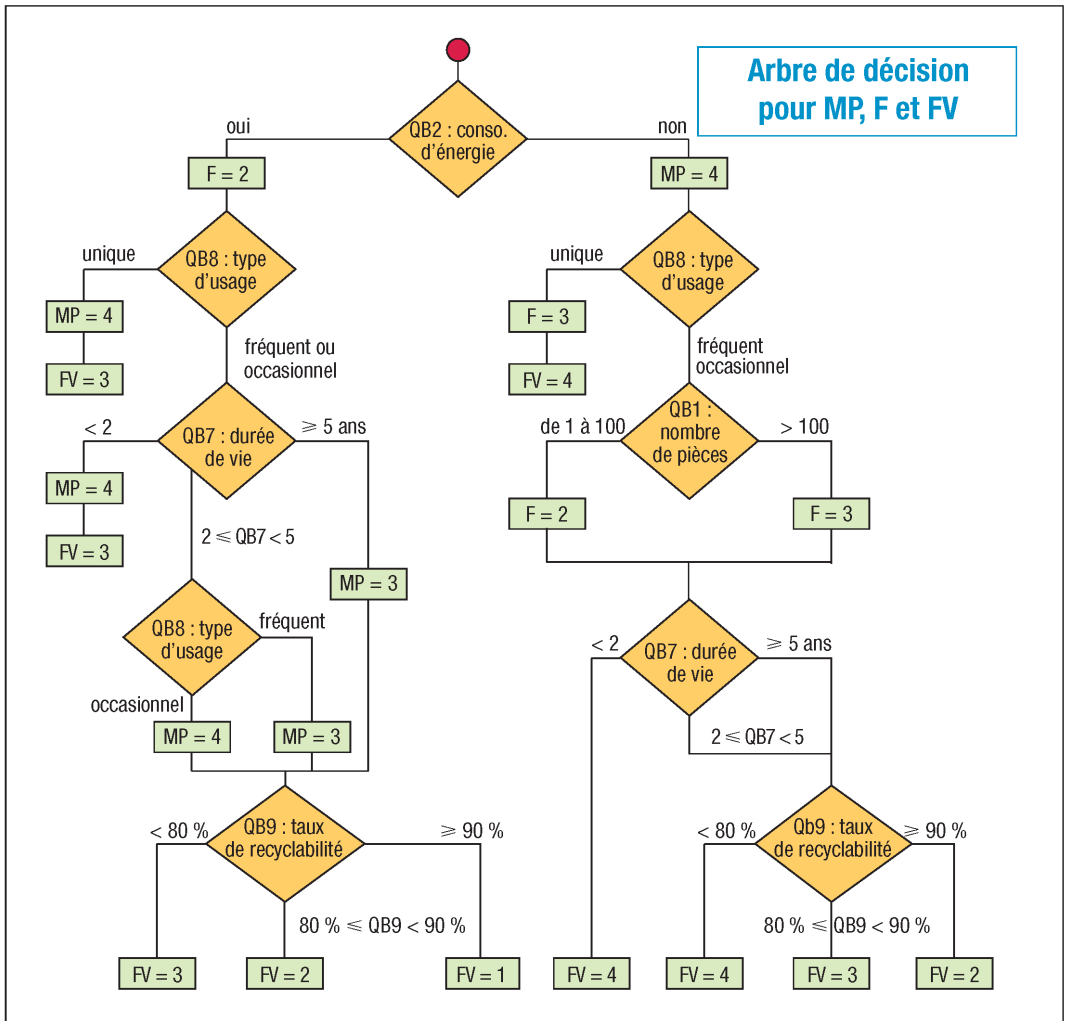
| Exemples de règles particulières (pour FV-R, S et Emb) dues à la réglementation | |
|--|---|
| Le produit est soumis à la directive 2012/96/CE sur les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). | FV = 4 |
| Le produit est soumis à la directive 2002/95/CE sur la limitation des substances dangereuses (y compris indirectement). | S = 4 |
| Le produit est soumis à la directive 2000/53/CE sur les véhicules hors d'usage (VHU) (y compris indirectement). | FV = 4 et S = 4 |
| Le produit est soumis à une mesure d'exécution dans le cadre de la directive 2009/125/CE sur l'éco-conception des produits liés à l'énergie (ErP). | Aucun ajustement n'est nécessaire, déjà pris en compte par l'algorithme (U = 4 pour la réponse « oui » à QB2 « consommation d'énergie » et QB4 « modification du rendement d'un ensemble plus grand. |



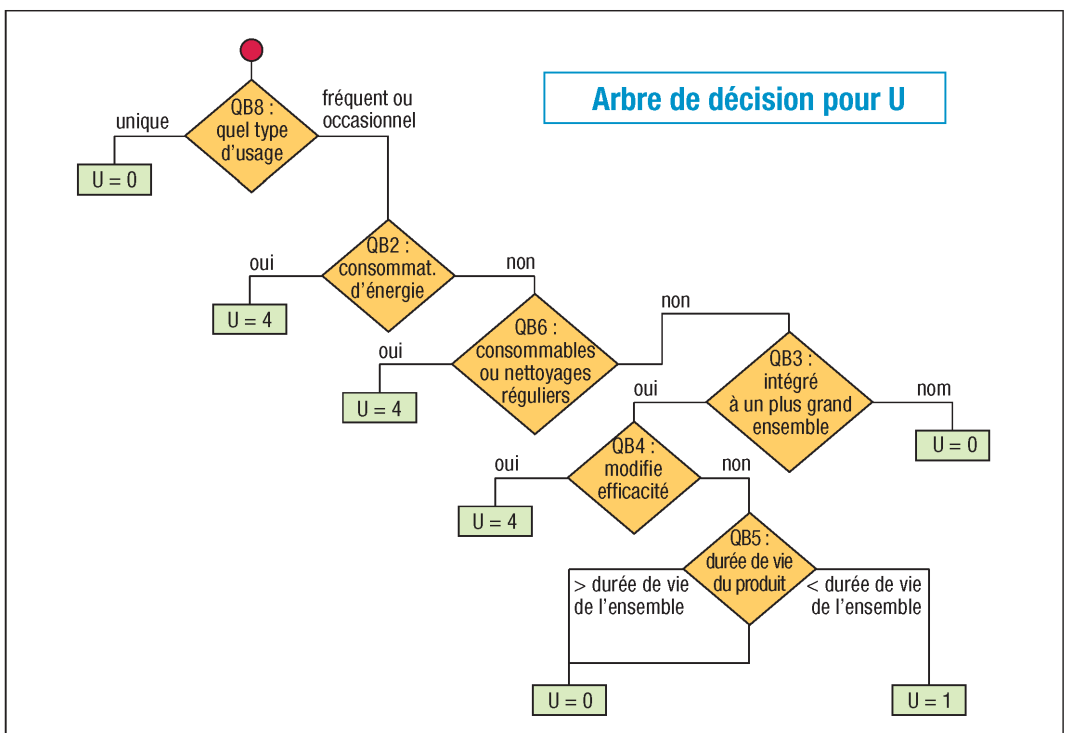
14. Arbre de décision pour l'aspect environnemental transport T.



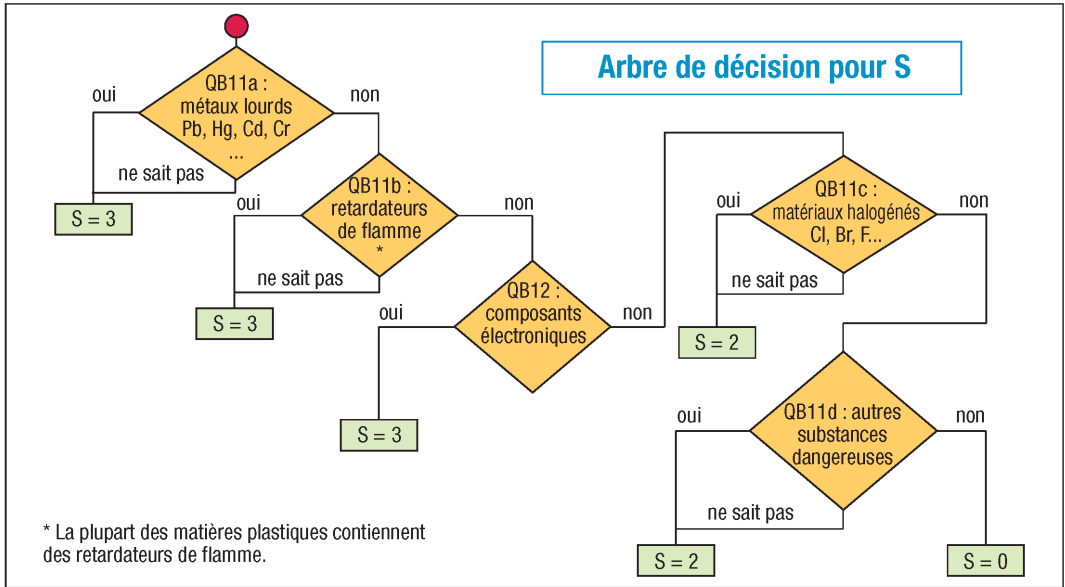
15. Arbre de décision pour l'aspect Emballage Emb.



16. Arbre de décision pour les aspects environnementaux (AE) : cas MP, F et FV.



17. Arbre de décision pour l'aspect environnemental U.



18. Arbre de décision pour l'aspect environnemental substances dangereuses S.

4. Annexe C (informative)

Lignes directrices (LD) pour l'amélioration environnementale du produit, indicateurs de ligne directrice et indicateurs d'aspect environnemental.

Le tableau C1 précise les stratégies pouvant être mise en œuvre pour chacun des sept aspects environnementaux et identifie des lignes directrices génériques (en indiquant les numéros de question du questionnaire environnement). Un choix d'indicateurs est également proposé.

| Tableau C2 : Exemples d'indicateurs d'aspect environnemental (indicateur AE) | | | |
|--|--|----|---|
| AE | Exemples d'indicateurs AE | AE | Exemples d'indicateurs AE |
| MP | <ul style="list-style-type: none"> - impact CO₂ des matériaux du produit - contenu énergétique des matériaux du produit - contenu en matière recyclée, etc. | F | <ul style="list-style-type: none"> - consommation d'énergie de fabrication - masse de déchet par produit - Masse d'émissions polluantes - impact CO₂ de la fabrication, etc. |
| U | <ul style="list-style-type: none"> - consommation d'énergie du produit - durée de vie du produit - masse de déchets générés - impact CO₂ de la phase d'utilisation, etc. | S | <ul style="list-style-type: none"> - % de substances dangereuses dans le produit - conformité du produit à la réglementation des substances, etc. |
| FV | <ul style="list-style-type: none"> - taux de recyclabilité potentielle ou effective - temps de désassemblage, etc. | T | <ul style="list-style-type: none"> - t.km par produit - efficacité des moyens de transport - volume utile / volume transporté, etc. |
| Emb | <ul style="list-style-type: none"> - impact environnemental global des matériaux d'emballages par produit - impact CO₂ des matériaux d'emballages du produit - % de matériaux d'emballage biodégradables, etc. | | |

| Tableau C1 : lignes directrices pour l'amélioration environnementale du produit | | | | | |
|---|---|--|---|--|--------------------------------|
| (AE) Aspects environnementaux | Stratégies | Lignes directrices | Exemples d'indicateurs LD | | |
| Matières premières (MP) | Choisir des matériaux à moindre impact environnemental | Matériaux à moindre contenu CO ₂ | Contenu CO ₂ (kg CO ₂ équivalent) | | |
| | | Utiliser des matériaux renouvelables (QC3) | Nombre, masse, % renouvelables | | |
| | | Utiliser des matériaux recyclés (QC2) | Nombre, masse, % de recyclés | | |
| | | Utiliser des matériaux recyclables | Nombre, masse, % de recyclables | | |
| | | Utiliser des matériaux à moindre contenu énergétique | Contenu énergétique total Contenu énergétique par matériau | | |
| | Réduire les matériaux (QC1) | Réduire en poids | Masse (kg, tonne) | | |
| | | Réduire en volume | Volume (l, m ³) | | |
| | Développer de nouveaux concepts | Prévoir la réutilisation de pièces ou rénovation | Ratio nbre pièces réutilis. / nbre total | | |
| | | Partager l'utilisation du produit | Nombre d'utilisateurs ayant accès | | |
| | | Y intégrer des fonctions additionnelles | Nombre de fonctions par produit | | |
| Fabrication (F) | Optimiser les techniques de production (QC4 - QC5) | Choisir les meilleures technologies de production Disponibles (MTD) | Nombre ou % de MTD par produit / nombre total de procédés... | | |
| | | Diminuer les étapes de production | Nombre d'étapes (usine, cycle de vie) | | |
| | | Réduire la consommation d'énergie | Consommation par produit | | |
| | | Opter pour des énergies renouvelables | % d'énergie propre/total | | |
| | | Réduire les quantités de déchets | Masse de déchets (kg) par produit | | |
| | | Diminuer les consommables | Masse consommables (kg) par produit | | |
| | | Choisir des consommables peu polluants | % consommables polluants... | | |
| | | Avoir de bonnes pratiques de management | Avoir un management environnemental | Certification ISO 14001 : oui/non... | |
| | Inciter aussi les sous traitants | | Nombre ou % de sous traitants | | |
| | Acheter des produits, composants et consommables éco-conçus | | Nombre, masse, % d'éco-conçus sur le total des achats par produit | | |
| | Utilisation (U) | | Réduire l'impact de l'utilisation du produit | Améliorer son efficacité énergétique (QB4) | Consommation, rendement... |
| | | | | Utiliser des énergies moins polluantes (QC6) | Quantité d'émissions... |
| | | | | Diminuer les consommables (QC11) | Masse consommables par produit |
| | | Des consommables moins polluants (QC7) | | Masse, % de polluants par produit | |
| Réduire les émissions et les quantités de déchets générés par le produit (QC7) | | Quantité, % générés par cycle de vie du produit | | | |
| Favoriser un usage correct du produit (QC11) | | % de bon usage parmi les utilisateurs | | | |
| Optimiser la durée de vie du produit | Améliorer la durabilité et la fiabilité du produit (QB5-QB7) | Durées vie effective et programmée | | | |
| | Faciliter la maintenance et la réparation (QC8) | Taux, délais, temps, coûts... | | | |
| | Travailler une structure plus modulaire | % produits interchangeable... | | | |
| | Réduire l'encombrement du produit | Volume d'encombrement | | | |
| | Optimiser le design (bon usage...) | Obsolescence prévue du produit... | | | |
| | Renforcer le lien produit utilisateur | Qualité perçue, taux de satisfaction... | | | |
| | Développer de nouveaux concepts | Concevoir en vue de réutilisation (QC9-QC10) | Taux de réutilisation du produit | | |
| Partager l'utilisation du produit | | Nombre d'utilisateurs ayant accès | | | |
| Y intégrer de nouvelles fonctions | | Nombre de fonctions par produit | | | |
| Optimiser, réduire le nombre de composants | | Nombre de fonctions par produit | | | |
| Recyclabilité en fin de vie (FV) | Améliorer le recyclage en fin de vie du produit | Concevoir en vue de réutiliser pièces et composants (robustesse, design) (QC9-QC10) | Nombre, masse, % pièces réutilisables | | |
| | | Faciliter le désassemblage du produit (QC11) | Taux de séparabilité du produit | | |
| | | Penser au recyclage des matériaux (QB9) | % de matériaux recyclables... | | |
| Développer la récupération | Informer l'utilisateur final des systèmes de récupération existants | | Indication sur le produit ou dans le manuel d'utilisation | | |
| | | | | | |
| Substances (S) | Gérer les (QB11) substances dangereuses | Diminuer/remplacer substances dangereuses | % substances dangereuses / produit | | |
| | | Prévoir une incinération « sûre », non pollu | % de matériaux délicats à incinérer | | |
| | | Prévoir une mise en décharge « sûre » | % de matériaux délicats à mise en... | | |
| Transport (T) | Réduire l'impact de la logistique | Choisir des transports moins polluants | Taux de transports moins polluants... | | |
| | | Réduire la logistique du produit (QB12-QC12) | Taux d'approvisionnement ; nbre km | | |
| | Réduire l'impact du transport | Réduire la masse du produit | Masse du produit | | |
| Emballage (Emb) | Réduire l'impact des emballages | Réduire l'encombrement du produit | Volume d'encombrement | | |
| | | Réduire les quantités d emballages (QC15) | Nombres, volume, masse par produit | | |
| | | Utiliser des emballages réutilisables (QC13a-QC14a-QC15) | Taux d'emballages réutilisables... | | |
| | | Utiliser des matériaux d'emballage moins polluant (matières recyclables...) (QC13b-Qc13c-Qc14b- Qb14-Qc15) | Taux d'emballages recyclables, Taux d'emballages biodégradables par produit... | | |

VII – Gaz à effet de serre (GES) : réchauffement climatique – Données diverses

Le changement climatique d'origine anthropique (lié à l'activité de l'homme) est identifié comme l'un des défis majeurs auquel sera confronté l'humanité du 21^e siècle.

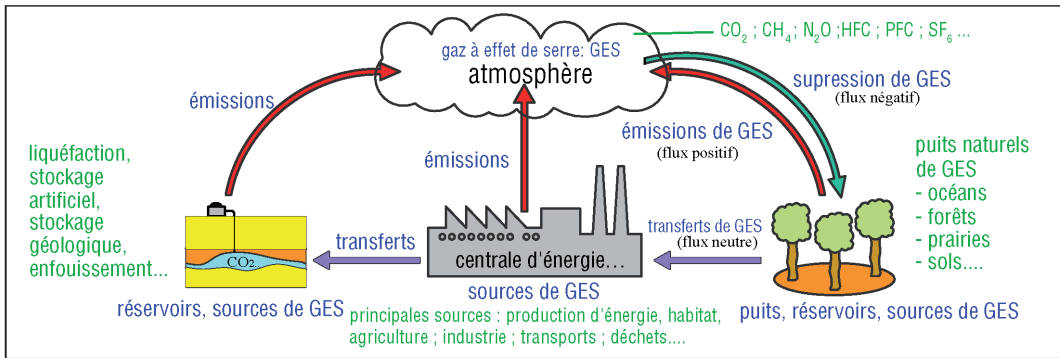
Les implications sont immenses, tant pour les systèmes humains que pour les systèmes naturels. À cette fin des initiatives et des réglementations sont en cours ou en développement pour limiter les concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère terrestre.

Si les émissions naturelles de GES (vapeur d'eau des nuages, volcanisme, estuaires, marécages) s'équilibrent d'elles mêmes, par contre celles produites par l'homme et ses activités (centrales d'énergie ≈ 21%, processus industriels ≈ 17%, transports ≈ 14%, agriculture ≈ 13%, résidences habitat ≈ 11%, etc.) n'ont pas de contrepartie naturelle.

Les émissions et les captations des GES interviennent tout au long du cycle de vie d'un produit, de l'acquisition des matières premières au traitement du produit en fin de vie. Les activités des organismes produisent aussi des émissions de GES indirectes, autres que celles issues de la production d'électricité, de chaleur, etc.

Exemples : les migrations quotidiennes et les voyages d'affaires ; le transport des produits, matériaux, personnels, ou déchets d'un organisme par un autre organisme ; les activités délocalisées, la fabrication sous contrat et les franchises ; les GES issus de déchets produits par l'organisme mais gérés par d'autres ; etc.

| Définitions normalisées liées aux GES – sources : NF EN ISO 14064 ; XP ISO/TS 14067, etc. | | |
|---|------------------|---|
| Paramètre, indicateur | Abréviation | Définitions |
| Gaz à effet de serre | GES | Constituant gazeux de l'atmosphère naturel ou anthropique (lié à l'homme), qui absorbe et émet un rayonnement à une longueur d'onde spécifique du spectre du rayonnement infrarouge émis par la surface de la terre, l'atmosphère et les nuages. Remarque : les GES incluent le dioxyde de carbone (CO ₂), le méthane (CH ₄) ; l'oxyde nitreux (N ₂ O), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures fluorés (PFC) et l'hexa-fluorure de soufre SF ₆ . Une liste des GES est fournie dans le tableau page suivante. |
| Potentiel de réchauffement global | PRG | Facteur de caractérisation décrivant l'impact du forçage radiatif d'une unité, basée sur la masse, d'un GES donné par rapport à celui du CO ₂ . |
| Potentiel de réchauffement de la planète | PRP | Facteur décrivant l'impact de forçage radiatif sur une période de temps donné, d'une unité (en masse) de GES par rapport à une unité équivalente de CO ₂ pour une période donnée. |
| Empreinte carbone des produits | ECP | Représente la somme, exprimée en équivalent CO ₂ , des émissions et des captations de GES d'un système de produits associé à son cycle de vie. Remarque : le calcul de l'ECP est fondé sur la méthodologie de l'ACV (analyse du cycle de vie) et dépend des hypothèses effectuées concernant les transports, le comportement des utilisateurs, les scénarios de fin de vie, les frontières du système de produit, la zone géographique, les saisons, etc. |
| Équivalent CO ₂ | CO _{2e} | Unité permettant de comparer le forçage radiatif d'un GES à celui du CO ₂ (quantité calculée en multipliant la masse de GES donnée par son potentiel de réchauffement global). |
| Carbone | C | Carbone biogénique (issu de la biomasse) ou carbone fossile (contenu dans la matière fossilisée comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel, etc.). |
| Analyse du cycle de vie | ACV | Compilation et évaluation des intrants, extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie. Les ACV sont fondées sur les normes ISO 14040 et ISO 14044. ICV : est une analyse de l'inventaire du cycle de vie. |
| ECP partielle | | ECP fondée sur des étapes ou processus du cycle de vie. |
| Source de GES | | Unité physique ou processus, naturel ou anthropique, qui rejette du GES dans l'atmosphère. |
| Puits de GES | | Unité physique ou processus, naturel ou anthropique, qui capte du GES dans l'atmosphère. |
| Émission de GES | | Masse totale de GES libérée dans l'atmosphère lors d'une période donnée. |
| Captation/retrait de GES | | Masse totale d'un GES captée ou retirée de l'atmosphère lors d'une période donnée. |
| Réservoir de GES | | Unité physique ou composant (de la biosphère, de la géosphère ou de l'hydrosphère) capable de stocker ou accumuler un GES prélevé ou retiré de l'atmosphère par un puits de GES. |
| Catégorie d'impact | | Classe représentant des questions environnementales préoccupantes. |
| Compensation | | Mécanisme de compensation de la totalité ou d'une partie de l'ECP par la prévention des émissions, la réduction ou la captation d'une quantité des émissions de GES d'un processus à l'extérieur des frontières du système de produit. Exemples : l'investissement dans les énergies renouvelables, les mesures d'efficacité énergétiques, la reforestation et d'autres, sont à l'extérieur du système de produit. |



19. Gaz à effet de serre : interaction et application des définitions et éléments divers.

| Principaux gaz à effet de serre - PRG sur 100 ans par rapport au CO ₂ ** - XP ISO/TS 14067 | | | | | | | | |
|--|---|-------|---|--|--------|--|---|-------|
| Gaz | formule | PRG | Gaz | formule | PRG | Gaz | formule | PRG |
| dioxyde carbone | CO ₂ | 1 | méthane | CH ₄ | 21 | Oxyde nitreux | N ₂ O | 310 |
| Hydrofluorocarbones (HFC) | | | Hydrocarbures et autres-effets directs | | | Substances du protocole de Montréal * | | |
| HFC-23 | CHF ₃ | 14800 | diméthyléther | CH ₃ OCH ₃ | 1 | CFC-11 | CCl ₃ F | 4750 |
| HFC-32 | CH ₂ F ₂ | 675 | chloroforme | CHCl ₃ | 31 | CFC-12 | CCl ₂ F ₂ | 10900 |
| HFC-41 | CH ₃ F | 92 | chlorur. méthylène | CH ₂ Cl ₂ | 8,7 | CFC-13 | CClF ₃ | 14400 |
| HFC-43-10mee | C ₃ H ₂ F ₁₀ | 1300 | chlorur. méthyle | CH ₃ Cl | 13 | CFC-113 | CCl ₂ FCClF ₂ | 6130 |
| HFC-125 | CHF ₂ CF ₃ | 3500 | bromur. méthylène | CH ₂ Br ₂ | 1,54 | CFC-114 | CClF ₂ CClF ₂ | 10000 |
| HFC-134 | CHF ₂ CHF ₂ | 1100 | Halon1201 | CHBrF ₂ | 404 | CFC-115 | CClF ₂ CF ₃ | 7350 |
| HFC-134a | CH ₂ FCF ₃ | 1430 | trifluoroiodo.(3) | CF ₃ I | 0,4 | Halon-1301 | CBrF ₃ | 7140 |
| HFC-143 | CH ₂ FCHF ₂ | 353 | Composés perfluorés | | | Halon-1211 | CBrClF ₂ | 1890 |
| HFC-143a | CH ₃ CF ₃ | 4470 | hexafluor. soufre | SF ₆ | 22800 | Halon-2402 | CBrF ₂ CBrF ₂ | 1640 |
| HFC-152 | CH ₂ FCH ₂ F | 53 | trifluorure azote | NF ₃ | 17200 | tétrachl.(4) | CCl ₄ | 1400 |
| HFC-152a | CH ₃ CHF ₂ | 124 | PFC-14 | CF ₄ | 7390 | brom. méth(5) | CH ₃ Br | 5 |
| HFC-161 | CH ₃ CH ₂ F | 12 | PFC-116 | C ₂ F ₆ | 12200 | méth. cloro(6) | CH ₃ CCl ₃ | 146 |
| HFC-227ea | CF ₃ CHFCF ₃ | 3220 | PFC-218 | C ₃ F ₈ | 8830 | HCFC-21 | CHCl ₂ F | 151 |
| HFC-236cb | CH ₂ FCF ₂ CF ₃ | 1340 | PFC-318 | c- C ₄ F ₈ | 10300 | HCFC-22 | CHClF ₂ | 1810 |
| HFC-236ea | CHF ₂ CHFCF ₃ | 1370 | PCF-3-1-10 | C ₄ F ₁₀ | 8860 | HCFC-123 | CHCl ₂ CF ₃ | 77 |
| HFC-236fa | CF ₃ CH ₂ CF ₃ | 9810 | PCF-4-1-12 | C ₅ F ₁₂ | 9160 | HCFC-124 | CHClFCF ₃ | 609 |
| HFC-245ca | CH ₂ FCF ₂ CHF ₂ | 693 | PCF-5-1-14 | C ₆ F ₁₄ | 9300 | HCFC-141b | CH ₃ CCl ₂ F | 725 |
| HFC-245fa | CHF ₂ CH ₂ CF ₃ | 1030 | PCF-9-1-18 | C ₁₀ F ₁₈ | >7500 | HCFC-142b | CH ₃ CClF ₂ | 2310 |
| HFC-365mfc | CH ₃ CF ₂ CH ₂ CF ₃ | 794 | pentaf. trifluo (1) | SF ₅ CF ₃ | 17700 | HCFC-225ca | CHCl ₂ CF ₂ CF ₃ | 122 |
| HFC-43-10mee | CF ₃ CHFCF ₂ CF ₃ | 1640 | perfluorocyclo (2) | c- C ₃ F ₆ | >17340 | HCFC-225cb | CHClFCF ₂ CClF ₃ | 595 |
| Éthers fluorés – hydrofluoroéthers (HFE) | | | | | | | | |
| HFE-125 | CHF ₂ OCF ₃ | 14900 | H-Galden1040x (9) | CHF ₂ OCF ₂ O-C ₂ F ₄ CHF ₂ | 1870 | HFE-347mcf2 | CHF ₂ CH ₂ O-CF ₂ CF ₃ | 374 |
| HFE-134 | CHF ₂ OCHF ₂ | 6320 | HFE-236ca12 (ouHG10) | CHF ₂ OCF ₂ -OCHF ₂ | 2800 | HFE-356mec3 | CH ₃ OCF ₂ -CH ₂ CF ₃ | 101 |
| HFE-143a | CH ₃ OCF ₃ | 756 | HFE-263fb2 | CF ₃ CH ₂ O-CH ₃ | 11 | HFE-356pcf2 | CHF ₂ CH ₂ O-CF ₂ CHF ₂ | 265 |
| HFE-235da2 | CHF ₂ OCHClCF ₃ | 350 | HFE-329mcc2 | CHF ₂ CF ₂ O-CF ₂ CF ₃ | 919 | HFE-356pcf3 | CHF ₂ OCH ₂ -CF ₂ CHF ₂ | 502 |
| HFE-245cb2 | CH ₃ OCF ₂ CF ₃ | 708 | HFE-338mcf2 | CF ₃ CH ₂ O-CF ₂ CF ₃ | 552 | HFE-365mcf3 | CF ₃ CF ₂ -CH ₂ OCH ₃ | 11 |
| HFE-245fa2 | CHF ₂ OCH ₂ CF ₃ | 659 | HFE-338pcc13 (ou HG-01) | CHF ₂ OCF ₂ -CF ₂ OCHF ₂ | 1500 | HFE-374pcf2 | CHF ₂ CF ₂ O-CH ₂ CH ₃ | 557 |
| HFE-254cb2 | CH ₃ OCF ₂ CHF ₂ | 359 | | (CF ₃) ₂ CFO-CH ₃ | 343 | | (CF ₃) ₂ CHO-CHF ₂ | 380 |
| HFE-347mcc3 | CH ₃ OCF ₂ CF ₂ CF ₃ | 575 | | (CF ₃) ₂ CHOH | 195 | | (CF ₃) ₂ CHO-CH ₃ | 27 |
| HFE-347pcf2 | CHF ₂ CF ₂ OCH ₂ CF ₃ | 580 | | CF ₃ CF ₂ -CH ₂ OH | 42 | | -(CF ₂) ₄ CH-(OH) | 73 |
| HFE-356pcc3 | CH ₃ OCF ₂ CF ₂ CHF ₂ | 110 | | | | | | |
| HFE-7100 (7) | C ₄ F ₉ OCH ₃ | 297 | | | | | | |
| HFE-7200 (8) | C ₄ F ₉ OC ₂ H ₅ | 59 | | | | | | |
| HFE-227ea | CF ₃ CHFOCF ₃ | 1540 | | | | | | |
| HFE-236ea2 | CHF ₂ OCHFCF ₃ | 989 | | | | | | |
| HFE-236fa | CF ₃ CH ₂ OCF ₃ | 487 | | | | | | |
| HFE-245fa1 | CHF ₂ CH ₃ OCF ₃ | 286 | | | | | | |
| Polyéthers perfluorés | | | PFPMIE : CF ₃ OCF(CF ₃)CF ₂ O-CF ₂ OCF ₃ de PRG = 10300 | | | | | |
| (1) pentafluorure de trifluorométhyle saturé ; (2) perfluorocyclopropane ; (3) trifluoroiodométhane ; (4) tétrachlorure de carbone ; (5) bromure de méthyle ; (6) méthyle chloroforme ; (7) ou HFE-449sl ; (8) ou HFE-569sf2 ; (9) ou HFE-43-10pccc124 ; * 1987 | | | | | | | | |
| ** Si la vapeur d'eau (nuages...) est à l'origine de 70% de l'effet de serre global, le PRG de celle-ci est non significatif et sa durée de séjour dans l'atmosphère est seulement de quelques jours. Par contre, la durée de vie du CO ₂ est de 100 ans dans l'atmosphère, celle du CH ₄ de 12 ans ; 114 ans pour le N ₂ O ; 12 ans pour le HFC-22 ; le SF ₆ 3200 ans et le PFC-14 de 50 000 ans... | | | | | | | | |
| Remarques : produit par l'activité humaine, en quantité, le CO ₂ représente 72% des émissions de GES, le CH ₄ 18% et le N ₂ O 9%. Si le CO ₂ est produit par toutes les activités humaines, le CH ₄ provient surtout de l'agriculture (élevage...) et des surfaces inondées (estuaires ; marais, rizières, égouts...) mais peut aussi être valorisé en combustible propre ; le N ₂ O provient essentiellement de l'agriculture. | | | | | | | | |

Produits mécaniques – Données environnementales (extraits fascicule FD E 01-008)-tableau 1

Les données d'impact environnemental fournies, informatives, sont des valeurs repères permettant d'orienter le choix de conception des produits mécaniques. Le fascicule propose plus de 160 fiches de données numérotées, chacune avec un nom (fonte, tournage-inox...), un type (matériaux, procédés...), un sous-type (métal, polymère...), avec des valeurs calculées (synthèse du CETIM...) pour les 20 indicateurs environnementaux retenus et listés avec leurs unités. Les valeurs chiffrées indiquées ne sont pas des valeurs absolues, le périmètre géographique et technologique, les scénarios d'utilisation, les hypothèses de calcul et autres paramètres peuvent faire varier ces valeurs. Les tableaux suivants retiennent 4 valeurs parmi les 20 retenues par fiche ; l'acier allié sous forme de fil représente une seule fiche de données...

| Indicateur environnemental | acier non allié (1kg) | acier non allié revêtu (1kg) | acier faibl. allié et autres (1kg) | acier inox. Cr Ni (1kg) | inox. au Cr titane (1kg) | Al primaire Al fonderie 1kg | Al secondaire (1kg) |
|--|--|--|--|---|---|---|--|
| Changement climatique kg éq. CO₂ | 2,18 fil 2,42 plat 1,36 profilé 2,43 tube 2,07 bobine | 2,93 polymère 2,36 galvanisé 2,63 élec.zing. 2,48 chromé 2,49 étamé | 1,89 tôle 1,86 barre autres : 0,803 R. béton* 1,4 fontes | austénitiques 5,06 tôle 304 4,97 barre 304 6,36 tôle 316 5,90 barre 316 | ferritiques* 2,68 tôle 2,13 barre 42,1 titane | 11,5 lingot 12,6 tôle 12,9 profilé 10,9 fonderie | 1,02 tôle DP 1,44 profilé DP 1,97 tôle DM 1,57 profilé DM |
| Pollution de l'air m³ | 244 fil 409 plat 200 profilé 183 tube 317 bobine | 350 polymère 398 galvanisé 464 élec.zing. 250 chromé 274 étamé | 656 tôle 587 barre autres : 173 R. béton* 587 fontes | austénitiques 1380 tôle 304 1290 barre 304 2000 tôle 316 1920 barre 316 | ferritiques 1350 tôle 1260 barre 1030 titane | 2250 lingot 2220 tôle 2222 profilé 2020 fonderie | 133 tôle DP 153 profilé DP 253 tôle DM 222 profilé DM |
| Énergie primaire totale MJ | 17,1 fil 22,3 plat 15,1 profilé 22,4 tube 2,07 bobine | 24,0 polymère 24,7 galvanisé 21,7 élec.zing. 22,9 chromé 22,1 étamé | 28,7 tôle 19,8 barre autres : 18,6 R. béton* 18,9 fontes | austénitiques 74,1 tôle 304 83,9 barre 304 106 tôle 316 101 barre 316 | ferritiques 45,8 tôle 35,1 barre 64,1 titane | 20,4 lingot 20,7 tôle 21,4 profilé 180 fonderie | 19,1 tôle DP 28,7 profilé DP 35,4 tôle DM 25,8 profilé DM |
| Note unique** | 0,156 fil 0,171 plat 0,118 profilé 0,164 tube 0,144 bobine | 0,209 polymère 0,181 galvanisé 0,188 élec.zing. 0,181 chromé 0,184 étamé | 0,228 tôle 0,197 barre autres : 0,095 R. béton* 0,179 fontes | austénitiques 0,575 tôle 304 0,517 barre 304 0,740 tôle 316 0,680 barre 316 | ferritiques 0,339 tôle 0,282 barre 3,84 titane | 0,102 lingot 0,143 tôle 0,194 profilé 0,160 fonderie | 0,102 tôle DP 0,143 profilé DP 0,194 tôle DM 0,160 profilé DM |
| Observations (voir aussi***) | en laminés marchands | élec.zin : électro-zingué | * acier non allié R : renfort de... | 304 et 316 voir tableau *** | *420-430-440- 441 : voir *** | issu de déchets de production | DP: déch. production DM: déch. ménagers |

** La note unique représente une synthèse des 18 indicateurs d'impacts suivants : changement climatique ; diminution de la couche d'ozone ; acidification terrestre ; eutrophisation des eaux ; toxicité humaine ; formation d'ozone photochimique ; formation de particules ; écotoxicité des eaux et terrestre ; radiation ionisante ; utilisation des territoires ; consommation des ressources fossiles, minérales et en eau.

| Indicateur environnemental | AlCu4MgSi 2017 A (1kg) | AlMg4,5Mn0,7 AW5083 (1kg) | Cuivre et alliage (1kg) | Zn, Zamak et Mg (1kg) | Plastiques (1kg) | Plastiques (1kg) | Plastiques (1kg) |
|--|--|--|---|--|---|---|---|
| Changement climatique kg éq. CO₂ | 12,4 prim.tôle 12,0 prim.prof 2,46 sec.tôle 2,06 sec.prof. 9,05 moy tôle 8,65 moy prof. | 14,4 prim.tôle 14,7 prim.prof 5,15 sec.tôle 4,75 sec.prof. 11,8 moy tôle 11,4 moy prof. | 4,2 CuAl10Fe5Ni5 2,77 Cu Sn5 3,02 CuZn30 2,63 CuZn36 1,89 Cu lingot | 2,99 Zn * 4,05 zamak* 54,1 Mg 134 alliage Mg | 3,82 ABS 5,25 POM 7,91 PA6.6 6,36 PC 310 PTFE* 3,87 PF | 6,71 PMMA 1,93 PP 3,11 PS granu. 3,56 PS expan. 4,20 PUR rigi. 6,69 EP liquid | 1,95 PEBD 1,99 PEHD 2,91 PET 2,92 PVC tuyau 2,30 PVC moulé 2,64 EPDM |
| Pollution de l'air m³ | 2320 prim.tôle 2290 prim.prof 480 sec.tôle 449 sec.prof. 1710 moy tôle 1680 moy prof. | 2170 prim.tôle 2140 prim.prof 326 sec.tôle 295 sec.prof. 1560 moy tôle 1530 moy prof. | 5850 CuAl10Fe5... 6210 Cu Sn5 4610 CuZn30 4320 CuZn36 5540 Cu lingot | 62,7 Zn * 74,1 zamak* 1750 Mg 3330 alliage Mg | 193 ABS 218 POM 279 PA6.6 423 PC 14600 PTFE* 264 PF | 361 PMMA 130 PP 146 PS granu. 316 PS expan 290 PUR rigi. 617 EP liquid | 115 PEBD 202 PEHD 159 PET 143 PVC tuyau 196 PVC moulé 200 EPDM |
| Énergie primaire totale MJ | 200 prim.tôle 189 prim.prof 37,6 sec.tôle 28,0 sec.prof. 144 moy tôle 134 moy prof. | 210 prim.tôle 198 prim.prof 46,5 sec.tôle 36,9 sec.prof. 153 moy tôle 144 moy prof. | 69 CuAl10Fe5Ni5 60,5 Cu Sn5 49,2 CuZn30 45,3 CuZn36 34,0 Cu lingot | 49,4 Zn * 54,1 zamak* 28,0 Mg 38,1 alliage Mg | 96,2 ABS 114 POM 139 PA6.6 109 PC 236 PTFE* 102 PF | 117 PMMA 74,2 PP 86,9 PS granu. 96,5 PS expan 101 PUR rigi. 137 EP liquid | 80,2 PEBD 78,0 PEHD 78,0 PET 66,0 PVC tuyau 70,4 PVC moulé 102 EPDM |
| Note unique** | 1,14 prim.tôle 1,10 prim.prof 0,244 sec.tôle 0,210 sec.prof. 0,833 moy tôle 0,800 moy prof. | 1,25 prim.tôle 1,22 prim.prof 0,359 sec.tôle 0,325 sec.prof. 0,949 moy tôle 0,916 moy prof. | 0,93 CuAl10Fe5... 0,93 Cu Sn5 0,673 CuZn30 0,680 CuZn36 0,756 Cu lingot | 0,336 Zn * 0,373 zamak* 3,77 Mg 6,97 alliage Mg | 0,494 ABS 0,663 POM 0,758 PA6.6 0,705 PC 17,2 PTFE* 0,540 PF | 0,721 PMMA 0,301 PP 0,419 PS granu. 0,479 PS expan 0,490 PUR rigi. 0,775 EP liquid | 0,310 PEBD 0,303 PEHD 0,346 PET 0,344 PVC tuyau 0,363 PVC moulé 0,380 EPDM |
| Observations (voir aussi***) | primaire et secondaire | tôle et profilé alu moyen | Cupro-alumin., bronze et laiton | * en lingot | * film de PTFE | PMMA en perles granulé expansé | Polyéthylène et PVC |

***** Liste des matériaux industriels parmi les plus utilisés servant de base à l'élaboration des deux tableaux (extraits FD E 01-008)**

| | |
|--|--|
| Aciers non alliés | S185 (A33), S235 (E24), S275 (E28), S365 (E36), E280, E360, C20C (XC18), C25 à C60 (XC25 à XC60, C40 (XC42)-p.162 |
| Aciers faibl. alliés | Tableau des nuances page 164 ; ces aciers, généralement destinés à être usinés, se trouvent sous forme de barres ou tôles |
| Aciers inoxydables « Inox » (page 165) | Fortes teneurs en Cr (10,5% mini) ; 1,2 % de carbone maxi. Les ferritiques sans nickel (420, 430, 440, 441) ; les austénitiques à moins de 10% de Ni (304) et ceux à plus de 10% de Ni (316) ; A noter l'impact environnemental du Ni et du Cr. 304 : X5CrNi18-10 ; 316 : X5CrNiMo18910 ; 420 : X2Cr13 ; 430 : X6Cr17 ; 440 : X105CrMo17 ; et les variantes... |
| Fontes (page 164) | Les lamellaires EN GJL 125/360 et les graphites sphéroïdales EN GJS 600-3 sont parmi les plus utilisés et employés |
| Aluminium et alliages (page 171) | L'al pur EN AW 1050A ; les Al alliés pour corroyage EN AW 2017A (AU4G), EN AW 6060, les EN AW 5083 et EN AW 5086 ; en fonderie on a les EN AC-AISI10Mg (AS10G) et EN AC-AISI9Cu3Fe (ASSU3) |
| Cuivre et alliages (page 173) | Le Cu pur Cu-DHP ; le cupro alu CuAl10Fe5Ni5 ; les laitons CuZn39Pb2, CuZn36, Cu Zn40ou Cu Zn20 ; le bronze courant CuSn5Pb5Zn5 (robinetterie...) |
| Zinc et alliages | Les Zamaks 3 (Zn Al) et Zamak 5 (ZnAl4Cu1) sont les plus courants ; voir aussi page 176 |

| Produits mécaniques – Données environnementales (extraits FD E 01-008)- tableau 2 | | | | | | | |
|---|---|--|--|---|--|--|---|
| Indicateur environnemental | Fraisage (1kg) | Perçage (1kg) | Tournage (1kg) | Tréfilage - Extrusion Embouissage (1kg) | Laminage (1kg) | Soudage acier 1kg galvanisat. 1m ² | Plastiques transformation (1kg) |
| Changement climatique kg éq. CO₂ | 3,70 fonte 5,38 acier 11,5 alumi. 9,01 inox | 3,03 fonte 3,42 acier 9,89 alumi. 6,27 inox 3,94 laiton | 3,28 fonte 3,69 acier 10,3 alumi. 6,66 inox 4,18 laiton | 0,313 embout. Acier 0,368 extr.tube acier 0,594 ext. profilé alu 0,339 tréfilage acier 0,286 tréfilage cuivre | 0,263 acier à froid 0,218 acier/chaud 0,357 inox à froid 0,361 aluminium 0,256 cuivre | 0,123 soud. arc 0,156 soud. gaz 6,59 gal. par immersion 4,43 gal. continu | 0,397 calandrage laminage 0,416 extru. tuyau 1,45 inject. souffl. 1,16 soufflage |
| Pollution de l'air m³ | 716 fonte 799 acier 1900 alumi. 1550 inox | 671 fonte 681 acier 1590 alumi. 1380 inox 4690 laiton | 686 fonte 697 acier 1610 alumi. 1410 inox 4710 laiton | 17,1 embout. Acier 38,7 extr.tube acier 45,1 ext. profilé alu 35,1 tréfilage acier 236 tréfilage cuivre | 64,3 acier à froid 42,7 acier/chaud 79,6 inox à froid 38,3 aluminium 231 cuivre | 65,6 soud. arc 68,8 soud. gaz 2450 gal. par immersion 5260 gal. continu | 21,2 calandrage laminage 23,4 extru. tuyau 80,8 inject. souffl. 68,7 soufflage |
| Énergie primaire totale MJ | 59,2 fonte 93,1 acier 190 alumi. 160 inox | 44,8 fonte 50,9 acier 151 alumi. 101 inox 61,7 laiton | 50,2 fonte 56,8 acier 165 alumi. 110 inox 67,0 laiton | 3,47 embout. Acier 4,59 extr.tube acier 18,4 ext. profilé alu 4,18 tréfilage acier 9,71 tréfilage cuivre | 6,64 acier à froid 5,24 acier à chaud 11,1 inox à froid 12,1 aluminium 6,71 cuivre | 2,09 soud. arc 2,12 soud. gaz 110 gal. par immersion 98,8gal. continu | 7,88 calandrage laminage 9,43 extru. tuyau 28,2 inject. souffl. 28,5 soufflage |
| Note unique | 0,385 fonte 0,516 acier 1,07 alumi. 0,919 inox | 0,314 fonte 0,340 acier 0,898alumi. 0,673 inox 0,804 laiton | 0,336 fonte 0,364 acier 0,935 alumi. 0,708 inox 0,826 laiton | 0,0275 embout. Acier 0,0415 extr.tube acier 0,0523 ext. profilé alu 0,0377tréfilage acier 0,0504 tréfilage cuivre | 0,0274 acier/froid 0,0227 acier/chaud 0,0397 inox à froid 0,0343 aluminium 0,0473 cuivre | 0,0143 soud. arc 0,0158 soud. gaz 0,717 gal. par immersion 0,771 gal. continu | 0,0375 calandrage laminage 0,0373 extru. tuyau 0,134 inject. souffl. 0,121 soufflage |
| Observations | avec enlèvement de matière : copeaux inclus | | | sans enlèvement de matière ; Imp. énergie | | Impact énergie... | |
| Indicateur environnemental | Bois (1 m3) contreplaqué | Panneaux (1 m3) | Peintures etc. (1kg) | Emballages (1kg) | Emballages (1kg) Palette (1unité) | Verre vitrage (1kg-1m ²) | Découpe laser métal (1Heure) |
| Changement climatique kg éq. CO₂ | 106 conifère 94,6 feuillus 631 cont ext 558 cont int | 499 fibres 353 agglo. extérieur 320 agglo. int | 0,000594 eau 2,43 alk. Eau 2,84 alk. Solv 1,01 huile Hy | 1,02 carton 0,916 carton recycle 3,29 film PEBD 0,195 film bulle PEBD | 0,722 papier Kraft 1,39 papier K. blan 0,958 verre blanc 6,99 palette bois | 0,867 simple non revêtu 0,924 simple R. 31,2 double Vit. | 6,47 CO2-2700W 8;88 CO2-5000W 4,11 Yag330-500W |
| Pollution de l'air m³ | 25200conifère 21500 feuillus 92300 cont ext 74900 cont int | 36300 fibres 27900 agglo. extérieur 26300 agg. int | 0,0543 eau 267 alk. Eau 317 alk. Solv 182 huile Hy | 142 carton 57,5 carton recycle 147 film PEBD 10,8 film bulle PEBD | 101 papier Kraft 156 papier K. blan 73,3 verre blanc 1020 palette bois | 68,3 simple non revêtu 81,5 simple R. 3330 double Vit. | 987 CO2-2700W 1290 CO2-5000W 795 Yag330-500W |
| Énergie primaire totale MJ | 12400 conifère 15400 feuillus 35400 cont ext 32200 cont int | 22300 fibres 23400 agglo. extérieur 20500 agg. int | 0,00279 eau 52,1 alk. Eau 85,9 alk. Solv 79,8 huile Hy | 45,7 carton 13,9 carton recycle 91,0 film PEBD 6,76 film bulle PEBD | 60,4 papier Kraft 66,7 papier K. bla 16,7verre blanc 622 palette bois | 11,7 simple non revêtu 12,7 simple R. 463 double Vit. | 697 CO2-2700W 996 CO2-5000W 331 Yag330-500W |
| Note unique | 81,1 conifère 190 feuillus 317 cont ext 302 cont int | 66,7 fibres 49,7 agglom. extérieur 39,5 aggl. int | 0,000046 eau 0,32 alk. Eau 0,41 alk. Solv 0,29 huile Hy | 0,262 carton 0,0978 carton recycle 0,370 film PEBD 0,0270 film bulle PEBD | 0,344 papier Kraft 0,419 papier K. bla 0,100 verre blanc 2,87 palette bois | 0,0924 simple non revêtu 0,104 simple R. 2,97 double Vit. | 0,634 CO2-2700W 0,804 CO2-5000W 0,420 Yag330-500W |
| Observations | Scié, raboté | | aggloméré | huile hydraul | Emballages usuels | Kraft blanchi | R. : revêtu |
| Indicateur environnemental | Électricité 1 KWh Chaleur 1 MJ | Transports 1 tonne.km | | Fin de vie des déchets (1k) | | Fin de vie de matériaux divers (1kg) | |
| Changement climatique kg éq. CO₂ | 0,0873 basse tension France 0,0089 production chaleur (charbon 9%, fuel 5%, gaz 62%, déchets 14%) | 2,02 avion moyen courrier 0,0105 bateau océan monde 0,0481 péniche fleuve canaux 0,166 camion 16 à 32 tonnes 0,0310 train marchandise | | 1,28 déchets dangereux 0,00238 déchets inertes 0,483 déchets non dangereux | | 0,0391 aciers 0,135 aluminiums 0,0723 papiers et cartons 1,10 plastiques | |
| Pollution de l'air m³ | 22,9 basse tension France 2,58 production chaleur (charbon 9%, fuel 5%, gaz 62%, déchets 14%) | 60,1 avion moyen courrier 1,53 bateau océan monde 3,30 péniche fleuve canaux 9,59 camion 16 à 32 tonnes 4,38 train marchandise | | 119 déchets dangereux 0,233 déchets inertes 6,91 déchets non dangereux | | 5,27 aciers 14,0 aluminiums 1,97 papiers et cartons 4,79 plastiques | |
| Énergie primaire totale MJ | 13,0 basse tension France 1,34 production chaleur (charbon 9%, fuel 5%, gaz 62%, déchets 14%) | 24,7 avion moyen courrier 0,170 bateau océan monde 0,656péniche fleuve canaux 2,76 camion 16 à 32 tonnes 0,751 train marchandise | | 750 déchets dangereux 0,0665 déchets inertes 0,431 déchets non dangereux | | 0,689 aciers 0,185 aluminiums 0,413 papiers et cartons 0,665 plastiques | |
| Note unique | 0,0121 basse tension France 0,00806 production chaleur (charbon 9%, fuel 5%, gaz 62%, déchets 14%) | 0,160 avion moyen courrier 0,00130 bateau océan monde 0,00490 péniche fleuve canaux 0,0168 camion 16 à 32 tonnes 0,00386 train marchandise | | 0,0806 déchets dangereux 0,000289 déchets inertes 0,0249 déchets non dangereux | | 0,00434 aciers 0,0123 aluminiums 0,00498 papiers et cartons 0,0530 plastiques | |
| Observations | Mix production électricité avec données IEA | Impacts approvisionnement, export, fin de vie ; camions : normes EURO4 | | Modèle : méthode des stocks ; avec % de recyclage, % d'incinération et % de mise en décharge. | | | |

VIII - Compléments

| Type d'émission | Exemples usuels d'émissions |
|-----------------------|--|
| Émissions dans l'air | Matières inorganiques : Cl ₂ , CO, CO ₂ ... ; Poussières/particules : F ₂ , H ₂ S, H ₂ SO ₄ , HCL, HF, N ₂ O, NH ₃ , NO _x , SO _x ... ; Métaux : Hg, Pb, Cr, Fe, Zn, Ni... ; Matières organiques : Hydrocarbures, PCB, dioxines, phénols... |
| Émissions dans l'eau | DBO, DCO, acides, Cl ₂ , CN ₂ ⁻ , huiles, détergents, matières organiques dissoutes, F ⁻ , ions Fe, ions Hg, hydrocarbures, Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , composés organochlorés, autres métaux, autres composés d'azote, phénols, phosphates, So ₄ ²⁻ , matières en suspension... |
| Émissions dans le sol | Déchets minéraux, déchets industriels mixtes, déchets ménagers, déchets toxiques... |
| Autres émissions | Bruits, rayonnements, radiations, champs électromagnétiques, vibrations, odeurs, rejets thermiques... |

| Substances réglementées visées par le règlement (Règlement (CE) N)2037/2000 | | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|--|--|----------------------|--|--------------------|--|--|--|
| Groupe | Substance | | Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone | | Groupe | Substance | | Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone | | |
| Groupe I | Chlorofluorocarbures | | | | Groupe VIII | Hydrochlorofluorocarbures | | | | |
| | CFC1 ₃ | (CFC-11) | 1,0 | | | CHFCl ₂ | (HCFC-21) | 0,040 | | |
| | CF ₂ Cl ₂ | (CFC-12) | 1,0 | | | CHF ₂ Cl | (HCFC-22) | 0,055 | | |
| | C ₂ F ₃ Cl ₃ | (CFC-113) | 0,8 | | | CH ₂ FCI | (HCFC-31) | 0,020 | | |
| | C ₂ F ₄ Cl ₂ | (CFC-114) | 1,0 | | | C ₂ HFCI ₂ | (HCFC-121) | 0,040 | | |
| C ₂ F ₅ Cl | (CFC-115) | 0,6 | | C ₂ HF ₂ Cl ₃ | | (HCFC-122) | 0,080 | | | |
| Groupe II | Chlorofluorocarbures halogénés | | | | | C ₂ HF ₃ Cl ₂ | (HCFC-123) | 0,020 | | |
| | CF ₃ Cl | (CFC-13) | 1,0 | | | C ₂ HF ₄ Cl | (HCFC-124) | 0,022 | | |
| | C ₂ FCl ₅ | (CFC-111) | 1,0 | | | C ₂ H ₂ FCI ₃ | (HCFC-131) | 0,050 | | |
| | C ₂ F ₂ Cl ₄ | (CFC-112) | 1,0 | | | C ₂ H ₂ F ₂ Cl ₂ | (HCFC-132) | 0,050 | | |
| | C ₃ FCl ₇ | (CFC-211) | 1,0 | | | C ₂ H ₂ F ₃ Cl | (HCFC-133) | 0,060 | | |
| | C ₃ F ₂ Cl ₆ | (CFC-212) | 1,0 | | | C ₂ H ₂ F ₄ Cl | (HCFC-141) | 0,070 | | |
| | C ₃ F ₃ Cl ₅ | (CFC-213) | 1,0 | | | C ₂ H ₃ F ₂ Cl | (HCFC-142) | 0,070 | | |
| | C ₃ F ₄ Cl ₄ | (CFC-214) | 1,0 | | | C ₂ H ₃ F ₃ Cl | (HCFC-151) | 0,005 | | |
| | C ₃ F ₅ Cl ₃ | (CFC-215) | 1,0 | | | C ₃ HFCI ₆ | (HCFC-221) | 0,070 | | |
| | C ₃ F ₆ Cl ₂ | (CFC-216) | 1,0 | | | C ₃ HF ₂ Cl ₅ | (HCFC-222) | 0,090 | | |
| | C ₃ F ₇ Cl | (CFC-217) | 1,0 | | | C ₃ HF ₃ Cl ₄ | (HCFC-223) | 0,080 | | |
| | Groupe III | CF ₂ BrCl | (halon-1211) | 1,0 | | C ₃ HF ₄ Cl ₃ | (HCFC-224) | 0,090 | | |
| CF ₃ Br | | (halon-1301) | 10,0 | | | C ₃ HF ₅ Cl ₂ | (HCFC-225) | 0,070 | | |
| C ₂ F ₄ Br ₂ | | (halon-2402) | 6,0 | | | C ₃ HF ₆ Cl | (HCFC-226) | 0,100 | | |
| Groupe IV | Tétrachlorure de carbone | | | | | C ₃ H ₂ FCl ₅ | (HCFC-231) | 0,090 | | |
| | CCl ₄ | | | 1,1 | | C ₃ H ₂ F ₂ Cl ₄ | (HCFC-232) | 0,100 | | |
| Groupe I | Trichloro-1,1,1 – éthane | | | | | C ₃ H ₂ F ₃ Cl ₃ | (HCFC-233) | 0,230 | | |
| | C ₂ H ₃ Cl ₃ (2) | | | 0,1 | | C ₃ H ₂ F ₄ Cl ₂ | (HCFC-234) | 0,280 | | |
| Groupe VI | Bromure de méthyle | | | | | C ₃ H ₂ F ₅ Cl | (HCFC-235) | 0,520 | | |
| | CH ₃ Br | | | 0,6 | | C ₃ H ₃ F ₄ Cl | (HCFC-241) | 0,09 | | |
| Groupe VII | Les Hydrobromofluorocarbures | | | | | Groupe IX | bromochlorométhane | | | |
| | CHFBr ₂ | 1,00 | C ₃ HF ₅ Br ₂ | 2,0 | CH ₂ BrCl | | (halon 1011) | 0,012 | | |
| | CCHF ₂ Br | 0,74 | C ₃ HF ₆ Br | 3,3 | | | | | | |
| | CH ₂ FBr | 0,73 | C ₃ H ₂ FBr ₅ | 1,9 | | | | | | |
| | C ₂ HFBr ₄ | 0,8 | C ₃ H ₂ F ₂ Br ₄ | 2,1 | | | | | | |
| | C ₂ HF ₂ Br ₃ | 1,8 | C ₃ H ₂ F ₃ Br ₃ | 5,6 | | | | | | |
| | C ₂ HF ₃ Br ₂ | 1,6 | C ₃ H ₂ F ₄ Br ₂ | 7,5 | | | | | | |
| | C ₂ HF ₄ Br | 1,2 | C ₃ H ₂ F ₅ Br | 1,4 | | | | | | |
| | C ₂ H ₂ FBr ₃ | 1,1 | C ₃ H ₃ FBr ₄ | 1,9 | | | | | | |
| | C ₂ H ₂ F ₂ Br ₂ | 1,5 | C ₃ H ₃ F ₂ Br ₃ | 3,1 | | | | | | |
| | C ₂ H ₂ F ₃ Br | 1,6 | C ₃ H ₃ F ₃ Br ₂ | 2,5 | | | | | | |
| | C ₂ H ₃ FBr ₂ | 1,7 | C ₃ H ₃ F ₄ Br | 4,4 | | | | | | |
| | C ₂ H ₃ F ₂ Br | 1,1 | C ₃ H ₄ FBr ₃ | 0,3 | | | | | | |
| | C ₂ H ₃ F ₃ Br | 0,1 | C ₃ H ₄ F ₂ Br ₂ | 1,0 | | | | | | |
| | C ₃ HFBr ₆ | 1,5 | C ₃ H ₄ F ₃ Br | 0,8 | | | | | | |
| | C ₃ HF ₂ Br ₅ | 1,9 | C ₃ H ₄ F ₄ Br ₂ | 0,4 | | | | | | |
| | C ₃ HF ₃ Br ₄ | 1,8 | C ₃ H ₅ F ₃ Br | 0,8 | | | | | | |
| | C ₃ HF ₄ Br ₃ | 2,2 | C ₃ H ₆ FBr | 0,7 | | | | | | |

Remarque : le règlement prévoit la limitation de la production des diverses substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Le règlement s'applique à la production, à l'importation, à l'exportation, à la mise sur le marché, à l'utilisation, à la récupération, au recyclage, à la régénération et à la destruction de ces substances.

Les normes GPS

Utilisées en conception, industrialisation et vérification, les normes GPS (*Geometrical Product Specification*) concernent la spécification géométrique des produits ou pièces à fabriquer. Elles regroupent un ensemble de normes internationales ISO ayant pour objet la terminologie, les définitions, la représentation symbolique, les principes de mesure, le matériel et son étalonnage, la conformité et la non conformité, etc.

Le dessin de définition d'une pièce (exemple page 601), réalisé par le bureau d'études, est le document contractuel qui rassemble l'ensemble de toutes les spécifications géométriques nécessaires à la réalisation. Il est utilisé par les différents acteurs de l'entreprise, au besoin des sous-traitants, pour mettre en œuvre les procédés de fabrication et les procédures de contrôle. Par leur universalité, les normes GPS créent un langage commun entre les intervenants, permettent de décoder sans ambiguïtés et sans interprétations les diverses spécifications, donnent des règles et procédures pour éviter une trop grande variabilité des mesures et interviennent dans l'évaluation et la définition de la conformité des pièces fabriquées.

Remarques : les normes GPS, qui sont toutes des normes ISO, sont référencées par l'AFNOR sous diverses classifications : NF EN ISO... ; FD ISO... Voir page 620.

Démarches en conception et contrôle (voir ISO 14460-1 et 2 page 602) : le concepteur travaille à partir de données théoriques (modèle nominal) de la pièce. Le bureau des méthodes ou département de contrôle suit une procédure bien définie à partir de la pièce fabriquée de laquelle il extrait une représentation approchée (élément extrait) à partir d'un nombre fini de points. Celle-ci est ensuite modélisée (modèle associé) sous une forme géométriquement parfaite afin d'être comparée au modèle nominal et vérifier la conformité aux spécifications du dessin.

| Description et contenus des maillons de la matrice GPS générale (NF EN ISO 14638) | | | |
|--|-------------------------------|---|---|
| Maillon | Intitulé | Rôle des normes du maillon | Exemple de norme |
| A | Symboles et indications | Définir les symboles, indications et modificateurs pour la cotation avec les règles à utiliser... | ISO 1302 : indication des états de surface |
| B | Exigences de l'élément | Définir les zones de tolérances, contraintes, caractéristiques associées aux symboles du A | ISO 286 : IT et écarts des ajustements pour arbres et alésages |
| C | Propriétés de l'élément | Définir les caractéristiques et conditions (partition, extraction, filtrages...) des éléments du B pour permettre la comparaison entre réel (pièce) et modèle (cotation dessin) | ISO 14460-2 : éléments géométriques comme la ligne médiane extraite |
| D | Conformité et non-conformité* | Définir les exigences pour comparer les exigences de la spécification (cotation) avec les résultats de la vérification ou mesure (réel) | ISO 14253-1 : vérification par mesure-règles pour prouver la conformité ou la non-conformité. |
| E | Mesurage | Définir les exigences pour mesurer les caractéristiques et les conditions des éléments (réel ou pièce) | ISO/TR 16015 : erreurs systématiques de mesure dues aux influences thermiques |
| F | Équipement de mesure | Définir les exigences relatives à l'équipement utilisé pour le mesurage du E | ISO 10360 : performance des machines à mesurer tridimensionnelles |
| G | Étalonnage | Définir les exigences liées à l'étalonnage et aux modes opératoires pour étalonner les équipements de mesure du F | ISO/Dis 3650 : cales étalons |
| <p>Chaîne de normes : ensemble de normes, toutes relatives à une même propriété ou spécification géométrique (chaque chaîne est constituée de sept maillons repérés de A à G)</p> <p>* Nouveau maillon de la matrice qui passe ainsi de 6 à 7 maillons.</p> | | | |

Matrice GPS générale : Les lignes concernent les caractéristiques géométriques et les colonnes (maillons), les considérations et exigences nécessaires à leur compréhension.

Dans chaque case de la matrice il y a au moins une norme (« ISO GPS générale »). Si l'ordre des lignes n'a pas d'importance, celui des colonnes correspond à l'ordre naturel de lecture d'un dessin. Elle permet d'indiquer les domaines d'application de chaque norme et les relations entre les normes GPS générales

| Modèle de matrice GPS générale (NF EN ISO 14638) avec indication de normes GPS usuelles (NF EN ISO... ;FD...) | | | | | | | |
|---|---|---|--|--|---|---|---|
| Catégorie de propriétés géométriques | Maillons | | | | | | |
| | A | B | C | D | E | F | G |
| | Symboles et indications | Exigences de l'élément | Propriétés de l'élément | Conformité et non conformité | Mesurage | Équipement de mesure | Étalonnage |
| Taille ** | ISO 129-1&2 ISO 286-1&2 ISO 1119 ISO 2538-1 ISO 2692 ISO 22768-1* ISO 14405-1 | ISO 286-1&2 ISO 1119 ISO 2538-1 ISO 2692 ISO 14405-1 | ISO 286-1 ISO 2692 ISO 14406 ISO 14405-1 ISO 14660-2 Série ISO 16610 | Série ISO14253 ISO/TR 16015 | ISO/TR 14253 ISO/TR 16015 Série ISO 463 | ISO 3611 ISO 3650 ISO 7863 ISO 8512 ISO 9493 ISO 13385 ISO/TR 16015 ISO/TS 23165 SérieISO 14253 SérieISO 10360 SérieISO 16610 | ISO 3650 ISO 14978 ISO/TS15530 ISO/TR16015 |
| Distance | ISO 129-1&2 ISO 2692 ISO 22768-1* ISO 14405-2 | ISO 286-1&2 ISO 14405-2 | ISO 14405-1&2 SérieISO 16610 | Série ISO 14253 ISO/TR 16015 | ISO/TR 14253 ISO/TR 16015 Série ISO 463 | ISO 7863 ISO 8512 ISO 9493 ISO 13385 ISO 463 ISO/TR 16015 SérieISO 10360 SérieISO 16610 | ISO 3650 ISO 14978 ISO/TS 15530 ISO/TR 16015 |
| Forme | ISO 1101 ISO 1660 ISO 2538-2 ISO 22768-2* ISO 2692 ISO 3040 ISO 10579 | ISO 1101 ISO 1660 ISO 2538-2 ISO 2692 ISO 3040 ISO 10579 ISO 12180-1 ISO 12181-1 ISO 12780-1 ISO 12781-1 | ISO 1101 ISO 2538-2 ISO 2692 ISO 3040 ISO 14406 ISO 10579 ISO 12180-2 ISO 12181-2 ISO 12780-2 ISO 12781-2 SérieISO 16610 | Série ISO 14253 ISO/TR 16015 | ISO 4291 ISO/TR 14203 ISO/TR 16015 Série ISO 463 | ISO 4291 ISO 14406 ISO 14978 SérieISO10360 SérieISO 16610 ISO/TR 16015 | ISO 15530 ISO 14978 ISO/TR 16015 |
| Orientation | ISO 1101 ISO 1660 ISO 2538-2 ISO 2692 ISO 22768-2* ISO 3040 ISO 5459 ISO 10579 | ISO 1101 ISO 1660 ISO 2538-2 ISO 2692 ISO 3040 ISO 5459 ISO 10579 | ISO 1101 ISO 2538-2 ISO 2692 ISO 3040 ISO 5459 ISO 14406 ISO 14460 SérieISO 16610 | Série ISO 14253 ISO/TR 16015 | ISO/TR 14253 ISO/TR 16015 Série ISO 463 | ISO/TR 16015 | ISO 15530 ISO 14978 ISO/TR 16015 |
| Position | ISO 1101 ISO 1660 ISO 2538-2 ISO 2692 ISO 3040 ISO 5458 ISO 5459 ISO 10579 | ISO 1101 ISO 1660 ISO 2538-2 ISO 2692 ISO 3040 ISO 5458 ISO 5459 ISO 10579 | ISO 1101 ISO 2538-2 ISO 2692 ISO 3040 ISO 5459 ISO 10579 SérieISO 16610 | Série ISO 14253 ISO/TR 16015 | ISO/TR 14253 ISO/TR 16015 Série ISO 463 | ISO 9493 ISO 14406 ISO 14978 SérieISO10360 SérieISO 16610 ISO/TR 16015 | ISO 15530 ISO 14978 ISO/TR 16015 |
| Battement | ISO 1101 ISO 1660 ISO 2538-2 ISO 2692 ISO 3040 ISO 5459 ISO 10579 | ISO 1101 ISO 1660 ISO 2538-2 ISO 2692 ISO 3040 ISO 5459 ISO 10579 | ISO 1101 ISO 5459 ISO 10579 ISO 14406 SérieISO 16610 | Série ISO 14253 ISO/TR 16015 | ISO/TR 14253 ISO/TR 16015 Série ISO 463 | ISO 9493 ISO 14406 ISO 14978 SérieISO10360 SérieISO 16610 | ISO 15530 ISO 14978 ISO/TR 16015 |
| État de sur-face du profil | ISO 1302 | ISO 4287 ISO 12085 SérieISO 13565 | ISO 4288 ISO 12085 ISO 13565 ISO 16610-21 | ISO 4288 Série ISO 14253 ISO/TR 16015 | ISO 4288 ISO 12085 ISO/TR 14253 ISO/TR 16015 | ISO 3274 SérieISO 25178 SérieISO 16610 ISO/TR 14253 ISO/TR 16015 | ISO 5436 ISO 12179 ISO 14978 ISO 25178 ISO/TR 16015 |
| État de sur-face surfacique | | ISO 25178-2 | ISO 14406 ISO/TS14253-4 ISO 25178-601 SérieISO 16610 | Série ISO 14253 ISO/TR 16015 | ISO/TR16015 ISO/TR14253-6 | ISO 14406 ISO 14978 SérieISO 25178 SérieISO 16610 ISO/TR 16015 | ISO 14978 ISO 25178 ISO/TR 16015 SérieISO 25178 |
| Défauts de surface | ISO 8785 | ISO 8785 | ISO/TS14253-4 ISO 14406 SérieISO 16610 | Série ISO 14253 ISO/TR 16015 | ISO/TR16015 ISO/TR14253-6 | ISO 14406 ISO 14978 SérieISO 16610 ISO/TR 16015 | ISO 14978 ISO/TR 16015 |

– En bleu les normes contenues, développées ou abordées dans cet ouvrage ;

* ou ISO 2768-1

– Les angles sont couverts par les propriétés de taille et de distance.

– Les rayons sont couverts par les propriétés de distance et de forme.

** La catégorie taille peut être subdivisée en « taille des cylindres », « taille des cônes »... ; chacune correspondant à une chaîne de normes.

| Définition et représentation d'un élément – extrait ISO 14660-1 | | | |
|---|------------------------------|--|-------------------------------|
| Dessin de définition | Objet réel ou objet fabriqué | Représentations approchées de l'objet fabriqué | |
| | | Extraction | Association |
| <p>élément nominal</p> | <p>élément réel</p> | <p>élément extrait</p> | <p>élément associé</p> |
| (« bureau d'étude ») | (« fabrication ») | (« bureau des méthodes ou département de contrôle ») | |
| <p>A : élément intégral nominal (théoriquement exact). B : élément dérivé nominal (centre, axe ou plan médian obtenu à partir de A). C : élément réel (ou pièce fabriquée constituée de surfaces réelles). D : élément intégral extrait (représentation de C obtenue par extraction d'un nombre fini de points). E : élément dérivé extrait (centre, ligne médiane ou surface médiane obtenu à partir de D). F : élément intégral associé (forme parfaite associée à D suivant conventions). G : élément dérivé associé (centre, axe ou plan médian obtenu à partir de F).</p> <p>Élément intégral : surface ou ligne de surface. Élément dérivé : centre, ligne médiane ou surface médiane issus d'éléments intégraux.</p> | | | |
| Éléments géométriques – Définitions d'éléments extraits : NF EN ISO 14660-2 | | | |
| | | | |
| <p>Ligne médiane extraite d'un cylindre : lieu des centres des cercles associés à l'ensemble des sections droites (sections AA perpendiculaires à l'axe du cylindre associé) de la surface extraite.</p> | | | |
| | | | |
| <p>Surface médiane extraite : lieu des milieux des lignes joignant les paires de points appartenant aux surfaces associées et ceci perpendiculairement au plan médian associé. Le plan médian associé est le plan médian aux deux plans parallèles associés aux surfaces extraites.</p> | | | |
| Principe d'indépendance – extrait NF EN ISO 8015 | | | |
| <p>Principe : chaque exigence dimensionnelle ou géométrique inscrite ou spécifiée sur un dessin doit être respectée en elle-même (indépendamment des autres), sauf si une relation particulière est spécifiée (exemple : exigence de l'enveloppe (E), exigence au maximum ou au minimum de matière (M) ainsi que CZ zone commune).</p> <p>Remarque : le principe s'applique aux cotes linéaires et à leurs tolérances, aux cotes angulaires et à leur tolérances, aux tolérances géométriques.</p> | | | |

Symboles normalisés pour schémas

Symboles normalisés pour schémas électriques NF EN 60617

| Nature du courant et de la tension | | Conducteurs, repérage, bornes et connexions | | | |
|--|-----------------|---|--|--|--|
| Courant continu | | Trois conducteurs | | Mise à la terre ou terre (symbole général) | |
| Courant alternatif | | Conducteur sous écran | | Conducteur, terre de protection | |
| Alternatif triphasé, neutre, 50 Hz, 400 V | 3/N ~ 50 Hz 400 | Trois conducteurs dans un même câble | | Barrette à bornes, bornier | |
| Courant redressé avec composante alternative | | Liaison flexible | | Borne ou dérivation (cercle noir) | |
| Polarité négative Polarité positive | - | Paire coaxiale | | Masse, châssis | |
| Conducteur neutre Conducteur médian | N M | Faisceau de trois conducteurs | | Équipotentialité | |

Dispositifs de connexion

| | | | | | |
|-------------------------|--|--|--|--|--|
| Prise femelle | | Barrette de connexion | | Dérivation, liaison en T | |
| Fiche mâle | | Connecteur mâle avec prise de dérivation | | Double dérivation, double liaison en T | |
| Fiche et prise associée | | Fiche et prise coaxiale | | Ensemble de connecteurs accouplés | |

Résistances - Condensateurs et inductances

| | | | | | |
|--------------------------------------|--|-------------------------------|--|--|--|
| Résistance (général) | | Condensateur (général) | | Impédance | |
| Résistance variable ou réglable | | Condensateur variable | | Thermistance | |
| Élément chauffant | | Condensateur de traversée | | Inductance, bobine | |
| Résistance variable à contact mobile | | Inductance à noyau magnétique | | Inductance variable par contact mobile et par échelons | |

Semi-conducteurs

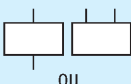
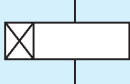
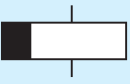

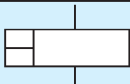
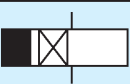

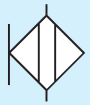
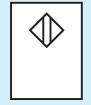
| | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|
| Diode à semiconducteur symbole général | | Diode à capacité variable | | Diode tunnel, diode Esaki | |
| Diode électroluminescente | | Diode symétrique Diac | | Diode unitunnel | |
| Diode utilisant l'effet de la température | | Diode à effet de claquage dans un seul sens, Zener | | Diode à effet de claquage dans les deux sens | |
| Détecteur à semiconducteur | | Diode Schottky | | Photodiode | |


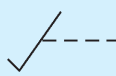



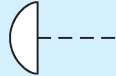
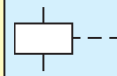

| | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| Thyristor diode bloqué en inverse | | Thyristor diode passant en inverse | | Thyristor triode type non spécifié | |
| Thyristor triode bloqué en inverse, gâchette P | | Thyristor triode passant en inverse, gâchette P | | Thyristor tétrode bloqué en inverse | |
| Thyristor triode bloqué en inverse, gâchette N | | Thyristor triode passant en inverse, gâchette N | | Thyristor triode symétrique TRIAC | |
| Transistor PNP | | Transistor avalanche NPN | | Transistor NPN avec collecteur à l'enveloppe | |
| Transistor NPN avec base polarisée transversalement | | Transistor à effet de champ type P ou N | | Transistor à jonction unique base P ou N | |
| Transistor PNIP avec connexion à la région intrinsèque | | Transistor PNIN avec connexion à la région intrinsèque | | Amplificateur à circuit intégré linéaire (ACIL) | |
| Phototransistor PNP | | Photorésistance | | Coupleur optique Photocoupleur isolateur optique | |
| Cellule photovoltaïque | | Magnétorésistance type linéaire | | Générateur Hall avec 4 connexions | |






semi-conducteurs (suite).












| Contacts - Commutateurs - Interrupteurs | | | | | |
|--|--|--|--|---|--|
| Contact à fermeture | | Contact à ouverture retardé à la fermeture | | Contact à fermeture retardé à la fermeture | |
| Contact à ouverture | | Contact à ouverture à retour automatique | | Contact à fermeture à retour automatique | |
| Contact à ouverture tardive | | Contact à ouverture anticipée | | Contact à fermeture à position maintenue | |
| Contact à fermeture tardive | | Contact à fermeture anticipée | | Contact à 2 directions et position médiane de coupure | |
| Contact à 2 directions côté 1 : retour automatique côté 2 : position maintenue | | Contact à fermeture à commande manuelle (symbole général) | | Bouton-poussoir à fermeture et à retour automatique | |
| Tirette à fermeture à retour automatique | | Bouton rotatif à fermeture sans retour automatique | | Interrupteur de position « 0 » : contact à l'ouverture | |
| Interrupteur à fermeture fonctionnant sous l'effet de la température | | Interrupteur statique (symbole général) | | Interrupteur de position « P » : contact à la fermeture | |
| Contacteur statique (à semiconducteur) | | Interrupteur agissant par effet thermique exemple : bilame | | Interrupteur agissant par effet thermique contact d'un relais thermique | |


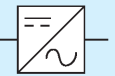














| Appareils mécaniques de connexion-Fusibles | | | | | | | |
|--|--|-------------|--|--------------------------------------|--|---------------------------|--|
| Contacteur | | Disjoncteur | | Discontacteur automatique par relais | | Fusible (symbole général) | |
| Sectionneur | | Rupteur | | Interrupteur sectionneur | | Fusible interrupteur | |

| Relais électromécanique - Capteurs | | | | | |
|---|---|--|---|---|---|
| Organes de commande d'un relais (symbole général) |  | Mise au travail retardé |  | Mise au repos retardé |  |
| Relais thermique |  | À mise au travail et mise au repos rapides |  | À mise au travail et mise au repos retardées |  |
| Capteur sensible à une proximité |  | Capteur sensible à l'effleurement |  | Dispositif sensible à une proximité (symbole fonctionnel) |  |

| Dispositifs généraux de commande | | | | | | | |
|----------------------------------|---|----------------------|---|--------------------|---|-----------------------|---|
| Actionneur manuel «cas général» |  | Par pédale |  | Par levier |  | Par clef |  |
| Par poussoir |  | Poussoir de sécurité |  | Électro-magnétique |  | Par moteur électrique |  |

| Signalisation | | | | | | | |
|---------------|--|---|--|--|--|-------------------------|--|
| Lampe |  | Ne : néon Xe : xénon I : iode Hg : mercure | ARC : arc Na : vapeur de sodium UV : ultraviolet IR : infrarouge | IN : incandescence EL : électroluminescence FL : fluorescence LED : diode électroluminescente | RD : rouge BU:bleu YE : jaune GN : vert WH : blanc | Type de lampe | |
| Clignotant |  | Sonnerie |  | Horloge (symbole général) |  | Convertisseur de signal |  |

| Appareils de mesure (cercles pour indicateurs, carrés pour enregistreurs, rectangle pour compteurs) | | | | | | | |
|---|---|---------------------------------------|---|------------------|---|------------------------|---|
| Ampèremètre |  | Voltmètre |  | Wattmètre |  | Enregistreur Wattmètre |  |
| Oscilloscope |  | Multimètre |  | Ampèreheuremètre |  | Wattheuremètre |  |
| Compteur d'impulsions électriques |  | Affichage numérique (symbole général) |  | Thermocouple |  | | |

| Machines électriques - Transformateurs - Convertisseurs - Démarreurs | | | | | | | |
|--|---|---|---|--|---|---|---|
| Redresseur |  | Onduleur |  | Démarreur (symbole général) |  | Générateur (symbole général) |  |
| Machine (symbole général) |  | * = C, G, GS... avec C = commutatrice G = génératrice M = moteur | C = commutatrice G = génératrice M = moteur | GS = générateur synchrone MG = moteur ou génératrice MS = moteur synchrone | Élément de pile ou d'accumulateur |  | |
| Moteur linéaire |  | Moteur pas à pas |  | Moteur série monophasé |  | Moteur asynchrone triphasé à rotor à court-circuit |  |
| Moteur asynchrone triphasé à rotor à bagues |  | Moteur à courant continu à excitation série |  | Moteur à courant continu à excitation en dérivation (shunt) |  | | |
| Alternateur synchrone triphasé à aimant permanent |  | Transformateurs à deux enroulements |  | Autotransformateur |  | | |

| Principaux symboles hydrauliques et pneumatiques NF ISO 1219-1, NF E 04-057 | | | | | |
|--|--|--------------------------------------|--|--|--|
| Conduites - Raccordements - Réservoirs - Accumulateurs - Sources d'énergie - Clapets | | | | | |
| Conduite de travail alimentation retour | | Raccord rapide sans clapet | | Source de pression hydraulique | |
| Conduite de pilotage | | Raccord rapide avec clapet | | Source de pression pneumatique | |
| Conduite d'évacuation des fuites | | Raccords rapides accouplés | | Réservoir à l'air : – conduite débouchant au-dessus du fluide | |
| Conduite flexible | | Raccord rotatif à une voie | | – conduite débouchant au-dessous du fluide | |
| Ligne électrique | | Raccord rotatif à trois passages | | – à conduite en charge | |
| Raccordement de conduites | | Purge d'air continue | | Réservoir sous pression d'air | |
| Croisement de conduites | | Purge d'air temporaire | | Accumulateur (position verticale seulement) | |
| Orifice ou voie fermée | | Évacuation d'air non connectable | | Accumulateur hydro-pneumatique | |
| Silencieux (air) | | Évacuation d'air connectable | | Clapet anti-retour piloté à l'ouverture | |
| Clapet de non retour sans ressort | | Clapet de non retour avec ressort | | Clapet anti-retour à étranglement réglable | |

| Appareils de conditionnement - Limiteurs de pression - Échangeurs de chaleur - Réducteurs de débits - Sélecteurs | | | | | |
|---|--|---|--|--|--|
| Filtere, crépine | | Purgeur à commande manuelle | | Purgeur à commande automatique | |
| Déshydrateur sècheur d'air | | Lubrificateur | | Limiteur de pression (soupape de sureté) | |
| Filtere avec séparateur | | Lubrificateur à purge manuelle | | Réducteur de pression détendeur | |
| Régulateur de température | | Refroidisseur ou réfrigérant | | Groupe de conditionnement d'air | |
| Réchauffeur | | Sélecteur de circuit | | Soupape d'échappement rapide | |
| Réducteur de débit ou gicleur non réglable | | Réducteur de débit ou gicleur réglable | | Diviseur de débit | |

| Appareils complémentaires | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|---------------------------|--|-------------------------|--|------------------------|--|-----------------------|--|
| Indicateur de pression | | Manomètre | | Indicateur de niveau | | Indicateur de débit | | Mesureur de couple | |
| Thermomètre | | Manomètre différentiel | | Compteur | | Débitmètre | | Tachymètre | |

| Distributeurs (principe page 497 – autres cas page 499) | | | | | |
|---|--|------------------------|--|------------------|--|
| 2/2 normalement fermé | | 3/2 normalement fermé | | Distributeur 4/2 | |
| 2/2 normalement ouvert | | 3/2 normalement ouvert | | Distributeur 5/2 | |

| Modes de commandes (voir aussi page 499) | | | | | |
|--|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--|
| Musculaire | Mécanique | Électrique | Directe par pression | | |
| manuelle générale | poussoir à palpeur | électroaimant à 1 enroulement | augmentation de pression d'huile | | |
| poussoir | ressort de rappel | à deux enroulements | augmentation de pression de l'air | | |
| avec cadenas | galet | 2 enroulements réglables | diminution de pression d'huile | | |
| pédale simple effet | lever escamotable | avec maintien en position | diminution de pression d'air | | |
| lever | dispositif de maintien en position | pilotage électropneumatique | ressort de rappel pneumatique | | |
| Dispositif de verrouillage (* symbole à insérer) | | Basculeur (détente brusque) | | Encliquetage (maintien en position) | |

| Vérins - Multiplicateurs et échangeurs de pression (voir aussi page 490 à 492) | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| Vérin simple effet rappel par force non définie (hydraulique) | | Vérin simple effet rappel par ressort (pneumatique) | | Vérin télescopique simple effet (hydraulique) | |
| Vérin double effet simple tige (pneumatique) | | Vérin double effet à double tige traversante (pneumatique) | | Vérin différentiel (hydraulique) | |
| Vérin avec amortissement fixe d'un côté (pneumatique) | | Vérin avec amortissement fixe des deux côtés (pneumatique) | | Vérin avec amortissement réglable des deux côtés | |
| Multiplicateur de pression à une nature de fluide | | Multiplicateur de pression à deux natures de fluide | | Échangeur de pression air huile | |

Pour les vérins, les triangles noirs ou non peuvent être omis (chapitre 41) s'il n'y a pas ambiguïté.

| Pompes - Moteurs - Compresseurs - Vérins (ou actionneurs) rotatifs | | | | | |
|--|-----------------------------|--|--|-----------------------------|--|
| Pompe hydrauliques | Moteurs hydrauliques | Groupes motopompes | Vérins rotatifs (à pivotement limité) | | |
| cylindrée fixe un sens de flux | | cylindrée fixe 1 sens de flux 1 sens de rotation | | hydraulique simple effet | |
| cylindrée variable et 2 sens de flux | | cylindrée fixe 2 sens de flux 2 sens de rotation | | pneumatique double effet | |
| idem avec un sens de rotation | | cylindrée variable 2 sens de flux 2 sens de rotation | | | |
| | | Compresseur | | Moteurs pneumatiques | |

| Principaux symboles pour systèmes mécaniques | | | | | | | |
|--|--|--|--|--------------------------------------|--|---|--|
| Accouplements mécaniques NF EN ISO 3952-3 | | | | | | | |
| Accouplement (symbole général) | | Accouplement rigide | | Accouplement élastique | | Accouplement compensateur de dilatation | |
| Limiteur de couple | | Embrayage (symbole général) | | Accouplement de protection à rupture | | Embrayage à denture à un sens de marche | |
| Embrayage à friction à un sens de marche | | X = M (mécanique) X = E (électromagnétique) X = P (pneumatique) X = H (hydraulique) | | Embrayage centrifuge à friction | | Embrayage à deux sens de marche | |
| Coupleur hydraulique | | Coupleur électrique (magnétique) | | Roue libre (général) | | Frein | |

| Mécanismes à friction (↓ = effort presseur et ↔ = mouvement de réglage) | | | |
|---|--------------------|------------------|---------------------------|
| À roues cylindriques | Réglable à plateau | À roues coniques | Réglable à roues coniques |
| | | | |

| Engrenages NF EN ISO 3952-2 | | | | |
|-----------------------------|--------------|-------------|---------------|--------------------------|
| Roue cylindrique | Roue conique | Roue creuse | Secteur denté | Système roue-crémaillère |
| | | | | |

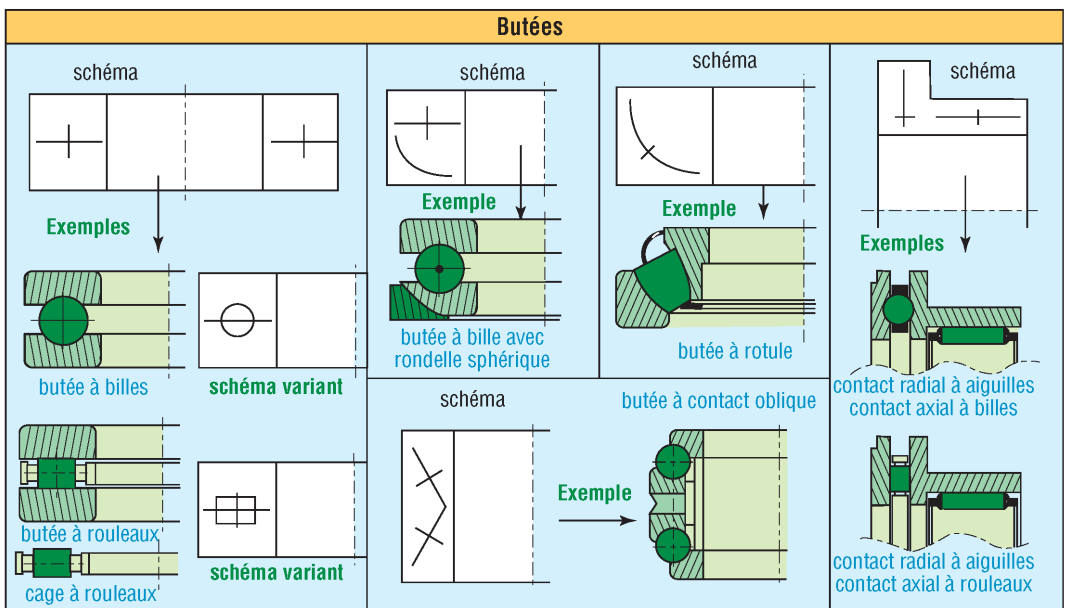
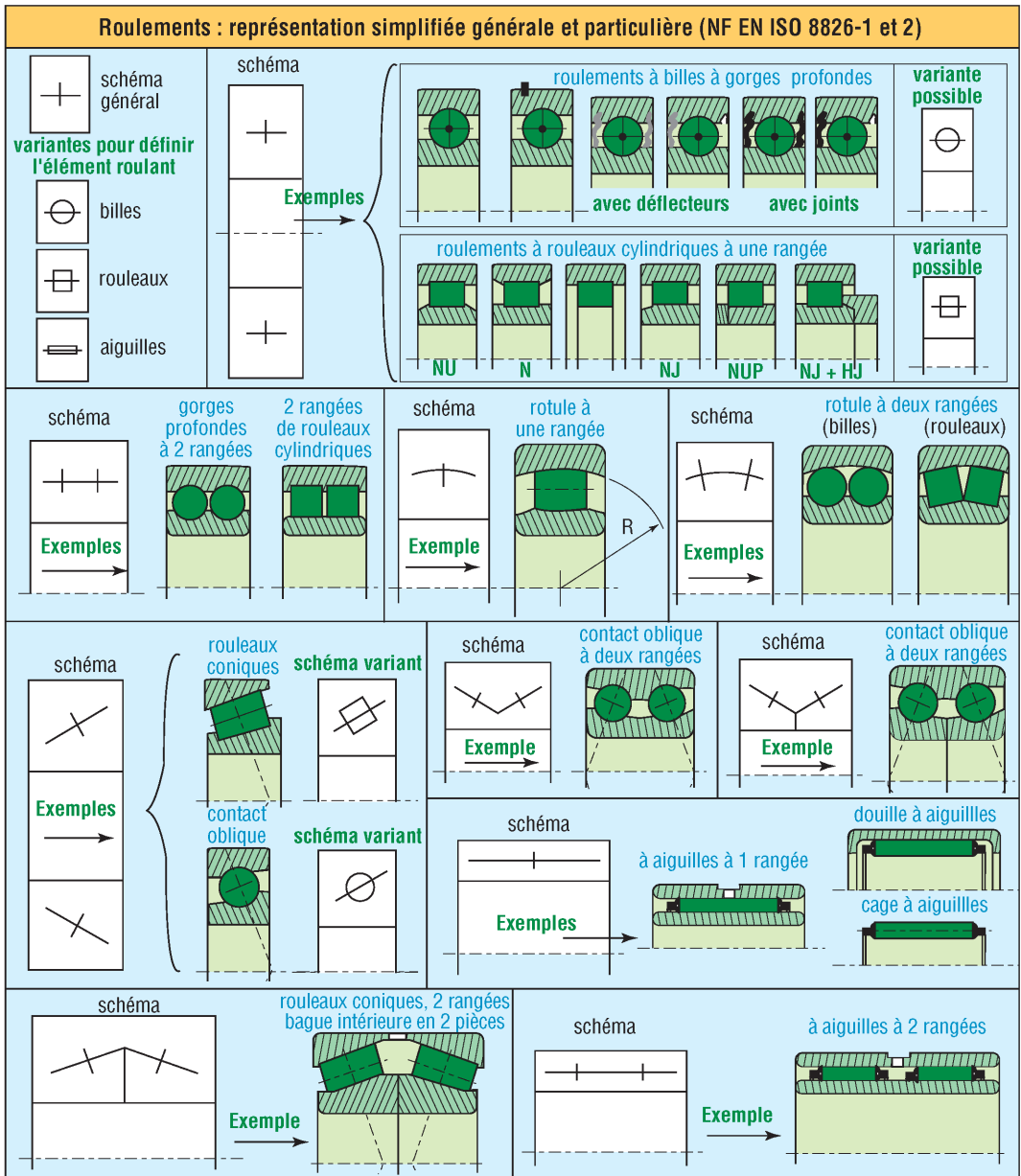
| Engrenage cylindrique extérieur | Engrenage cylindrique intérieur | Engrenage conique | Système roue et vis sans fin |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|
| | | | |

| Transmission par poulies courroies | | Transmission par roues et chaîne | |
|---|--------------|---------------------------------------|--------------|
| <p>type de la courroie (facultatif)</p> | plate | <p>type de la chaîne (facultatif)</p> | maillons |
| | ronde | | rouleaux |
| | trapézoïdale | | dents |
| | crantée | | |
| NF EN 3952-4 | | roue | pignon |
| | | | NF EN 3952-4 |

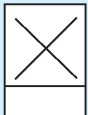
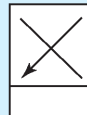
Symboles des liaisons mécaniques NF EN 23952 / ISO 3952-1 NF EN ISO 3952-1

| Nom de la liaison | Translations | Rotations | Degrés de liberté | Principales représentations planes (orthogonales) | Représentation en perspective | Exemple |
|---------------------------------------|---|-----------|-------------------|---|-------------------------------|---------|
| Encastrement ou liaison fixe | 0 | 0 | 0 | variante 1 variante 2 | | |
| Pivot | 0 | 1 | 1 | | | |
| Glissière | 1 | 0 | 1 | | | |
| Hélicoïdale | 1 + 1 Combinées (fonction du pas) | 1 | 1 | | | |
| Pivot glissant | 1 | 1 | 2 | | | |
| Sphérique ou rotule à doigt | 0 | 2 | 2 | | | |
| Rotule ou sphérique | 0 | 3 | 3 | | | |
| Appui plan | 2 | 1 | 3 | | | |
| Linéaire rectiligne * | 2 | 2 | 4 | | | |
| Sphère cylindre ou linéaire annulaire | 1 | 3 | 4 | | | |
| Sphère-plan ou ponctuelle | 2 | 3 | 5 | | | |

(*) ancienne normalisation NF E 04-015.



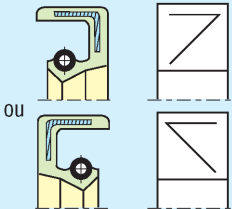

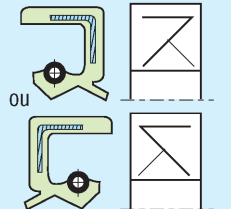

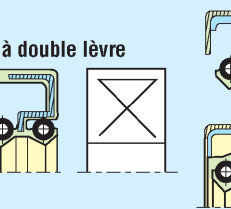
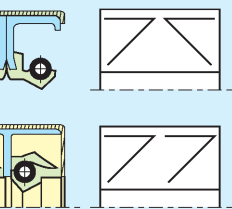
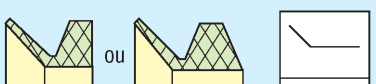
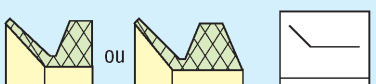
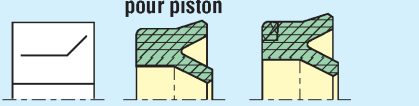
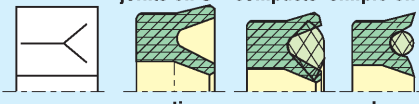
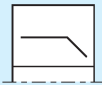


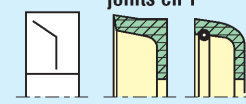
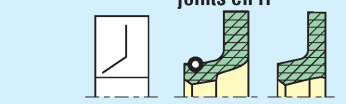
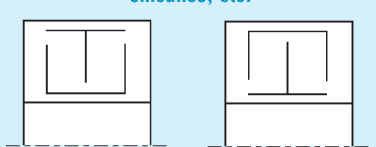
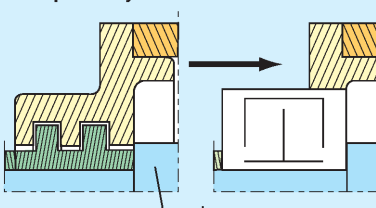
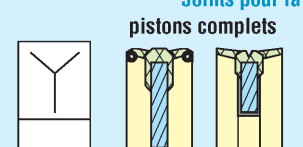

Représentation simplifiée des joints d'étanchéité dynamiques – NF EN ISO 9222-1 et 2

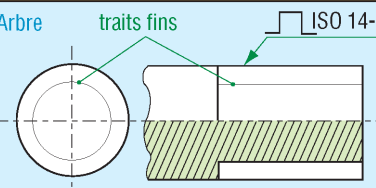
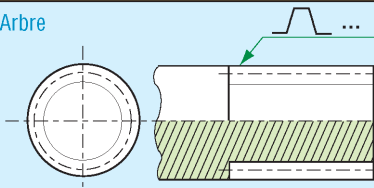
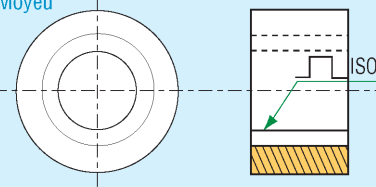
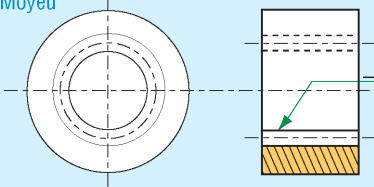
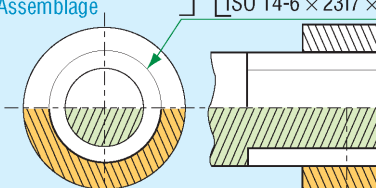
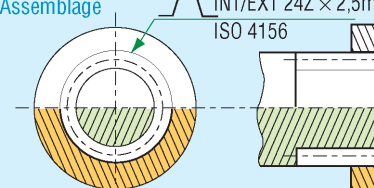
Représentation simplifiée générale

Cette représentation simplifiée est à utiliser lorsqu'il n'est pas important de montrer la forme exacte des joints d'étanchéité, par exemple dans les dessins d'assemblage. Dans les cas où il est nécessaire de préciser la direction d'étanchéité, la croix en diagonale peut être complétée par une flèche.

Représentations simplifiées particulières

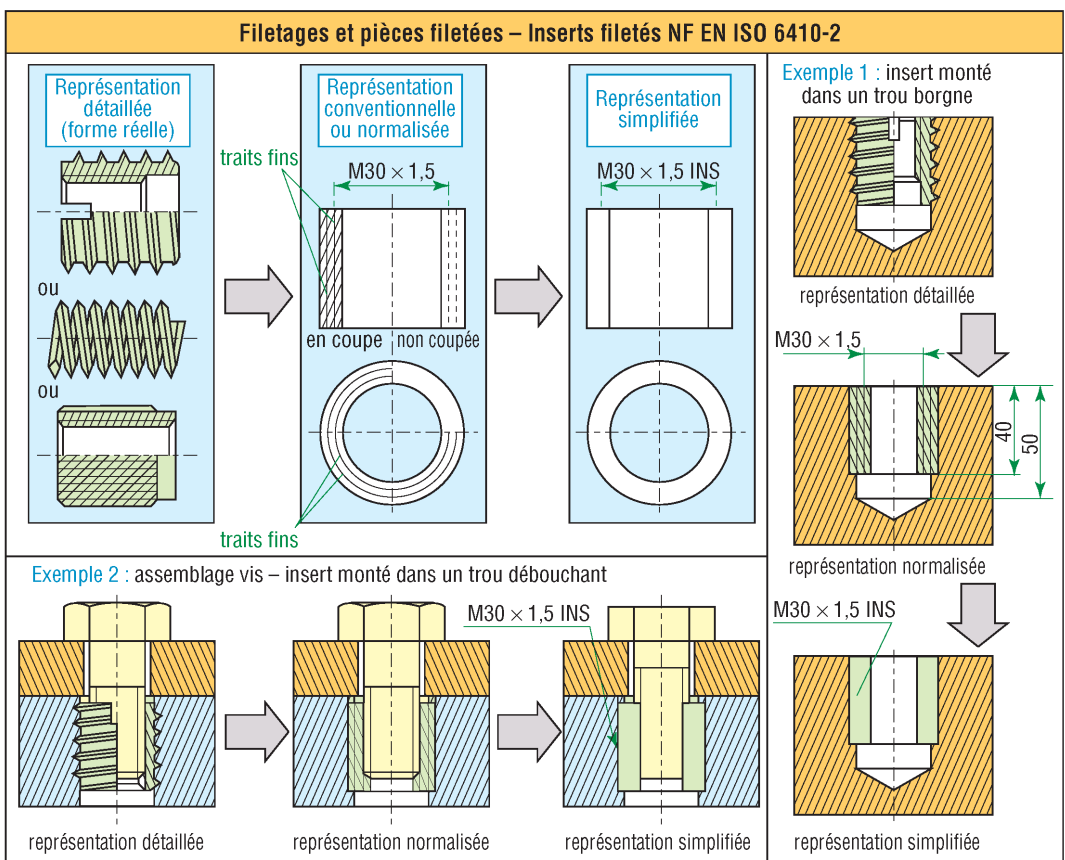
| | | |
|---|---|---|
| <p>Joint à 1 lèvre à contact radial</p>  <p>ou</p>  | <p>lèvre pare-poussière</p>  <p>ou</p>  | <p>Joints à deux lèvres à contact radial</p> <p>à double lèvre</p>  <p>joints en tandem</p>  |
| <p>Joints V-ring à contact axial</p>  <p>ou</p>  | <p>Joints pour l'hydraulique</p> <p>pour piston</p>  <p>joints en U compacts simple effet</p>  <p>pour tige</p>  <p>racleurs</p>  <p>joints chevrons</p>  <p>joints en T</p>  <p>joints en H</p>  | |
| <p>Joints à labyrinthe, chicanes, etc.</p>  <p>Exemple : labyrinthe</p>  <p>arbre</p> | <p>Joints pour la pneumatique</p> <p>pistons complets</p>  <p>joint + racleur bague d'amortissement</p>  | |

Représentations simplifiées des cannelures – NF EN ISO 6413

| Cannelures à flancs parallèles | À flancs en développante et dentelures |
|---|--|
| <p>Arbre</p> <p>traits fins</p>  <p>ISO 14-6 × 23f7 × 26</p> | <p>Arbre</p>  |
| <p>Moyeu</p>  <p>ISO 14-6 × 23f7 × 26</p> | <p>Moyeu</p>  |
| <p>Assemblage</p>  <p>ISO 14-6 × 23f7 × 26</p> | <p>Assemblage</p>  <p>INT/EXT 24Z × 2,5m × 30R × 5 H/5f ISO 4156</p> |

(Voir aussi page 248).

| Représentations simplifiées des vis, écrous et filetages – NF EN ISO 6410-3 | | | |
|---|---|--|-------------------------|
| <p>Vis à tête hexagonale</p> | <p>Vis à tête cylindrique à empreinte cruciforme</p> | <p>Vis à tête fraisée à empreinte cruciforme</p> | |
| <p>Vis à tête carrée</p> | <p>Vis à tête fraisée bombée fendue</p> | <p>Vis sans tête fendue</p> | |
| <p>Vis cylindrique à 6 pans creux</p> | <p>Vis à tête fraisée bombée à empreinte cruciforme</p> | <p>Vis à bois / Vis autotaraudeuse fendue</p> | |
| <p>Vis à tête cylindrique fendue</p> | <p>Vis à tête fraisée fendue</p> | <p>Vis à oreilles</p> | |
| <p>Écrou hexagonal</p> | <p>Écrou à créneaux</p> | <p>Écrou carré</p> | <p>Écrou à oreilles</p> |
| <p>M6 M6 × 20</p> | | <p>M6 M6 × 20/Ø4,8 × 24</p> | |



Représentation simplifiée d'assemblage au moyen d'éléments de fixation – NF ISO 5845-1

Principe généraux pour la représentation simplifiée de trous, boulons ou vis, rivets, etc. sur les dessins techniques.

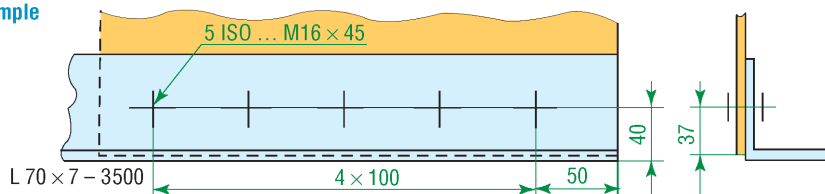
| Représentation dans un plan perpendiculaire à l'axe | | | | |
|---|---------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Trou et boulon ou rivet | Trou | | | |
| | sans fraisure | avec fraisure sur face vue | avec fraisure sur face cachée | avec fraisure sur les deux faces |
| Percé et posé à l'atelier | + | ✳ | ✳ | ✳ |
| Percé à l'atelier et posé au chantier | ✳ | ✳ | ✳ | ✳ |
| Percé et posé au chantier | ✳ | ✳ | ✳ | ✳ |

La position de l'éléments de fixation est indiquée par la croix. Les trous, vis ou rivets doivent être désignés conformément à leur norme (exemple : M12 × 50 pour un boulon de filetage M12 et de longueur 50 mm).

| Représentation sur des plans parallèles aux axes des éléments | | | |
|---|---------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Représentation des trous | Trou | | |
| | sans fraisure | avec fraisure sur une seule face | avec fraisure sur les deux faces |
| Percé à l'atelier | | | |
| Percé au chantier | | | |

| Représentations sur des plans parallèles aux axes des éléments | | | | |
|--|---------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Représentation de boulons ou rivets | Trou | | | boulon avec position de l'écrou |
| | sans fraisure | avec fraisure sur une seule face | avec fraisure sur les deux faces | |
| Posé à l'atelier | | | | |
| Posé au chantier | | | | |
| Trou percé au chantier et boulon ou rivet posé au chantier | | | | |

Exemple



| Schémas synoptiques pour systèmes, tuyauteries et instrumentation – extrait NF EN 1861* | | | | | |
|---|---|--|-------|------------------------------------|-------|
| Tuyauteries | | | | | |
| Entrée | | Fluide caloporteur | ----- | Tuyauterie réchauffée ou refroidie | ===== |
| Sortie | | Eau de refroidissement pour condenseur | ----- | Tuyauterie isolée | |
| Sens de flux | | Autres substances | ----- | Conduite de commande | +++++ |
| Fluide frigorigène | <u>circuit principal</u> <u>circuit secondaire</u> | Produit à refroidir ou à réchauffer | ===== | Connexion en T | |
| Tuyauterie souple | | Intersection sans connexion | | Connexion en croix | |

* Voir aussi NF EN ISO 10628-1 et 2 : symboles pour l'industrie chimique et pétrochimique.

| Robinets, clapets, robinets actionneurs et moteurs | | | | | | | |
|--|-----------|----------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------|----------------|
| Robinet (général) | | À soupape | | Soupape de sûreté | | D'équerre (général) | |
| Fermé normalement | | Robinet-vanne | | À commande permanente (général) | | 3 voies, côté noir fermé | |
| Robinet à papillon | | À tournant (général) | | Clapet de non retour (général) | | Non retour à battant | |
| Robinets actionneurs | manuel | pression + ressort | par piston | flotteur | pression + masse | diaphragme | solénoïde |
| Entraînement et moteurs | (général) | moteur électrique | D entraînement en général | M électrique | P pneumatique | H hydraulique | E à combustion |

| Récipients, échangeurs, filtres, ventilateurs et divers | | | | | |
|---|--|---|----------------------|---|---------|
| Allumage, brûleur (général) | | Échangeur avec intersection des conduites | | Échangeur sans intersection des conduites | |
| Chauffage ou refroidissement (général) | | Agitateur | (général) à palettes | Pulvérisateur | |
| Filtre (général) | | Filtre à liquide (général) | | Filtre à gaz (général) | |
| Turbine... | | Tour de refroidissement (général) | | Séparateur (général) | |
| Récipient (général) | | Récipient avec garniture d'étanchéité | | Récipient avec chicanes | |
| Récipient avec plateau (général) | | Ventilateur (général) | | Ventilateurs centrifuge (1) hélice (2) | (1) (2) |

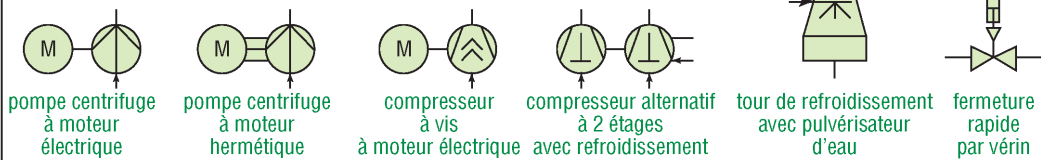
| Pompes et compresseurs | | | | | | | |
|----------------------------|-----------|-------------|-------|------------------|------------|-------------------|---------------|
| Pompes à liquide | (général) | alternative | à vis | centrifuge | engrenages | à membrane | à jet liquide |
| Compresseurs pompes à vide | (général) | alternatif | à vis | rotatif à piston | à palettes | turbo-compresseur | |

Schémas synoptiques pour systèmes, tuyauteries et instrumentation – extrait NF EN 1861

Symboles divers

| | | | | | |
|----------------------------|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|--|
| Compensateur de tuyauterie | | Sortie vers l'atmosphère | | Purgeur de vapeur | |
| Réducteur en général | | Voyant | | Balance (général) | |
| Joint démontable | | Voyant avec indicateur d'humidité | | Transporteur continu (général) | |
| Robinet démontable | | Silencieux | | Transporteur à bande | |
| Entonnoir | | Diaphragme | | Robinet à flotteur basse pression | |

Exemples de composition de symboles



Code, symboles généraux, symboles de mesure et de commande

| Codes pour identifier les fonctions et instruments | Symboles généraux pour les indications et exemples | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|---|--|---|---|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------|--------------------------------|---|------------------------------------|--|---|---|--|--|--|------------------------------|--|--|--|--|--|---|---|---|---|---|---|
| <p>A : alarme C : commande D : masse volumique (différence) E : variables électriques F : débit (rapport) G : étalonnage, position ou longueur H : manuellement I : indication J : balayage K : durée (ou programme de...) L : niveau M : buée ou humidité N et O : choix utilisateur P : pression ou vide</p> <p>Q : qualité en 1^{re} lettre : analyse, conductivité, concentration... ; ou intégration ou totalisation, en lettre suivante : intégration ou sommation</p> <p>R : rayonnement nucléaire (si 1^{re} lettre) enregistrement (en lettre suivante) S : vitesse ou fréquence (si 1^{re} lettre) commutation (en lettre suivante) T : température (si 1^{re} lettre) transmission (en lettre suivante) V : viscosité W : masse ou force Z : action de secours ou de sûreté</p> | <p>Instrumentation locale → </p> <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td> PS limiteur de pression</td> <td> PSH limiteur haute pression</td> <td> PSL limiteur basse pression</td> <td> PI manomètre</td> <td> PDI manomètre différentiel</td> <td> PT transmetteur de pression</td> <td> PC commande de pression</td> </tr> <tr> <td> PZH pressostat haute pression</td> <td> LI indicateur de niveau</td> <td> LS interrupteur de niveau</td> <td> PIT indication de transmetteur</td> <td> TI thermomètre</td> <td> TT transmetteur température</td> <td> TIT transmetteur température avec indication</td> </tr> <tr> <td> TSHL commutateur thermostatique</td> <td> TI SHL commutateur thermostatique avec indication</td> <td> PZHH pressostat de sécurité haute pression</td> <td> PISHL contacteur de pression avec indication</td> <td> QI A NH₃ mesure concentration NH₃ avec indication et alarme</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table> <p>Tableau de commande à distance → </p> <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td> LT transmetteur de niveau</td> <td> LI mesurage de niveau avec indication</td> <td> TIR thermomètre avec indication et enregistrement</td> <td> LZAL valeur mini du commutateur de niveau</td> <td> LZAH valeur maxi du commutateur de niveau</td> <td> FZAL valeur mini commutateur de débit</td> </tr> <tr> <td> TZAH valeur maxi contact sécurité de température</td> <td> TZAL valeur maxi contact sécurité de température</td> <td> PZAH valeur maxi contact sécurité à pression</td> <td> PZAL valeur mini contact sécurité à pression</td> <td> PDZAL idem PZAL avec pression différentielle</td> <td> PDZAH idem PZAH avec pression différentielle</td> </tr> </table> <p>Tableau de commande local → </p> | PS limiteur de pression | PSH limiteur haute pression | PSL limiteur basse pression | PI manomètre | PDI manomètre différentiel | PT transmetteur de pression | PC commande de pression | PZH pressostat haute pression | LI indicateur de niveau | LS interrupteur de niveau | PIT indication de transmetteur | TI thermomètre | TT transmetteur température | TIT transmetteur température avec indication | TSHL commutateur thermostatique | TI SHL commutateur thermostatique avec indication | PZHH pressostat de sécurité haute pression | PISHL contacteur de pression avec indication | QI A NH ₃ mesure concentration NH ₃ avec indication et alarme | | | LT transmetteur de niveau | LI mesurage de niveau avec indication | TIR thermomètre avec indication et enregistrement | LZAL valeur mini du commutateur de niveau | LZAH valeur maxi du commutateur de niveau | FZAL valeur mini commutateur de débit | TZAH valeur maxi contact sécurité de température | TZAL valeur maxi contact sécurité de température | PZAH valeur maxi contact sécurité à pression | PZAL valeur mini contact sécurité à pression | PDZAL idem PZAL avec pression différentielle | PDZAH idem PZAH avec pression différentielle |
| PS limiteur de pression | PSH limiteur haute pression | PSL limiteur basse pression | PI manomètre | PDI manomètre différentiel | PT transmetteur de pression | PC commande de pression | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZH pressostat haute pression | LI indicateur de niveau | LS interrupteur de niveau | PIT indication de transmetteur | TI thermomètre | TT transmetteur température | TIT transmetteur température avec indication | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TSHL commutateur thermostatique | TI SHL commutateur thermostatique avec indication | PZHH pressostat de sécurité haute pression | PISHL contacteur de pression avec indication | QI A NH ₃ mesure concentration NH ₃ avec indication et alarme | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LT transmetteur de niveau | LI mesurage de niveau avec indication | TIR thermomètre avec indication et enregistrement | LZAL valeur mini du commutateur de niveau | LZAH valeur maxi du commutateur de niveau | FZAL valeur mini commutateur de débit | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TZAH valeur maxi contact sécurité de température | TZAL valeur maxi contact sécurité de température | PZAH valeur maxi contact sécurité à pression | PZAL valeur mini contact sécurité à pression | PDZAL idem PZAL avec pression différentielle | PDZAH idem PZAH avec pression différentielle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Représentation simplifiée des tuyaux et lignes de tuyauteries – EN ISO 6412-1 et 2 | | |
|--|--|---|
| Éléments représentés | Représentations orthogonales et règles générales | Représentations isométriques |
| Tuyaux (traits forts) | <p>variante 1 (à préférer) variante 2 (simplifiée)</p> <p>Avec cotation d'axe à axe</p> <p>entre génératrices extérieures de génératrice extérieure à génératrice intérieure entre génératrices intérieures</p> <p>Avec cotations entre génératrices</p> <p>DN : diamètre nominal</p> | <p>dans un plan vertical dans un plan horizontal non parallèle à un plan</p> <p>avec plans de projection auxiliaire</p> <p>Cotation</p> |
| Cotation des rayons et angles de coude | <p>R 20 30°</p> | <p>R 20 30°</p> |
| Cotation des niveaux et du sens de la pente | <p>0,2 % 3°</p> <p>génératrice du dessous à - 4,25 m axe à + 3,5 m et pente de 3°</p> | <p>+ 3 500 3°</p> |
| Croisements et raccords | <p>variante 1 variante 2 (avec mise en évidence d'un tuyau caché)</p> <p>Croisements</p> <p>Raccords non démontables (soudage)</p> | <p>Croisements</p> <p>Raccords</p> <p>soudé soudé sur site non spécifié</p> |
| Éléments de raccords | <p>DN200/DN100 DN200/DN100/DN50 DN200/DN100</p> <p>concentrique simple concentrique multiple excentré simple</p> | <p>DN200/DN100 DN200/DN100/DN50</p> |
| Supports et suspensions | <p>général fixé guidé glissant</p> | <p>45°</p> <p>dessiner les symboles en projection isométrique</p> |
| Indications complémentaires | <p>variante 1 variante 2</p> <p>vue de face vue arrière</p> <p>avec trous de passage vue de côté</p> <p>appareil voisin (mixte fin à 2 tirets) sens d'écoulement brides</p> | <p>Brides</p> |

Principaux symboles pour organigrammes (NF Z 67-010 / NF Z 67-011)

Symboles pour organigrammes de programmation (voir principaux symboles chapitre 12 : paragraphe VI)

| | | |
|--|--|--|
| Modes synchrone, parallèle, asynchrone | Une ou plusieurs voies doivent l'avoir atteint avant qu'une ou plusieurs voies qui en sortent soient utilisées, en parallèle ou suivant un ordre quelconque. | |
|--|--|--|

Symboles pour organigrammes de configuration

| | | | | | | | |
|---|--|---|--|-------------------------|--|----------------------|--|
| Unité de traitement | | Unité auxiliaire | | Mémoire principale | | Unité de commutation | |
| Unité de traitement asservie | | Mémoire auxiliaire | | Bande magnétique | | Disque | |
| Imprimante | | Tambour | | Perforateur de bandes | | Lecteur de bandes | |
| Lecteur de documents | | Affichage ou visualisation | | Entrée sur écran | | Sortie imprimante | |
| Unité d'entrée sortie (symbole général) | | Lecteur de cartes perforateur de cartes | | Unité de transformation | | Entrée manuelle | |

Symboles pour organigrammes de données

| | | | | | | | |
|------------------------------------|--|---------------------------------|--|--------------------|--|--|--|
| Symbole * général d'information | | Symbole * général de traitement | | Document imprimé | | Bande perforée | |
| Tambour magnétique | | Bande magnétique | | Disque magnétique | | Fichier | |
| Carte perforée | | Paquet de cartes | | Document d'entrée | | Document de sortie | |
| Sortie illustrée ou visualisation | | Fusion | | Séparation | | Tri | |
| Interclassement ou assortiment | | Entrée manuelle | | Opération manuelle | | Renvoi | |
| Ligne pour transfert d'information | | Lignes pour transmission | | Commentaire | | * s'utilise quand un symbole particulier n'existe pas ou n'est pas nécessaire. | |

Systeme international d'unités (SI)

| Unités de base du système international | | | Préfixes pour multiples et sous multiples | | |
|--|----------------|---------|---|---------|---|
| Nom | Unité | Symbole | Nom ** | Symbole | Facteur |
| Longueur | mètre | m | exa | E | 1 000 000 000 000 000 000 = 10 ¹⁸ |
| Angle plan | radian | rad | péta | P | 1 000 000 000 000 000 = 10 ¹⁵ |
| Angle solide | stéradian | sr | téra | T | 1 000 000 000 000 = 10 ¹² |
| Masse | kilogramme | kg | giga | G | 1 000 000 000 = 10 ⁹ |
| Temps | seconde | s | méga | M | 1 000 000 = 10 ⁶ |
| Intensité de courant électrique | ampère | A | kilo | k | 1 000 = 10 ³ |
| Température thermodynamique | degré Kelvin * | K | hecto | h | 100 = 10 ² |
| Quantité de matière | mole | mol | déca | da | 10 = 10 ¹ |
| Intensité lumineuse | candela | cd | | | 1 = 10 ⁰ |
| * 1 degré celsius (C) = 1 Kelvin (K) La température Celsius (t_c) est liée à la température thermodynamique Kelvin (T) par la relation : $T = t_c + 273,15$ (exemple : 0 C = 273,15 K) Conversion entre échelle Celsius (t_c) et échelle anglo-saxonne Fahrenheit (t_f): $t_c = (t_f - 32)/1,8$ | | | déci | d | 0,1 = 10 ⁻¹ |
| | | | centi | c | 0,01 = 10 ⁻² |
| | | | milli | m | 0,001 = 10 ⁻³ |
| | | | micro | μ | 0,000 001 = 10 ⁻⁶ |
| | | | nano | n | 0,000 000 001 = 10 ⁻⁹ |
| | | | pico | p | 0,000 000 000 001 = 10 ⁻¹² |
| | | | femto | f | 0,000 000 000 000 001 = 10 ⁻¹⁵ |
| | | | atto | a | 0,000 000 000 000 000 001 = 10 ⁻¹⁸ |

** Autres : zetta (Z) 10²¹ ; yotta (Y) 10²⁴ ; zepto (z) 10⁻²¹ ; yocto (y) 10⁻²⁴.

| Unités dérivées pour les grandeurs les plus usuelles | | | | | | | | | |
|--|--------------------|-------------------------|---------------------------------|--|--------------------|--|---|-----------------|------------------------|
| Grandeur | Symb. | Unités | | Multiples et sous-multiples ayant un nom particulier | | | Unités usuelles hors système et unités anglo-saxonnes | | |
| | | Nom et symbole | Valeur en unités de base | Nom | Symb. | Valeur SI | Nom | Symb. | Valeur SI |
| Longueur | $L, l...$ | mètre | m | angström | Å | 10 ⁻¹⁰ m | pouce (inch) | in | 25,4 mm |
| | | | | micromètre ou micron | μm | 10 ⁻⁶ m | foot (pied) | ft | 304,8 mm |
| | | | | | | | yard | yd | 0,9144 m |
| Aire ou superficie | $S, A...$ | mètre carré | m ² | hectare | ha | 10 000 m ² | pouce carré (square inch) | in ² | 6,4516 cm ² |
| | | | | are | a | 100 m ² | | | |
| Volume | V | mètre cube | m ³ | litre | L | 10 ⁻³ m ³ | gallon (UK) | | 4,546 L |
| | | | | stère | st | 1 m ³ | tonneau (navire) | | 1,13267 m ³ |
| Angle plan | $\alpha, \beta...$ | radian | rad | tour | tr | 2π rad | degré d'angle | ' | π/180 rad |
| | | | | | | | minute d'angle | '' | 1/60 |
| | | | | | | | seconde d'angle | ''' | 1/60' |
| Masse | m | kilogramme | kg | tonne | t | 1 000 kg | carat métrique | | 0,2 g |
| | | | | quintal | q | 100 kg | pound (livre) | lb | 0,4536 kg |
| | | | | | | | ounce (once) | oz | 28,349 g |
| Force | F | newton (N) | kg.m.s ⁻² | décanewton | daN | 10 N | pound-force | lbf | 0,4448 daN |
| | | | | | | | kilogramme-force | kgf | 0,981 daN |
| Moment d'une force et couple | M | newton mètre | N.m | | | | pound-force foot | lbf.ft | 1,356 Nm |
| Pression et contraintes | p | pascal (Pa) | N.m ⁻² | bar | bar | 10 ⁵ Pa | pound-force par inch carré | psi | 6894,754 Pa |
| | | | | atmosphère | atm | 1013 mbar | | | |
| Énergie-travail et quantité de chaleur | E, W | joule (J) | N.m | wattheure | Wh | 3600 J | calorie | cal | 4,1855 J |
| | | | | électron volt | eV | 1,59.10 ⁻¹⁹ J | thermie | th | 10 ⁹ cal |
| | | | | | | | frigorie | fg | -1 kcal |
| Puissance | P | watt (W) | J.s ⁻¹ | kilowatt | kW | 1000 W | cheval (vapeur) | cv | 736 W |
| | | | | | | | horsepower | hp | 746 W |
| Vitesse | v | mètre par seconde | m.s ⁻¹ | kilomètre par heure | km.h ⁻¹ | 1/3,6 m.s ⁻¹ | mile nautique | | 1,852 km |
| | | | | | | | nœud | | 1,852 km/h |
| Vitesse angulaire | ω | radian par seconde | rad.s ⁻¹ | tour par seconde | tr.s ⁻¹ | 2π rad.s ⁻¹ | tour par minute (N) | tr/min | 30 / π |
| | | | | | | | | | |
| Viscosité cinématique | ν | mètre carré par seconde | m ² .s ⁻¹ | stoke | St | 10 ⁻⁴ m ² .s ⁻¹ | Grandeurs et unités NF EN ISO 80000 – 1 à 14 | | |
| | | | | | | | | | |
| Viscosité dynamique | μ | pascal seconde | Pa.s ⁻¹ | poise | P | 0,1 Pa.s | | | |

| Grandeur (symbole) | Unités SI | | | Grandeur (symbole) | Unités SI | | | |
|---|------------------------------------|------------|----------------|---|---|----------------|----------------------|------------------|
| | Nom | Symb. | Valeur | | Nom | Symb. | Valeur | |
| Espace et temps (autres grandeurs) | | | | Électricité - Électronique - Magnétisme | | | | |
| Fréquence (f) | Hertz | Hz | s^{-1} | Quantité d'électricité (Q) | coulomb | C | A.s | |
| Accélération (a) | mètre par seconde carré | m/s^2 | m/s^2 | | Champ électrique $E(k)$ | volt par mètre | V/m | $m.kg/(A.s^3)$ |
| Accélération angulaire (α) | radian par seconde carré | rad/s^2 | rad/s^2 | | Potentiel, ddp, tension, f.é.m. (V) | volt | V | $m^2.kg/(A.s^3)$ |
| Mécanique (autres grandeurs) | | | | Résistance impédance (R) | ohm | Ω | $m^2.kg/(A^2.s^3)$ | |
| Masse volumique (ρ) | kilogramme par mètre cube | kg/m^3 | kg/m^3 | Résistivité (ρ) | ohm mètre | $\Omega.m$ | $m^3.kg/(A^2.s^3)$ | |
| Densité (d) | sans dimension | - | - | Capacité (C) | farad | F | $A^2.s^4/(kg.m^2)$ | |
| Volume massique (v) | mètre cube par kilogramme | m^3/kg | m^3/kg | Champ magnétique (H) | ampère par mètre | A/m | A/m | |
| Débit-masse (q_m) | kilogramme par seconde | kg/s | kg/s | Induction magnétique (B) | tesla | T | $kg/(A.s^2)$ | |
| Débit-volume (q_v) | mètre cube par seconde | m^3/s | m^3/s | Flux d'induction magnétique (Φ) | weber | Wb | $m^2.kg/(A.s^2)$ | |
| Quantité de mouvement (p) | kilogramme mètre par seconde | $kg.m/s$ | $kg.m/s$ | Inductance (L) | henry | H | $m^2.kg/(A^2.s^2)$ | |
| Moment cinétique (L) | kilogramme mètre carré par seconde | $kg.m^2/s$ | $kg.m^2/s$ | Réductance (R, R_m) | henry à la puissance moins un | H^{-1} | $A^2.s^2/(m^2.kg)$ | |
| Moment d'inertie (I, J) | kilogramme mètre carré | $kg.m^2$ | $m^2.kg$ | Conductance, admittance... (G) | siemens | S | $s^2.A^2/(kg.m^2)$ | |
| | | | | Conductivité (γ, σ) | siemens par mètre | S/m | $s^2.A^2/(kg.m^3)$ | |
| | | | | Optique | | | | |
| Thermodynamique | | | | Flux lumineux (Φ, Φ_v) | lumen | lm | cd.sr | |
| Coefficient de dilatation linéique (α_L) | kelvin à la puissance moins un | K^{-1} | $1/K$ | Luminance (L, L_v) | candela par mètre carré | cd/m^2 | cd/m^2 | |
| Conductivité thermique (λ) | watt par mètre et Kelvin | $W/(m.K)$ | $m.kg/(K.s^3)$ | Éclairement | lux | lx | $cd.sr/m^2$ | |
| Capacité massique (chaleur spécifique) (c) | joule par kilo et Kelvin | $J/(kg.K)$ | $m^2/(K.s^2)$ | Exposition lumineuse (H) | lux seconde | lx.s | $cd.sr.s/m^2$ | |
| Énergie interne ... | joule | J | $m^2.kg/s^2$ | Efficacité lumineuse (K) | lumen par watt | lm/W | $cd.sr.s^3/(m^2.kg)$ | |

Normes françaises : références, abréviations, classification

NF... : Norme française homologuée d'origine purement nationale, ou équivalente à une norme internationale ou européenne sans en être la reproduction intégrale.

Exemple : NF X 06-022 (norme équivalente en partie à l'ISO 2859-1).

Remarque : dans le cas d'une norme expérimentale, d'un fascicule de documentation ou d'un document nominatif enregistré on a les préfixes X, XP ou FD (exemple X 02-002).

| Répertoire des principales normes d'origine purement nationale par classes | |
|---|---|
| NF A : métallurgie NF B : carrières, céramiques, verres, réfractaires, bois NF C : électricité NF E : mécanique NF F : chemins de fer NF H : distribution physique des marchandises NF J : constructions et industries navales NF L : aéronautique et espace | NF M : combustibles et énergie nucléaire NF P : bâtiment et génie civil NF R : automobiles, motos et cycles NF S : industries diverses NF T : industries chimiques (plastiques, élastomères...) NF U : matières et objets utilisés en agriculture NF X : normes fondamentales, normes générales NF Z : administration, commerce, documentations... |

NF EN... : Norme française reproduisant intégralement une norme européenne.

Exemple : NF EN 510 (version française de la norme européenne EN 510).

NF ISO... : Norme française reproduisant intégralement une norme internationale.

Exemple : NF ISO 7266 (reproduit intégralement la norme internationale ISO 7266).

NF ISO/CEI 9075 (reproduit une norme de filiation ISO et CEI).

NF EN ISO... : Norme française reproduisant intégralement une norme européenne (EN) issue d'une filière internationale (ISO...).

Exemple : NF EN ISO 9000-1 (reproduit intégralement la norme européenne EN ISO 9000-1, laquelle reproduit la norme internationale ISO 9000-1).

| Principales abréviations utilisées dans les références de normes | | | |
|--|---|--------------|---|
| Abréviations | Signification | Abréviations | Signification |
| CD | Projet de comité ISO | EXP | Symbole des normes expérimentales |
| CECA | Communauté européenne du charbon et de l'acier | FD | Symbole des fascicules de documentation |
| CEI | Commission électrotechnique internationale (47 comités nationaux) | HD | Document d'harmonisation |
| CEN | Comité européen de normalisation | HOM | Symbole des normes homologuées |
| GENELEC | Comité européen de normalisation électrotechnique | I-ETS | Norme européenne intermédiaire de télécommunications |
| CR | Rapport du CEN | ICS | Classification internationale des normes (utilisée par l'AFNOR) |
| CSTB | Centre scientifique et technique du bâtiment | IDT | Identique (norme de même contenu et même présentation) |
| CTR | Règlementations techniques ETSI | ISO | Organisation internationale de normalisation |
| DIS | Projet de norme ISO | NEQ | Non équivalent |
| DTR | Projet de rapport technique ISO | NF | Préfixe pour désigner une norme homologuée ou enregistrée |
| DTU | Document technique unifié | R | Recommandation ISO |
| EN | Norme européenne | RE | Symbole des documents de référence |
| ENR | Symbole pour norme enregistrée | REL | En relation |
| ENV | Prénorme européenne | TBR | Support technique de l'ETSI |
| EQV | Équivalente (même contenu mais de présentation sensiblement différente) | TR | Rapport technique ISO |
| ETS | Norme européenne de télécommunications (NF ETS...) | UE | Union européenne |
| ETSI | Institut européen des normes de télécommunications | UTE | Union technique de l'électricité |
| EU | Euronorme élaborée par le CECA | XP | Préfixe pour norme expérimentale |

Index

Abaques, 130
abréviations (« CAO »), 32
accouplements (défauts), 392
accouplements rigides, 393
accouplements élastiques, 394
accumulateur, 504
aciers au carbone, 155, 161
aciers E ou A, 161
aciers faiblement alliés, 163
aciers fortement alliés, 165
aciers spéciaux XC, 162
actigramme, 434
actionneurs, 508
ajustements normalisés ISO, 84
ajustements - tableaux, 91
ajustements usuels, 90

alésage normal H, 88
algèbre de Boole, 509
alliage fer-carbone, 153
allongement pour cent A%, 146
aluminium et alliage, 170
AMDEC (méthode), 439, 453
analyse cycle de vie, 573
analyse de la valeur, 436
analyse fonctionnelle, 431
analyse descendante, 432
anneaux d'arrêts, 216
anneaux de serrage, 216
anneaux élastiques, 215
angle de pression, 341
APTE, 432
arbre de défaillance, 440
arbre normal h, 89
arête fictive, 10
articulations élastiques, 221
articulations sphériques, 259
asservissements, 531
automatique, 531
axes dentelés, 249

Bascules, 518
battement (tolérances), 109
biconiques (éléments), 250
Black (diagramme), 559
boulons, 197, 613
boulonnerie, visserie, 193
brainstorming, 454
brasage, 223, 233
Brinell (dureté), 146
Bode (diagramme), 552
Boole (algèbre de), 509
bossage, 15
bronze, 175
butées à aiguilles, 268, 311
butées à billes, 266, 305
butées à rouleaux, 268

Cahier des charges
fonctionnel (CdCF), 441
calcul des coussinets, 255
calcul des dentures, 365
calcul des roulements, 291
calcul des soudures, 237
calcul des vérins, 492
camembert (graphe), 129
cannelures, 247, 611
CAO/DAO, 17, 63
capacités de charge, 292, 297
capteurs, 508
carbonituration, 187
cardan (joint de), 397
cartes de contrôle, 451
cartouche, 8
cémentation, 187
céramiques, 138
CFAO, 32
chaînes à rouleaux, 386
chaînes de cotes, 94

chambrage, 208
Charpy (essai), 144
chronogrammes, 516
circlips, 215
circularité, 106
classes de qualité (vis), 200
clapets anti-retour, 504
clavettes, 246
coaxialité, 11
commandes CAO/DAO 2D :
aides aux tracés, 27
attribut, 31
bloc, 30
cotation, 26
dessin, 23
écran, 21
modifier, 28
plan, 21
dessins paramétrés, 31
composites, 140
concentricité, 108
cônes, 222, 252
cônes primitifs, 348
coniques (courbes), 14
construction collée, 233
construction soudée, 229
conversion dureté/R_r, 147
convertisseurs, 406
coordonnées polaires, 125
correction :
dérivée, 563
intégrale, 564
PID, 565
proportionnelle, 563
cotation :
au maximum de matière, 101
des angles, 73
des chanfreins, 75
des cônes, 98
des diamètres, 74
des filetages, 16
des profils complexes, 76
des rayons, 74
des trous, 74
emploi de la CAO/DAO, 79
fonctionnelle, 93
fonctionnelle statistique, 482
inscriptions, 71
règles générales, 77
tolérance, 73, 82
surabondante, 79
coupes :
brisées, 49
demi-coupe, 48
partielle, 49
usuelles, 45
coupleurs, 407
courroies crantées, 384
courroies plates, 374
courroies trapézoïdales, 378
coussinets, 253
critères d'état de surface, 115

critère du revers, 558
 cuivre et alliages, 173
 cylindricité, 106
 cycle de vie :
 analyse, 573
 définitions, 461, 569, 573
 impact, 574
 inventaire, 574
 phases, 573

Défauts de surface, 113
 défecteurs Z et ZF, 421
 demi-coupe, 48
 demi-vue, 39
 dentelures, 249
 densités, 137
 démarche de projet, 424
 démarche scientifique, 423
 démarreur progressif, 503
 dessin isométrique, 58
 dessin industriel manuel, 11
 dessins paramétrés, 31
 diagramme fer-carbone, 154
 diagrammes (graphes) :
 à barres, 127
 « causes-effet », 452
 de Pareto, 452
 de Gantt, 428
 FAST, 433
 K (Karnaugh), 511
 logiques, 515
 Pert, 427
 dimension nominale, 80, 83
 dimensions linéaires
 normalisées, 80
 disponibilité, 460
 disposition des vues, 35
 distributions :
 combinaisons, 479
 binomiale, 473
 exponentielle, 477
 fréquences, 465
 distributeurs :
 désignation, 500
 facteur K_v , 502
 spécialisés, 502
 symbolisation, 497
 douilles à billes, 314
 ductilité, 142
 durabilité, 461
 durée de vie, 461
 durée de vie (roulements), 291
 duretés, 145

Écart inférieur, 83
 écart supérieur, 83
 écarts des ajustements, 91
 écart-type, 467
 échangeur air-huile, 504
 échelles, 6
 éco-conception (567):
 algorithmes, 590

arbre décision, 590
 démarches, 570
 données environnementales, 597
 étiquetage, 580
 gaz effet de serre, 595
 indicateurs, 592
 ligne directrice, 593
 méthodologie, 584
 processus, 576
 écritures, 10
 écrouissage, 144
 écrous :
 à encoches, 311, 312
 freinés, 203
 serrés à la clé, 202, 580
 serrés à la main, 204
 élasticité, 141
 élastomères, 183
 éléments de référence, 103
 embrayages, 399
 éléments d'addition, 160
 éléments graphiques
 permanents, 7
 ellipses (tracés), 14, 57
 engrenages :
 coniques, 334, 348, 368
 droits à denture
 droite, 333, 335, 365
 hélicoïdaux, 334, 345, 366
 résistance de la dent, 370
 roue et vis, 335, 356, 369
 schématisations, 356
 trains classiques, 356
 trains épicycloïdaux, 359
 enveloppe (exigence), 110
 équation logique, 510
 erreur statique, 550
 erreur de traînage, 550
 essais mécaniques :
 de dureté, 145
 de fatigue, 148
 de fluage, 148
 de résilience, 144
 de traction, 142
 essai Jominy, 157
 étanchéité (joints), 417
 états de livraison des
 métaux non ferreux, 169
 états de surface, 113
 étiquetage environnemental :
 type I, 588
 type II, 587
 type III, 589
 extensométrie, 152

Fast (diagramme), 433
 fiabilité :
 composants en parallèle, 457
 composants en série, 456
 indicateurs, 456
 des roulements, 291
 filetages :

 métrique ISO, 193
 profils spéciaux, 195
 représentation, 16, 197, 612
 à droite et à gauche, 16, 197
 filets rapportés, 211
 fluage, 148, 180
 fonctions d'un produit, 429
 fonction mémoire, 517
 fonction de transfert, 539
 fontes, 166
 formats normalisés, 6
 formes usuelles, 15
 frein à disque, 404
 frein à tambour, 402
 freins d'écrous, 209
 frettage, 251
 frottement (les 4 cas), 408

Gantt (graphe de), 428
 gaz à effet de serre, 595
 glissières lisses, 313
 glissières à roulements, 314
 goujons, 208
 goupilles :
 cannelées, 213
 cylindriques, 213
 élastiques, 212
 utilisations, 212, 245
 V et cavaliers, 214
 GPS (normes), 599
 GRAFCET :
 éléments, 521
 forçage, figeage, 528
 maître et esclave, 528
 règles, 524
 structures, 525
 graisses, 412
 graisseurs, 414
 graphes :
 à barres, 127
 à 2 variables, 119
 à 3 variables, 126
 à surfaces, 129
 en coordonnées polaires, 126
 linéarisation, 124, 125

Hachures, 46
 hélice (vis), 16, 196, 351
 histogramme, 128
 homogénéité, 141
 huiles, 408

Inclinaison, 107
 inscription des cotes, 77
 inserts, 211, 612
 interchangeabilité, 82
 interférences, 344
 intersections de cylindres, 42
 intervalles de tolérance IT, 86
 irréversibilité (roue-vis), 353
 Ishikawa, 452
 isotropie, 141

Jauges de contraintes, 152
jeux, 84, 93
joints d'étanchéité :
à lèvres, 419, 611
à 4 lobes, 418
plats, 421
toriques, 417
V-ring, 421, 611
joints (accouplement) :
de cardan, 397
d'Oldham, 395
homocinétiques, 392, 398
Rzeppa (4 billes), 399
tripode, 398
Jominy (essai), 157

Laiton, 174
lamage, 15, 208
Laplace, 536
liaisons entre solides, 609
liaisons glissières, 313
limite élastique R_e , 142
limiteur de couple, 402
linéarisation (graphes), 124
localisation, 108
lois de Hooke, 142
lois statistiques :
binomiale, 413
exponentielle, 477
normale, 468
normale (table), 472
de Poisson, 474
de Poisson (table), 476
de Weibull, 478
lubrifiants, 407
lubrification, 407

Macroétape, 527
magnésium et alliages, 176
mailles (métaux), 137
maintenabilité, 459
malléabilité, 142
manchon à douille
biconique, 394
manchon à goupille, 394
manchons (roulements), 312
matériaux :
composites, 140
pour joints, 416
pour ressorts, 324
soudables, 234
matières plastiques, 177
matrice GPS, 600
maximum de matière, 83, 111
mémoires à effacement, 517
métallisation, 189
métaux, 136
métaux ferreux, 153, 161
métaux non ferreux, 169
méthode APTE, 432
méthode de Lewis, 371
méthode SADT, 434

modeleurs :
filaires, 67
surfaciques, 68
volumiques, 69
module (engrenages), 337
module d'élasticité :
longitudinal E, 142
transversal G, 142
Monge (Gaspard), 35
montages en X et en O, 280
MTBF, 456
MTTR, 459
multi-fenêtrage, 66
multiples, sous-multiples, 539

Nervures, 15, 47
nituration, 187
nomenclatures, 9
normes françaises, 620
Nyquist (diagramme), 556

Oldham (joint), 395
opérateurs booléens, 70
opérateurs logiques, 513
organigrammes, 130
organigrammes (symboles), 539

Paliers lisses, 253
palier hydrodynamique, 257
parallélisme, 107
Pareto, 452
pas (vis-écrou), 16
pas (engrenages) :
apparent, 345
axial, 350
de base, 340
normal, 345
primitif, 336, 338
réel, 345
patins à rouleaux, 317
peintures et vernis, 189
perpendicularité, 107
perspectives :
axonométrique, 56
cavalière, 61
dimétrique, 60
isométrique, 57
trimétrique, 60
Pert (diagramme), 427
photoélasticité, 151
plan de jauge, 99
plan de projection, 34
planéité, 106
plastiques, polymères, 177
portes logiques, 513
poulies courroies, 373
préactionneurs, 508
principe de l'enveloppe, 110
principe d'indépendance, 602
probabilité (notion de), 463
produit (notion de), 426

produit (fonctions), 429
profil des filetages, 193
profil en développante, 340
profils conjugués, 351
projection oblique, 61
projection orthogonale, 33
projet (notion de), 423
projet (étapes), 424

Qualité :
assurance qualité, 447
audit, diagnostic, 454
cercles de qualité, 449
conditions de réussite, 447
gestion, 446
les « non qualités », 444
méthodes et outils, 451
plan d'amélioration, 447
principales composantes, 444
qualité totale, 445
qualité des ajustements, 86
qualité des vis, 200
qualité des engrenages, 353
queue d'aronde, 15, 99

Raccordements, 15
rails de guidage, 318
rectitude, 106
recuit, 159
RDU, 496
réducteurs d'échappement, 495
réglage de jeu (système), 320
régleurs de vitesse, 495
régression linéaire, 480
régulateur de pression, 504
régulation, 532
représentation des filetages, 16
représentation des
soudures, 224
réseaux logiques, 515
résistance à la rupture R_r , 142
ressorts :
associations, 324
classification, 323
de compression à spires, 325
de traction à spires, 328
de torsion, 329
rondelles Belleville, 331
revenu, 159
rivetage, 217, 613
robinets, 614
Rockwell, 146
rondelles :
à dents, 210
à sécurité absolue, 210
Belleville, 331
d'appui, 209
élastique, 210
Grower, 210
rondelles BS (étanchéité), 421
rondelles Z (étanchéité), 421
rotules lisses, 259

roulements (étude) :
ajustements, 272
calculs, 291
charges, 262
critères de choix, 269
dimensions, 302
épaulements, 274
étanchéité, 288
lubrification, 284
règles de montage, 271
normalisation, 263, 610

roulements :
à aiguilles, 268, 310
à billes, 264, 302
à contact oblique, 265, 304
à rotules, 265, 267, 305, 308
à rlx coniques, 267, 306
à rlx cylindriques, 266, 308
butées à billes, 266, 305
butées à aiguilles, 268, 311
combinés, 268, 310
rugosité, 118

SADT (méthode), 434
schémas blocs, 534, 540
schémas cinématiques :
liaisons mécaniques, 608, 609
des engrenages, 356, 608

sections :
rabattue, 52
sortie, 52
usuelle, 50

sectionneurs, 503
sélecteur de circuit, 504
signal analogique, 508
signal numérique, 508
signal d'horloge, 508
soudage, 227
soudage (procédés), 234
soudures :
calculs, 237
cotation, 228
conception, 229
symboles, 224
standards graphiques, 18
supports élastiques, 219

surfaces gauches
(CAO/DAO), 68
symboles et schémas :
électrique/électronique, 603
hydraulique/pneumatique, 606
liaisons mécaniques, 609
organigrammes, 617
systèmes mécaniques, 608, 610
symboles métallurgiques, 137
symétrie, 108
système de l'alésage
normal H, 88
système logique séquentiel, 508
système d'unités SI, 618

Table de vérité, 510
tableaux de Karnaugh, 511
techniques de tracés, 12
temporisateurs, 519
théorème :
valeur finale, 538
valeur initiale, 538
thermodurcissables, 183
thermoplastiques, 180
titane et alliages, 176
tolérances, 73, 83, 86
tolérances (IT), 86
tolérances géométriques :
de battement, 109
de forme, 106
de position, 108
d'orientation, 107
trains d'engrenages, 355
trains épicycloïdaux, 359
traitements de surface, 185
traitements électrolytiques,
187
traitements thermiques, 156
traitements
thermochimiques, 186
traits (normalisation), 9
transformée de Laplace, 536
transmission par chaînes, 386
transmission par courroies,
373
trempabilité, 157

trempé dans la masse, 156
trempé superficielle, 186
tribologie, 407
tuyauteries, 614, 616

Unités SI, 618
unité de conditionnement,
504

Variable continue, 464
variable discrète, 464
valeur moyenne
arithmétique, 467
variance, 467
Vickers (essai), 146
Venturi, 504

vérins :
calculs, 492
fixations, 495
double effet, 490
réglage de la vitesse, 495
simple effet, 490
spéciaux, 491

vis d'assemblages :
pour métaux, 198, 612
à tôle, 206
de pression, 205
à bois, 207

vis à billes, 321
viscosités, 409
vues (dessin industriel) :
auxiliaires, 39
constructions, 41
correspondance, 36
critères de choix, 37
disposition (ISO), 35
en coupe, 45
interrompues, 38
interprétations, 40
normalisation, 36
partielles, 38
symétriques, 38
système des projections, 33

Zinc et alliages, 176

Fabrication : Maria Pauliat

Édition : Clarisse Léon-Darras

Coordination artistique : Evelyn Audureau

• **Pour la présente édition** :

**Mise en couleur, mise en page, composition, adaptation
dessins auteur** : JPM sa

• **Pour la 1^{re} édition** : **Maquette, mise en page, dessins
techniques, illustrations** : F&T

Conseil technologie et sciences : Frédéric Fabre, Fractale

Couverture : Isabelle Jalfre

Illustration de couverture : Jean-Luc Maniouloux



Jean-Louis FANCHON

Guide des sciences et technologies industrielles



Ce livre, ouvrage de référence actualisé chaque année, est destiné à tous les élèves et étudiants qui poursuivent des études en sciences et technologies industrielles (STI). Véritable outil de formation pour tous ceux qui s'initient à cette discipline et pour tous ceux qui préparent un baccalauréat ou un diplôme supérieur, il sert aussi de référence aux professionnels.

Ce guide rassemble une synthèse des savoirs et connaissances sur les sciences industrielles et les systèmes correspondants, à la fois pour comprendre, analyser, et représenter, mais aussi pour concevoir et expérimenter.

Chaque chapitre propose des éléments de cours, des références (principes, normes, données, ...), des exemples, des applications,

Les extraits de normes proposés et les simplifications parfois adoptées, ne sauraient remplacer, en usage professionnel, les documents officiels de AFNOR et les catalogues de référence des fabricants.

**OFFERT
LIVRE
EN LIGNE**

L'intégralité
de votre livre accessible
en ligne avec une simple
connexion Internet !

www.nathan.fr/livre-en-ligne

ISBN AFNOR 978-2-12-465529-8
ISBN NATHAN 978-2-09-164714-2

