



SOMMAIRE

BEKONGO BERTRAND

R : Ce nouveau programme, conformément au nouveau modèle des enseignements au Cameroun, est reparti en quatre modules. Nous précisons que ce manuel est destiné à toutes les classes de première scientifique.



Avant-propos.....p9

MODULE 1 : MESURES ET INCERTITUDES p10

Leçon 1 : Mesure des grandeurs physique et chimique.....p11

1. Les instruments de mesure et leurs qualités.....p11
 - 1.1. Les instruments de mesure (en physique et en chimie).....p11
 - 1.2. Les qualités d'un instrument de mesure : La métrologie.....p12
2. Présentation des résultats d'une mesure (partie 2).....p14
 - 2.1. La notation scientifique et les préfixes usuels.....p15
 - 2.2. Notion de chiffres significatifs et d'arrondi.....p16
3. Le jeu bilingue.....p16

Exercices.....p18

Leçon 2 : Incertitudes sur la mesure.....p19

1. Incertitudes absolue et relative.....p19
 - 1.1. Incertitude absolue.....p19
 - 1.2. Incertitude relative.....p20
2. Autres incertitudes.....p20
 - 2.1. Incertitude type.....p20
 - 2.1.1. Évaluation de type A d'une incertitude-type.....p21
 - 2.1.2. Évaluation de type B d'une incertitude-type.....p22
 - 2.2. Incertitude élargie.....p26
 - 2.2.1. Présentation.....p26
 - 2.2.2. Détermination du facteur d'élargissement k.....p26
3. Notion d'intervalle de confiance.....p27
 - 3.1. Définition.....p27
 - 3.2. Principe d'un intervalle de confiance et construction.....p27
 - 3.3. Les types d'intervalles de confiance (vocabulaire).....p28
 - 3.3.1. Intervalle de confiance unilatéral.....p28
 - 3.3.2. Intervalle de confiance bilatéral.....p29
4. Exemple de modèles utilisés en physique et chimie – Loi physique.....p29
 - 4.1. Intervalle de confiance pour la Loi d'Ohm.....p29
 - 4.2. Intervalle de confiance pour la loi des Gaz parfaits.....p30
5. Jeu bilingue.....p34

Exercices.....p35-36

**Leçon 3 : Contraintes d'une loi.....p37**

1. Définition et symbole.....p37
 - 1.1. Définition.....p37
 - 1.2. Symbole normalisé.....p37
2. Contraintes des lois physiques.....p38
 - 2.1. Contrainte élastique (Loi de Hooke).....p38
 - 2.2. Contrainte sur la loi d'Ohm.....p41
 - 2.3. Contrainte sur la loi des gaz parfaits.....p41
3. Jeu bilingue.....p41

Exercices.....p42**Exercices de synthèse.....p43****Corrigés des exercices du module 1.....p44-51****MODULE 2 : MOUVEMENTS ET INTERACTIONS.....p52****Leçon 4 : Travail d'une force.....p52**

1. Définition du travail d'une force et unité.....p52
 - 1.1. Définitions.....p52
 - 1.2. Symbole et unité du travail d'une force.....p53
 - 1.3. Travail d'une force en translation.....p53
 - 1.4. Travail d'une force en rotation.....p56
 - 1.5. Travail du poids d'un corps.....p57
2. Notion de puissance d'une force.....p58
 - 2.1. Puissance moyenne P_m p58
 - 2.2. Puissance instantanée P_i p59
 - 2.2.1. Puissance d'un solide en translation.....p59
 - 2.2.2. Puissance d'un solide en rotation.....p59
3. Jeu bilingue.....p59

Exercices.....p60-61**Leçon 5 : Énergie cinétique.....p62**

1. Définition, présentation et unité.....p62
 - 1.1. Définitions.....p62
 - 1.2. Symbole et unité de l'énergie cinétique.....p62
2. Calcul de l'énergie cinétique.....p62
 - 2.1. Cas d'un solide en translation.....p62
 - 2.2. Cas d'un solide en rotation.....p63
 - 2.3. Cas d'un solide en mouvement mixte : translation + rotation.....p64
3. Théorème de l'énergie cinétique.....p65
 - 3.1. Énoncé du théorème.....p65
 - 3.2. Applications du théorème : Notion de choc.....p66
 - 3.2.1. Choc mou.....p66
 - 3.2.2. Choc élastique, choc parfaitement élastique.....p67
4. Jeu bilingue.....p68



Exercices.....	p69
----------------	-----

Leçon 6 : Conservation de l'énergie mécanique.....p70

1. Définition et notation de l'énergie mécanique.....	p70
1.1. Définitions.....	p70
1.2. Symbole et unité.....	p70
2. Notion d'énergie potentielle.....	p70
2.1. Définition et présentation.....	p70
2.2. Les types d'énergie potentielle.....	p71
2.2.1. Énergie potentielle de pesanteur E_{pp}	p71
2.2.2. Énergies potentielles élastiques E_{pe}	p72
2.2.2.1. Énergie potentielle élastique due à la déformation d'un ressort.....	p72
2.2.2.2. Énergie potentielle de torsion.....	p73
2.2.3. Puits et barrière d'énergie potentielle.....	p74
3. L'énergie mécanique.....	p74
3.1. Transformation mutuelle des énergies.....	p74
3.2. Systèmes conservatifs.....	p74
3.3. Systèmes non conservatifs.....	p75
4. Jeu bilingue.....	p77

Exercices.....	p78-80
----------------	--------

Leçon 7 : Notion de quantité de chaleur.....p81

1. Généralité.....	p81
2. Les formes d'énergie et leur(s) source(s).....	p81
3. La notion de chaleur.....	p93
3.1. Les sources de chaleur.....	p83
3.2. Les modes de transfert de chaleur.....	p83
4. Mesurage des quantités de chaleur.....	p85
4.1. La calorimétrie.....	p85
4.2. Les types de calorimètres.....	p85
4.3. Principe des échanges de chaleur.....	p86
5. Définition de la chaleur massique d'un corps.....	p86
5.1. Notion de capacité calorifique.....	p86
5.2. Valeur en eau du calorimètre.....	p86
5.3. Chaleurs latentes de changement d'état.....	p87
5.3.1. Chaleur latente de fusion.....	p87
5.3.2. Chaleur latente de vaporisation.....	p87
6. Expression de la quantité de chaleur échangée.....	p87
7. Jeu bilingue.....	p88

Exercices.....	p89-90
----------------	--------

Exercices de synthèse.....	p91-92
----------------------------	--------

MODULE 3 : OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE.....P93

Leçon 8 : La lumière.....p93



1. Les sources de lumières.....	p93
1.1. Les sources primaires.....	p93
1.2. Les sources secondaires.....	p94
1.3. Les sources monochromatiques.....	p94
1.4. Les sources polychromatiques.....	p94
1.5. Domaines des ondes électromagnétiques.....	p95
1.6. Couleurs des corps chauffés (loi de Wien).....	p96
2. Interaction lumière-matière.....	p96
2.1. Émission et absorption.....	p97
2.2. Quantification des niveaux d'énergie de la matière.....	p98
3. Modèle corpusculaire de la lumière : le photon.....	p99
3.1. Énergie d'un photon.....	p99
3.2. Relation $E = h\nu$ dans les échanges d'énergie.....	p100
3.3. Profil spectral d'une source lumineuse.....	p100
4. Jeu bilingue.....	p100
Exercices.....	p101-102

Leçon 9 : Les lentilles sphériques minces.....

p103

1. Définition et classification des lentilles.....	p103
1.1. Définition.....	p103
1.2. Classification des lentilles.....	p104
1.2.1. Les lentilles à bords minces (convergentes).....	p104
1.2.2. Les lentilles à bords épais (divergentes).....	p104
2. Les éléments caractéristiques d'une lentille.....	p105
2.1. Centre optique.....	p105
2.2. Les foyers principaux.....	p105
2.3. Les plans focaux.....	p106
2.4. Axes et foyers secondaires.....	p106
2.5. Distance focale et vergence d'une lentille.....	p107
2.5.1. Distance focale.....	p107
2.5.2. Vergence d'une lentille.....	p107
2.5.3. Les techniques focométriques.....	p107
3. Marche des rayons lumineux.....	p111
3.1. Principe de construction.....	p111
3.2. Condition d'obtention d'une image nette (Conditions de Gauss).....	p111
3.3. Exemples de constructions d'images à travers une lentille.....	p112
4. Les formules des lentilles.....	p112
4.1. La formule de position (conjugaison).....	p112
4.2. La formule de grandissement.....	p113
5. Association des lentilles : Théorème des vergences.....	p113
6. Applications des lentilles.....	p114
7. Jeu bilingue.....	p117
Exercices.....	p118-119

Leçon 10 : L'œil réduit.....

p121

1. L'œil réduit, description et définition des points particuliers PP et PR.....	p121
--	------



1.1.	Schéma annoté de l'œil réduit.....	p122
1.2.	Points particuliers pour une vision nette.....	p122
2.	Les défauts d'accommodation de l'œil et leur méthode de correction.....	p124
2.1.	Phénomène d'accommodation.....	p124
2.2.	Les défauts d'accommodation et leur correction.....	p124
2.2.1.	La myopie.....	p124
2.2.2.	L'hypermétropie.....	p125
2.2.3.	La presbytie.....	p126
2.2.4.	L'astigmatisme.....	p126
3.	Jeu bilingue.....	p130
Exercices.....		p131-133

Leçon 11 : Les instruments d'optique.....p134

1.	Généralité.....	p134
1.1.	La mise au point.....	p135
1.2.	Le grossissement.....	p135
1.3.	La puissance.....	p135
2.	La loupe.....	p136
2.1.	Principe de fonctionnement.....	p136
2.2.	La mise au point.....	p137
2.3.	Puissance et grossissement d'une loupe.....	p137
3.	Le microscope.....	p138
3.1.	Principe de fonctionnement.....	p138
3.2.	La mise au point.....	p139
3.3.	Puissance et grossissement d'un microscope.....	p139
4.	La lunette astronomique.....	p140
4.1.	Principe de fonctionnement.....	p140
4.2.	La mise au point.....	p140
4.3.	Puissance et grossissement d'une lunette astronomique.....	p141
4.4.	Application de la lunette astronomique.....	p141
5.	Le télescope de Newton.....	p144
5.1.	Description et schéma.....	p145
5.2.	Principe de fonctionnement.....	p146
5.3.	Intérêt par rapport aux instruments à lentilles.....	p146
6.	Jeu bilingue.....	p147
Exercices.....		p148-150
Exercices de synthèse.....		p151-152

MODULE 4 : ASPECTS ÉNERGÉTIQUES DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES.....p153

Leçon 12 : Les générateurs.....p153

1.	Définition et représentations.....	p153
1.1.	Définition.....	p153
1.2.	Représentations.....	p153
1.2.1.	Symboles normalisés.....	p154
1.2.2.	Représentation en modèle de Thévenin.....	p154



1.3.	Les caractéristiques d'un générateur.....	p154
1.3.1.	La force électromotrice.....	p155
1.3.2.	La résistance interne.....	p155
1.3.3.	Caractéristique d'un générateur.....	p155
2.	La loi d'Ohm pour un générateur.....	p156
3.	Groupement des générateurs.....	p157
3.1.	Groupement en série.....	p157
3.2.	Groupement en parallèle.....	p158
3.3.	Groupement mixte.....	p159
4.	Jeu bilingue.....	p159
Exercices.....		p160

Leçon 13 : Les récepteurs.....p161

1.	Définition et représentations.....	p161
1.1.	Définition.....	p161
1.2.	Représentations.....	p161
1.2.1.	Symboles normalisés.....	p161
1.2.2.	Représentation en modèle de Thévenin.....	p162
1.3.	Les caractéristiques d'un récepteur.....	p162
1.3.1.	La force contre électromotrice.....	p162
1.3.2.	La résistance interne.....	p162
1.3.3.	Caractéristique d'un récepteur.....	p162
2.	La loi d'Ohm pour un récepteur.....	p163
3.	Groupement des récepteurs.....	p164
3.1.	Groupement en série.....	p164
3.2.	Groupement en parallèle.....	p165
4.	Jeu bilingue.....	p165
Exercices.....		p165

Leçon 14 : Le point de fonctionnement.....p165

1.	Quelques définitions.....	p167
2.	Étude d'un circuit comportant un dipôle passif et un dipôle actif.....	p167
2.1.	Détermination du point de fonctionnement : Méthode théorique.....	p167
2.2.	Détermination du point de fonctionnement : Méthode pratique.....	p168
2.3.	Polarisation du transistor.....	p169
2.3.1.	Notion de droite d'attaque.....	p169
2.3.2.	Notion de droite de charge.....	p170
3.	Généralité de la loi des mailles : La loi de Pouillet.....	p171
4.	Jeu bilingue.....	p172
Exercices.....		p173

Leçon 15 : Énergie consommée dans une portion de circuit.....p174

1.	Notion d'énergie électrique.....	p174
2.	Énergie, puissance et tension électriques.....	p175
3.	Loi de Joule : L'effet Joule.....	p175
3.1.	Définition de l'effet Joule.....	p175



3.2.	Étude expérimentale.....	p175
3.3.	Applications de l'effet Joule.....	p176
4.	Bilan énergétique et rendement d'une portion de circuit.....	p176
4.1.	Bilan énergétique dans un résistor.....	p176
4.2.	Bilan énergétique dans un électrolyseur.....	p177
4.3.	Bilan énergétique d'un moteur à courant continu.....	p177
4.4.	Bilan énergétique d'un générateur.....	p178
5.	Puissance en courant alternatif.....	p178
6.	Notion de pertes d'énergie.....	p178
7.	Jeu bilingue.....	p179
Exercices.....		p180-181
Leçon 16 : Production du courant alternatif.....		p182
1.	Rappels de magnétostatique.....	p182
1.1.	Définition du champ magnétique.....	p182
1.2.	Spectre magnétique.....	p183
2.	Champ magnétique créé par un courant.....	p183
2.1.	Expérience d'Oersted : mise en évidence.....	p183
2.2.	Caractéristiques du champ magnétique d'un courant.....	p184
2.2.1.	Les conducteurs rectilignes.....	p184
2.2.2.	Bobine plate ou conducteur circulaire à N-spires de rayon R.....	p185
2.2.3.	Solénoïde de longueur L à N-spires.....	p185
3.	Flux magnétique à travers une surface.....	p186
4.	Induction électromagnétique.....	p188
4.1.	Expérience de mise en évidence.....	p188
4.2.	Sens du courant induit.....	p188
4.3.	La force électromotrice induite.....	p189
5.	L'auto-induction.....	p189
5.1.	Mise en évidence du phénomène.....	p189
5.2.	Auto-inductance d'un circuit.....	p190
5.3.	La force électromotrice d'auto-induction.....	p191
5.4.	Tension aux bornes d'une bobine.....	p191
6.	Les alternateurs (générateurs électromécaniques).....	p191
6.1.	Rôle d'un alternateur.....	p191
6.2.	Principe de fonctionnement.....	p192
6.3.	Exemples d'alternateurs.....	p192
6.4.	Les sources de production du courant alternatif au Cameroun.....	p193
7.	Jeu bilingue.....	p193
Exercices.....		p194-195
Exercices de synthèse.....		p196-197
Éléments d'histoire de l'électricité.....		p198-199
Documentation.....		p201-202



A.P.C



AVANT - PROPOS

Cet ouvrage est conforme aux programmes des classes de Premières S de l'Enseignement Secondaire Général du Cameroun.

Nous avons voulu proposer aux élèves ainsi que aux Enseignants (es) un outil de travail utile et agréable par la clarté du cours, la rigueur du contenu, l'authenticité de l'expérimentation, la variété des exercices,...

Afin de pouvoir traiter tout le programme avec facilité, ce manuel est divisé en **16 leçons** et découpé en **4 modules**.

LE COURS Sa rédaction a été soignée et le contenu de chaque leçon a été volontairement limité. La présence d'exercices résolus dans le cours doit permettre à l'élève d'acquérir rapidement la maîtrise des concepts présentés.

LES TRAVAUX PRATIQUES L'activité expérimentale prend, dans cet ouvrage, une part très importante. Les manipulations proposées ont été testées et réalisées en Laboratoire.

LES EXERCICES Ils sont repartis en cinq (04) catégories :

1. Des **évaluations de ressources**, pour contrôler rapidement ses connaissances
2. Des **exercices d'application** ou **activités** ;
3. Des **exercices de synthèse** pour résumer un module
4. Des **évaluations de compétences**.



LE DOCUMENT Il est conçu pour ouvrir sur le monde extérieur et éveiller la curiosité. Pour laisser toute leur place à ces « Documents », qui font partie des activités support figurant au programme, leur exploitation fait l'objet d'exercices et aussi pour certaines parties des leçons.

Nous espérons que Professeurs et élèves auront autant de plaisir à utiliser cet ouvrage que nous en avons eu à le concevoir.

Nous remercions par avance tous ceux qui nous feraient parvenir critiques, suggestions et remarques.

Les Auteurs.

Le code de la propriété intellectuelle n'autorise que « **les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective** » [article L. 122-5] ; il autorise également les courtes citations effectuées dans un but d'exemple ou d'illustration. En revanche, « **toute représentation ou reproduction intégrale ou même partielle, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants cause, est illicite** » [article L. 122-4].



Leçon 1

MESURE DES GRANDEURS PHYSIQUE ET CHIMIQUE

**Activité 1** : Mesure de grandeurs 1

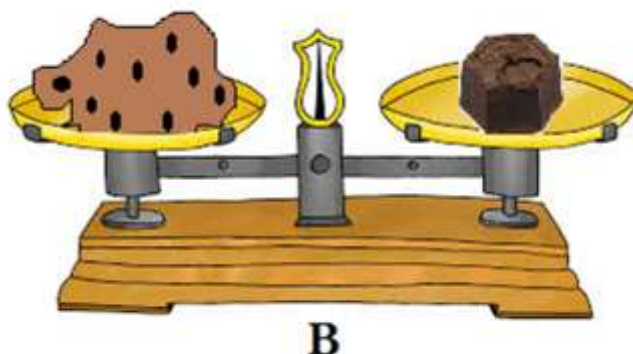
On dispose d'un morceau de caillou que l'on veut déterminer sa masse. Pour cela, on dispose de deux balances A et B. On procède par deux pesés.



ACTIVITÉS

➡ **Pesé 1**

- On introduit le caillou dans un premier temps sur la balance A et celle-ci indique : $m_1 = 172 \text{ g}$
- On introduit par la suite, le caillou sur la balance B et celle-ci indique : $m_2 = 172 \text{ g}$.

➡ **Pesé 2**

- La balance A, indique 172 g.
- Pour l'équilibre des plateaux de B, on utilise cette fois-ci, une masse marquée de 172,02 g.

Questions

Q1 : Pour quelle raison a-t-on effectué plus d'une mesure ?

Q2 : Quelle est la différence de mesure, que présente la balance B, lors du deuxième pesé ? Quel nom donne-t-on à cette différence ?

Q3 : Des balances A et B, laquelle est plus fiable ? Pourquoi ?

Activité 2 : Mesure de grandeurs 2.

On désire connaître la longueur d'un segment. Pour cela, on utilise une règle graduée de 30 cm. Les résultats des différentes mesures sont portés dans le tableau ci-dessous :

Questions

Q1 : Justifier le pourquoi de plusieurs mesures ?

Q2 : Quelle est la précision faite entre les différentes mesures ?

Mesure	Longueur
M1	$L1 = 20 \text{ cm}$
M2	$L2 = 20,01 \text{ cm}$
M3	$L3 = 20,011 \text{ cm}$



Leçon 1

MESURE DES GRANDEURS PHYSIQUE ET CHIMIQUE

Objectifs

- ⇒ Donner les qualités d'un instrument de mesure
- ⇒ Justifier le choix d'un instrument de mesure
- ⇒ Présenter les résultats d'une mesure (chiffres significatifs, notation scientifique,...)

1. Les instruments de mesure et leurs qualités

1.1. Les instruments de mesure (en physique et en chimie)

Définitions

Un **instrument de mesure** est tout instrument servant à mesurer une grandeur physique ou chimique.

Une **grandeur physique** est un élément mesurable, permettant de décrire sans ambiguïté une partie d'un phénomène physique chacune de ces grandeurs faisant l'objet d'une définition claire et précise.

Les instruments de mesure exploités en physique et en chimie sont alors :

- ✦ Les **balances**, pour la mesure des masses des corps.
Les unités exploitées sont respectivement :
 - Le **gramme** de symbole **g**, en chimie.
 - Le **kilogramme** de symbole **kg**, en physique.
- ✦ Le **mètre**, pour les mesures de longueur. L'unité est le **mètre** de symbole **m**.
- ✦ Le **thermomètre**, pour la mesure des températures. L'unité est le **Kelvin** de symbole (**K**) ou le **degré Celsius** de symbole (**°C**). Il faut noter que : $T(K) = 273 + T(^{\circ}C)$.
- ✦ Le **chronomètre**, pour mesurer le temps. L'unité ici est la **seconde** de symbole **s**.
- ✦ L'**ampèremètre**, pour la mesure de l'**intensité** du courant. L'unité ici est l'**ampère** de symbole **A**.
- ✦ Le **voltmètre**, pour la mesure de la **tension électrique**. L'unité ici est le **volt** de symbole **V**.
- ✦ Le **multimètre** : c'est l'instrument de mesure le plus connu. Il permet de mesurer les tensions et les courants en continu et en alternatif.
- ✦ L'**ohmmètre**, pour la mesure de la **résistance** des conducteurs ohmiques (**résistors**). L'unité de mesure ici est le **Ohm** de symbole (**Ω**).
- ✦ Le **fréquencemètre**, pour la mesure des **fréquences**. L'unité de la fréquence est le **Hertz** de symbole **Hz**. On distingue ici le fréquencemètre mécanique et électronique.
- ✦ Le **wattmètre** pour la mesure de la puissance. L'unité de mesure est le **Watt** de symbole (**W**).
- ✦ Le **spectrophotomètre** : c'est un appareil permettant la mesure de l'absorbance d'une solution à différente valeur de longueur d'onde.
- ✦ Le **pH-mètre**, pour la détermination du **pH** d'une solution. Les valeurs obtenues sont sans unités.
- ✦ Le **conductimètre** : c'est un appareil combinant un générateur basse-fréquence, un voltmètre et un ampèremètre.

Malgré leurs diversités, le choix d'un instrument, doit prendre en compte ses différentes qualités.



Leçon 1

MESURE DES GRANDEURS PHYSIQUE ET CHIMIQUE

1.2. Les qualités d'un instrument de mesure : la métrologie**D**éfinition

- La **métrologie**, est la science de la mesure associée à l'évaluation de son incertitude.
- La **qualité métrologique** d'un instrument de mesure, est l'ensemble des données caractérisant la qualité de la mesure effectuée par le dispositif considéré.

Les instruments de mesure se décrivent d'abord par leur mesurande i.e. ⁽¹⁾ la grandeur pour laquelle on attend une valeur numérique.

Les **qualités** d'un appareil de mesure sont ces propriétés qui définissent le choix d'un instrument de mesure. On peut alors citer :

- (i) **L'étendue de mesure** : C'est le domaine de variation possible de la grandeur à mesurer. Elle est définie par une valeur maximale et une valeur minimale. Ces deux valeurs extrêmes, s'appellent respectivement la portée maximale et la portée minimale.

Exemple

Un voltmètre peut avoir une étendue de mesure comprise entre 1 volt et 10 volts.

- (ii) La **résolution** : La résolution d'un appareil est la plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication délivrée par l'instrument. Elle peut être exprimée en **points**, qui sont alors le nombre de valeurs différentes que l'instrument peut afficher.

Exemple

Un multimètre de 2 000 points (pts) pour une étendue de 2 V peut afficher toutes les valeurs comprises entre 0,000 V et 1,999 V ; sa résolution est donc de **1 mV**.

- (iii) La **sensibilité** : C'est un paramètre exprimant la variation du signal de sortie d'un appareil en fonction de la variation du signal de sortie. C'est aussi le rapport entre l'accroissement de la réponse par l'accroissement du signal d'entrée.

Remarque

- ✍ Un appareil est d'autant plus sensible qu'une petite variation de la grandeur G à mesurer provoquera un changement plus grand de l'indication donnée par l'appareil de mesure.
- ✍ Si la valeur d'entrée est de même nature que la valeur de sortie, la sensibilité est appelée **gain**.
- ✍ Soient A , l'indication donnée par un essai et G la quantité de grandeur à mesurer. La sensibilité S de l'appareil de mesure est :

$$ou \begin{cases} S = \frac{dA}{dG} \\ S = \frac{\Delta A}{\Delta G} \end{cases} \quad (1.1)$$



On constate alors que la sensibilité correspond à la pente de la courbe de graduation sur un intervalle : il s'agit de la sensibilité moyenne.

Exemple : Cas d'un dipôle linéaire : caractéristique courant-tension : $U = f(I)$

Dans cette caractéristique, la pente de la droite $I = \frac{U}{R}$ a la dimension de l'inverse de la résistance électrique i.e. s'exprime en $\Omega^{-1} = \text{Siemens (S)}$ et porte le nom **conductance** notée **G**.

On retrouve aussi ce même résultat sur les courbes de Millikan dont la droite linéaire a pour équation

$$U = \frac{h}{e}v - \frac{E_{ext}}{e} \quad \text{de pente } \frac{h}{e}.$$

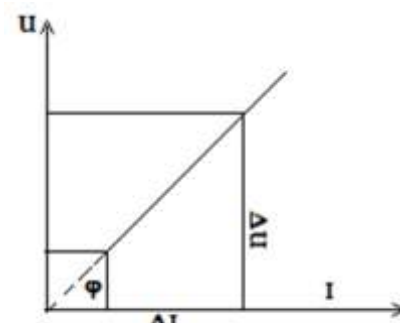


Figure 1.1 : Courbe $U = f(I)$

(iv) L'**exactitude** : C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications proches de la valeur vraie d'une grandeur à mesurer. Il faut cependant remarquer que l'exactitude ne s'exprime pas par une valeur chiffrée. C'est une appréciation qualitative des résultats. L'exactitude représente la qualité globale de l'instrument, dans les conditions données. L'erreur d'exactitude comprend l'**erreur de justesse** et l'**erreur de fidélité**. On conclue alors en disant qu'un appareil est **exact** s'il est **juste** et **fidèle**.

(v) La **justesse** : C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications affranchies (exemptes) d'erreur systématiques. L'erreur de justesse **J** est l'erreur **globale** résultant de toutes les causes pour chacun des résultats de mesure pris isolément. C'est donc l'amplitude de l'appareil à donner des résultats qui ne sont pas entachés d'erreurs.

Dans le cas de **n-valeurs** mesurées, c'est l'écart entre le résultat moyen $\overline{M}$ (**moyenne arithmétique d'un grand nombre de mesure**) et la **valeur vraie** ou **conventionnelle M** :

$$\begin{cases} J = M - \overline{M} \\ \overline{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \end{cases} \quad (1.2)$$

(vi) La **fidélité** : C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des mesures exemptes d'erreurs accidentelles. La fidélité définit la dispersion des résultats.

Si on effectue un ensemble de mesures G , on obtient une valeur maximum ($V_{\max}$) et une valeur minimum ($V_{\min}$). Les erreurs limites de fidélités sont alors :

$$\begin{cases} F_{\max} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} \\ F_{\min} = -\frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} \end{cases} \quad (1.3)$$

Exemple

Des mesures répétées d'un ampèremètre donnent : $I_{\max} = 10,02 \text{ A}$ et $I_{\min} = 9,07 \text{ A}$.

La fidélité de cet ampèremètre est alors : $F = \pm \frac{10,02 - 9,07}{2} = \pm 0,475 \text{ A}$

On peut alors représenter symboliquement la fidélité, la justesse et l'exactitude de la manière suivante :

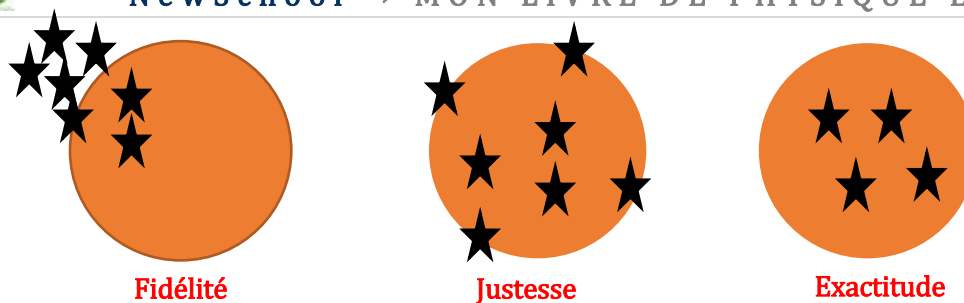


Figure 1.2 : Représentation symbolique de la fidélité, la justesse et l'exactitude en métrologie.

- (vii) La **répétabilité** : c'est l'écart observé lors des mesurages successifs d'une même grandeur dans des conditions identiques (même opérateur, même lieu, mesures effectuées successivement dans une courte période de temps, même méthode).
- (viii) La **reproductibilité** : C'est l'écart observé lors des mesurages successifs d'une même grandeur en faisant varier les conditions de mesure.

Remarque

La classe d'un instrument de mesure, est l'aptitude à satisfaire à certaines exigences d'applications métrologiques destiné à conserver les erreurs dans des limites spécifiques.

On classe alors les instruments de mesure selon la figure ci-dessous :

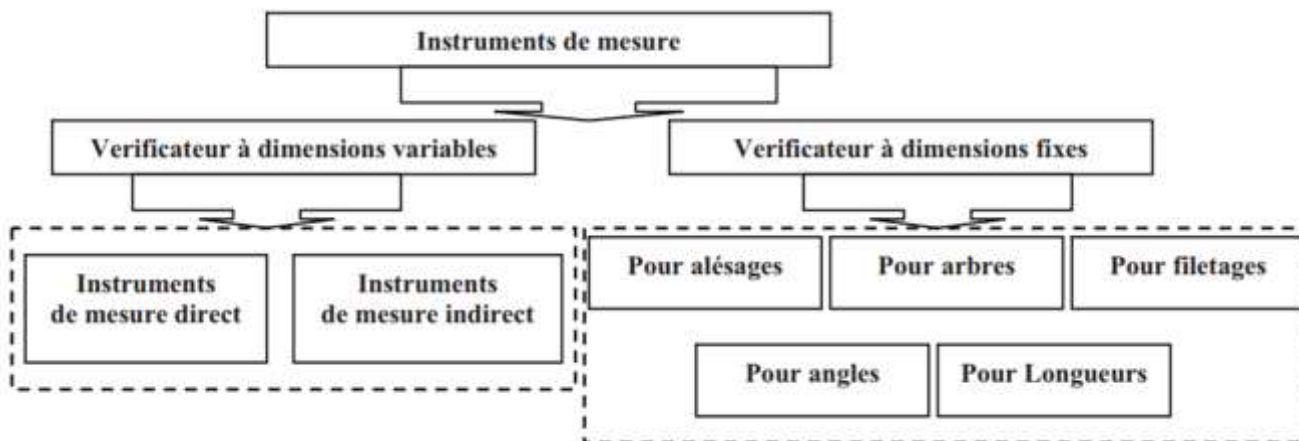


Figure 1.3 : Classification des instruments de mesure.

À présent que nous connaissons mesurer une grandeur à l'aide de l'instrument approprié, il ne reste à présent qu'à présenter numériquement les valeurs obtenues.

2. Présentation des résultats d'une mesure (partie 2)

Les résultats d'une mesure peuvent être représentés de différentes manières parmi lesquelles :

- La **notation scientifique**,
- La **méthode des chiffres significatifs (CS)**,
- La **méthode des sommes d'incertitude**,
- La **méthode des extrêmes**,
- La **méthode du calcul différentiel**.

Nous aborderons dans cette partie, la **notion de notation scientifique**, la **notion de chiffres significatifs** et la **notion d'ordre de grandeur**.



2.1. La notation scientifique et les préfixes usuels.

En exploitant la définition mathématique, la notation scientifique d'une valeur numérique est toute écriture de la forme $\alpha \times 10^n$ où $n \in \mathbb{Z}$ et α un réel supérieur ou égal à 1 et strictement inférieur à 10 ($1 \leq \alpha < 10 \setminus \{0\}$).

Exemple

La notation scientifique de 0,0158 est $1,58 \cdot 10^{-2}$; $158 = 1,58 \cdot 10^2$; $-7020,35 = -7,02035 \cdot 10^3$.

On regroupe alors les préfixes usuellement utilisés dans le tableau ci-dessous et classés dans l'ordre décroissant :

Nom	Valeur	Symbole
Téramètre	10^{12}	Tm
Gigamètre	10^9	Gm
Mégamètre	10^6	Mm
Kilomètre	10^3	Km
Mètre	10	M
Millimètre	10^{-3}	Mm
Micromètre	10^{-6}	Mm
Nanomètre	10^{-9}	Nm
Picomètre	10^{-12}	Pm
Femtomètre	10^{-15}	Fm

Exemple

$12 \text{ Tm} = 12 \cdot 10^{12} \text{ m}$; $0,233 \text{ }\mu\text{m} = 2,33 \cdot 10^{-1} \text{ }\mu\text{m} = 2,33 \cdot 10^{-1-6} \text{ m} = 2,33 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

À cela s'ajoute la notion d'**ordre de grandeur** (OG) qui permet de vérifier par un calcul rapide, la cohérence d'un calcul numérique fait à la calculatrice.

Définition

En physique, l'**ordre de grandeur** d'un résultat numérique est la puissance de dix la plus proche de ce résultat.

On distingue à cet effet deux possibilités :

- Si $\alpha < 5$, on l'arrondi à 1 et l'ordre de grandeur recherché est alors $1 \times 10^n = 10^n$: l'ordre de grandeur est la même puissance de 10 que la notation scientifique.

Exemple

Quel est l'ordre de grandeur d'une hauteur $h = 173 \text{ m}$?

La notation scientifique de h est $h = 1,73 \cdot 10^2 \text{ m}$; on constate que $\alpha = 1 < 5$, donc l'ordre de grandeur est alors $1 \times 10^2 = 10^2 \text{ m}$.

- Si $\alpha \geq 5$, on l'arrondi à 10 et l'ordre de grandeur est alors $10 \times 10^n = 10^{n+1}$.

Exemple

Quel est l'ordre de grandeur de l'épaisseur $e = 0,006 \text{ m}$ d'un poil de porc ?

La notation scientifique de e est $e = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$; on constate de $\alpha = 6 > 5$, donc l'ordre de grandeur est alors $10 \times 10^{-3} = 10^{-2} \text{ m}$.

Remarque

On peut éviter de passer par la notation scientifique en encadrant le résultat numérique entre deux puissances de dix consécutives.

Exemples

Ex.1 : Un poteau mesure une hauteur $H = 35 \text{ m}$. On constate que $10 < 35 < 100$, mais 35 est plus proche de 10 que de 100. Donc l'ordre de grandeur de H est **10 m**.



Ex.2 : Un tas de viande a une masse à la pesée de $m = 500$ kg. On constate que $100 < 500 < 1000$, mais 500 est plus proche 1000 que de 100. Donc l'ordre de grandeur est **1000 m**.

Abordons à présent la notion de chiffres significatifs.

2.2. Notion de chiffres significatifs et d'arrondi

(a) Définition et règles

- ✍ Une mesure expérimentale est toujours une approximation, elle dépend de l'appareil de mesure et de l'expérimentateur.
- ✍ Une mesure est d'autant plus précise qu'elle s'exprime avec le plus grand nombre de **chiffres significatifs** (CS).

Définition

Dans un nombre représentant le résultat d'une mesure, un chiffre est dit **significatif**, si l'instrument nous permet de le connaître avec une fiabilité suffisante.

On ne peut pas par exemple écrire 1,50 cm, la longueur d'un segment mesuré à l'aide d'une règle graduée car celle-ci ne peut afficher $\uparrow$.

De même, dans la valeur 0, 0375 les deux zéros soulignés ne sont pas significatifs ; ils n'indiquent que la position de la virgule.

Remarque

Les chiffres significatifs d'une valeur numérique sont les chiffres écrits en partant de la gauche, à partir du premier chiffre différent de zéro.

Pour définir les chiffres significatifs d'un nombre, les règles suivantes sont à respecter :

Règle 1

Les zéros à gauche d'un nombre représentant le résultat d'une mesure, ne sont pas des chiffres significatifs, ils indiquent uniquement la position de la virgule.

Exemple : 0,0012 L est un nombre à **deux chiffres significatifs**.

Règle 2

Les zéros au milieu et à droite d'un nombre représentant le résultat d'une mesure, sont des chiffres significatifs.

Exemple : 0,205022 [m] est un nombre à **six chiffres significatifs**.

Règle 3

Dans l'écriture scientifique d'un nombre, tous les chiffres servant à écrire le nombre décimal sont significatifs.

Exemple : Le nombre $0,02530 = 2,530 \cdot 10^{-2}$ possède **quatre chiffres significatifs**.

Règle 4

Dans un nombre représentant le résultat d'une mesure, on ne fait figurer que les chiffres significatifs.

Exemple : Le nombre $45,2 = 4,52 \cdot 10^1$ possède **trois chiffres significatifs**.

(b) Calculs et chiffres significatifs

Cette partie nous permet de manipuler des calculs comportant des chiffres significatifs. Cependant, il faudrait noter qu'un calcul ne pourrait améliorer la précision (incertitude absolue) d'une mesure. Nous allons devoir appliquer les règles ci-dessous pour effectuer nos calculs.

**Règle 1**

Un nombre présentant un produit ou un quotient, est arrondi de sorte qu'il ne contienne pas plus de chiffres significatifs que le nombre utilisé dans le calcul et qui en contient le moins.

Exemple

$$\underbrace{2,21}_{3 \text{ chiffres significatifs}} \times \underbrace{3,5}_{2 \text{ chiffres significatifs}} = 7,735$$

Le résultat (7,735) est un nombre à 4-chiffres significatifs. Mais compte tenu de la règle précédente, on se doit alors d'écrire comme résultat de ce produit, $2,21 \times 3,5 = 7,7$.

Règle 2

Un nombre représentant une somme ou une différence, est arrondi de sorte qu'il ait autant de décimales (chiffres après la virgule) que le nombre utilisé dans le calcul et qui en contient le moins.

Exemple

$$\underbrace{3,18 \text{ m}}_{2 \text{ décimales}} - \underbrace{2 \text{ m}}_{0 \text{ décimale}} = 1,18 \text{ m}$$

D'après la règle 2, le résultat doit s'écrire : **1 m**.

NB : Bien tenir compte des arrondis par excès et par défaut appris en mathématiques.

3. Le jeu bilingue

That space is used to give some words of this lesson in English and use them in scientific sentences. We are going to regroup the French words and their English equivalent inside the following table:

French words	English words
Mesure	Measure
Instrument de mesure	Measure instrument
Métrologie	Metrology
Ordre de grandeur	Magnitude
Étendue de mesure	Measure extension; span
Sensibilité	Sensibility
Sensibilité moyenne	Average sensitivity
Exactitude	Exactitude
Justesse	Exactness, rightness
Fidélité	Loyalty
Répétabilité	Repeatability
Reproductibilité	Reproductivity

Sentence

A number representing a sum or a difference, is rounded so that it has as many decimals as the number used in the calculation and which contains the least.

Translation

Un nombre représentant une somme ou une différence, est arrondi de sorte qu'il ait autant de décimales (chiffres après la virgule) que le nombre utilisé dans le calcul et qui en contient le moins.

(1) i.e. = C'est-à-dire ; on peut aussi utiliser la notation *c.à.d.* pour signifier la même chose.

**EXERCICES DE LA LEÇON 1 : MESURE DES GRANDEURS PHYSIQUE ET CHIMIQUE****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****Exercice 1 : Évaluation des savoirs.**

- Définir : instrument de mesure ; grandeur physique ; métrologie ; ordre de grandeur ; chiffre significatif.
- Citer les qualités métrologiques d'un instrument de mesure.
- Compléter les pointillés par le mot (ou expression) qui convient :
 - Le.....est un instrument de.....que l'on utilise afin de déterminer la tension électrique aux bornes d'une portion de circuit électrique.
 - Le degré.....est relié au.....par la relation.....
 - L'.....est le domaine de variation possible de la grandeur à mesurer. Elle est définie par une valeur.....et une valeur.....Ces deux valeurs extrêmes s'appellent respectivement.....maximale et.....minimale.
- 0,0521 m = ...mm et a pour ordre de grandeur.....
- 210 [m] : 0,02 [m] = ...et a pour ordre de grandeur.....et pour chiffre(s) significatif(s).....
- Répondre par vrai ou faux.
 - La température peut se mesurer à l'aide d'un calorimètre.
 - L'ampère est l'instrument de mesure de l'intensité du courant électrique.
 - Toutes les grandeurs physiques ou chimiques sont mesurables.
 - Le nombre 0,001 est un nombre à quatre chiffres significatifs.
 - $1 + 0,502 = 2$; $8,5 : 3,21 = 2,648$.
 - L'ordre de grandeur du nombre 0,0854 est 10^{-1} .
- Donner la notation scientifique des nombres suivants :
 - $1 = \dots\dots\dots$
 - $0,1 = \dots\dots\dots$
 - $100,03 = \dots\dots\dots$
 - $0,0250 + 852 = \dots\dots\dots$
 - $0,158 \times 125,03 = \dots\dots\dots$

Exercice 2 : Évaluation des savoir-faire.

- On dispose de deux longueurs : le diamètre de l'atome d'aluminium $L_1 = 0,00000024$ mm et le diamètre d'un virus $L_2 = 20$ nm.
 - Convertir ces grandeurs en mètres.
 - Écrire les grandeurs obtenues en écriture scientifique et préciser leurs chiffres significatifs.
 - Donner leurs ordres de grandeur puis calculer leur rapport.
 - Quel objet a le même ordre de grandeur qu'un objet de diamètre $L_3 = 0,0502$ μm ?
- On effectue des mesures répétées sur la valeur de la température d'un corps et on obtient les valeurs extrêmes suivantes : $\theta_1 = 300,201^\circ\text{C}$ et $\theta_2 = 304,202^\circ\text{C}$.
 - Quel est l'instrument de mesure utilisé ?
 - Donner les ordres de grandeur de ces valeurs.

- Déterminer la fidélité F de cet instrument.

Conclure.

- Par un calcul d'une grandeur A, la calculatrice donne le résultat suivant : $A = 3,183098862$.

Recopier et compléter le tableau ci-dessous :

Chiffre significatif	Valeur de A
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES**Situation 1 : Jeu bilingue**

Traduire en anglais les phrases suivantes :

P1 : Une mesure expérimentale est toujours une approximation, elle dépend de l'appareil de mesure et de l'expérimentateur.

P2 : La qualité métrologique d'un instrument de mesure, est l'ensemble des données caractérisant la qualité de la mesure effectuée par le dispositif considéré.

Situation 2 : Détermination de la sensibilité d'un appareil de mesure : Expérience.

À l'aide d'un montage approprié, on a pu relever les variations de la tension électrique U en fonction de celles du courant I et les résultats sont portés dans le tableau ci-dessous :

U (V)	10	14	18	22	26
I (A)	6,67	9,33	12	14,67	17,33

- Réaliser une figure de cette expérience.
- Représenter la courbe $U = f(I)$ (utiliser une échelle convenable).
- À partir de la courbe obtenue, déterminer la sensibilité moyenne S et préciser son unité. Quel est son appareil de mesure ?
- Que représente $\frac{1}{S}$ pour cet appareil ? Préciser son unité.

Situation 3 : Réalité ou fiction

Lors d'un braquage d'une banque terrienne, deux martiens volent 60 lingots d'or. Un lingot mesure 9cm de long, 4cm de large et 2cm de haut. On donne la valeur de la constante gravitationnelle terrestre $g_T = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$ et la masse volumique d'un lingot d'or est $\rho = 6,97.10^6 \text{ kg.m}^{-3}$.

- Calculer la masse M (en kg) du butin et donner le résultat en notation scientifique.
- Quel est le poids P du butin sur Terre ?
- Sur Terre, les deux martiens arrivent tout juste à porter l'or. Arrivé sur Mars, l'un des deux brigands s'échappe avec le butin. Est-ce possible ? Justifier.



Leçon 2

INCERTITUDE SUR LA MESURE



Voilà deux enfants A et B qui se disputent sur la l'écriture de la valeur de la célérité C de la lumière dans le vide.

- ✦ L'enfant A dit : la valeur de C est connue de tous les scientifiques comme étant une constante de valeur arrondie égale à 3.10^8 m.s^{-1}
- ✦ L'enfant B dit : certes, mais en réalité, cette valeur arrondie vaut $(3,00278 \pm 0,04) .10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

ACTIVITÉ

1. Des deux enfants, lequel apporte plus de précision sur la valeur de C ? Why ?
2. Quel est l'intervalle de la valeur de C ?

Objectifs

- Définir : incertitude ; incertitude absolue ; incertitude relative ; incertitude type ; incertitude élargie ; intervalle de confiance.
- Déterminer l'intervalle de confiance d'une loi physique : la loi d'Ohm, la loi des gaz parfaits.

Introduction

Mesurer une grandeur n'est pas seulement la recherche de la valeur numérique de cette grandeur, mais aussi de lui associer une **incertitude** dans le but de **qualifier la qualité de la mesure**. Notons toutefois que cette incertitude est associée aux **erreurs** ⁽¹⁾ de mesure pouvant être d'origine instrumental ou de l'expérimentateur ou encore de la variabilité de la grandeur à mesurer.

Dans un laboratoire, on peut distinguer deux grandeurs physiques :

- ✍ Les **grandeurs calculées** : Ce sont les résultats d'un calcul découlant d'une loi ou d'une formule et qui font intervenir des grandeurs mesurées
- ✍ Les **grandeurs mesurées** : Ce sont les résultats d'une mesure effectuée par l'expérimentateur à l'aide d'un appareil de mesure.

Définition générale

L'**incertitude de mesure** est la valeur qui caractérise la dispersion des valeurs pouvant être attribuées à la grandeur mesurée.

1. Incertitudes absolue et relative

1.1. Incertitude absolue

Pour mieux aborder cette notion, acceptons de prendre comme exemple, l'exercice suivant.

Depuis les classes de quatrième, on nous a appris que l'intensité du champ de pesanteur $\vec{g}$ dépend du lieu, ce qui entraîne aussi la dépendance du poids $\vec{P}$ d'un objet de masse m (kg).

À partir des expériences faites, $g_p = 9,83 \text{ N.kg}^{-1}$ au pôle Nord et $g_{\text{eq}} = 9,78 \text{ N.kg}^{-1}$ au niveau de l'équateur. Supposons un objet de masse 15 kg à ces deux endroits. On aura alors :

- $P_p = m \times g_p = 147,45 \text{ N}$
- $P_{\text{eq}} = m \times g_{\text{eq}} = 146,7 \text{ N}$

Notons ΔP la variation du poids telle que :

- $\Delta P = P_p - P_{\text{eq}}$, si l'objet est d'abord à l'équateur puis au pôle nord



- ou $\Delta P = P_{\text{eq}} - P_p$, dans le cas contraire.

On aura alors : $\Delta P = \pm 0,8 \text{ N}$ (ce résultat est en accord avec les lois d'écriture des CS de la leçon 1).

On pourra alors écrire : $-\Delta P \leq P \leq +\Delta P \Rightarrow P = 147,1 \pm 0,8 \text{ (N)}$ (En tenant compte des arrondis des valeurs de P calculées plus haut).

La grandeur ΔP est appelée **incertitude absolue** de la mesure et a la même unité que la valeur mesurée.

Définition

On appelle **incertitude absolue** d'une grandeur x , la grandeur notée Δx , qui représente la moitié de l'intervalle à l'intérieur duquel on est certain que se trouve la valeur exacte de la mesure.

Remarque

✍ Δx est la somme de l'incertitude humaine (Δx_H) et de l'incertitude de l'instrument (Δx_I) :

$$\Delta x = \Delta x_H + \Delta x_I \quad (2.1)$$

On prend généralement, pour l'incertitude de l'instrument, la sensibilité de l'appareil de mesure utilisé. L'incertitude humaine, doit quant à elle être exprimée.

✍ Les calculs sur les incertitudes ont été vus en seconde, nous verrons cela ici qu'en exercices.

1.2. Incertitude relative

La qualité d'une mesure s'exprime par le rapport entre son incertitude absolue Δx et la mesure x elle-même. Ce rapport est appelé **incertitude relative** que nous allons noter I_R .

Définition

On appelle incertitude relative (**ou précision**) d'une mesure, le quotient de l'incertitude absolue Δx de cette mesure par la mesure x elle-même. Elle s'exprime en pourcentage (%) et est obtenue par la relation :

$$I_R = \frac{\Delta x}{x} \quad (2.2)$$

Exemple

En considérant les valeurs de l'exercice précédent, on aura : $\frac{\Delta P}{P} = \frac{0,8}{147,1} = 0,00544 = 0,544\%$

2. Autres incertitudes

En outre des incertitudes vues jusqu'à présent, on distingue d'autres parmi lesquelles, l'incertitude type et l'incertitude élargie.

2.1. L'incertitude type

Soit Y une variable aléatoire du mesurage, d'espérance mathématique y_0 (approche probabiliste). Cherchons à caractériser la dispersion des valeurs que peut prendre Y.

Remarque

- ✍ Une mesure de cette dispersion peut être obtenue à partir de l'écart-type de la variable aléatoire Y.
- ✍ La détermination de l'incertitude sur le mesurage va être exprimée en fonction de l'écart-type de la variable aléatoire Y.
- ✍ L'essentiel de la démarche va consister à déterminer la loi de probabilité suivie par Y et à estimer la valeur de l'écart-type de Y.

Définition

L'écart-type de Y est appelé **incertitude-type** sur le résultat de la mesure et est notée $u(y)$.



Notons que, évaluer l'incertitude sur Y, va demander de combiner deux modes d'évaluation :

- L'un sur l'**analyse statistique** qu'on va appeler **évaluation de type A** ;
- L'autre sur une **modélisation probabiliste** qu'on appellera **évaluation de type B**.

2.1.1. Évaluation de type A d'une incertitude-type

Si une grandeur est estimée par les **moyens statistiques**, on dit qu'on a une **évaluation de type A** de l'incertitude sur cette grandeur.

Supposons que la grandeur **G** est estimée à partir d'une série statistique (*on établit par exemple une série de 10-mesures de la longueur d'une pièce*).

Vocabulaire

- Soit $G_i = (G_1, G_2, \dots, G_n)$, un **n**-échantillon de G, avec G_i , la variable aléatoire associée à la $i^{\text{ème}}$ mesure de la grandeur G.
- Les **n**-mesures $g_1, g_2, \dots, g_n$, constituent un échantillon des valeurs prises par la grandeur G.
- La variable aléatoire

$$\bar{G} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i \quad (2.3)$$

a pour espérance celle de G et la moyenne arithmétique des valeurs $g_1, g_2, \dots, g_n$ est en général, une bonne estimation de l'espérance **E(G)** de la variable **G**.

- L'**estimation ponctuelle** de G est le nombre $\bar{g}$ défini par :

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{n} \quad (2.4)$$

Pour une grandeur X estimée à partir de n-observations répétées indépendantes, obtenues dans les mêmes conditions de mesure $x_1, x_2, \dots, x_n$, le nombre

$$s^2(X) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.5)$$

est la « **meilleure** » estimation de la variance de X notée **$\sigma^2(X)$** .

- La quantité $s(X)$ représente une estimation de la dispersion $\sigma(X)$ des valeurs prises par X autour de la moyenne $E(X)$ et est appelée **écart-type expérimental** d'une mesure ou **écart-type de répétabilité**.
- Un résultat classique de statistique sur les lois d'échantillonnage, montre que la meilleure estimation sur $\sigma^2(\bar{X})$, variance de la moyenne $\bar{X}$ de X est :

$$s^2(\bar{X}) = \frac{1}{n} s^2(X) \quad (2.6)$$

- L'écart-type expérimental de la moyenne $s(\bar{X})$, est utilisé comme estimation de l'incertitude de la moyenne $\bar{X}$

Définition

Si une grandeur X est estimée à partir de n-observations répétées et indépendantes $x_1, x_2, \dots, x_n$, alors, l'incertitude-type $u(x)$ sur son estimation $\bar{x} = \bar{g}$ est :

$$s(\bar{X}) = \sqrt{\frac{1}{n}} \times s(X) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.7)$$



On remarque dès lors que $\sigma(X)$ est le paramètre qui caractérise la dispersion des valeurs prise par X et caractérise l'incertitude sur une mesure.

Remarque

✍ La formule (2.7) confirme l'idée selon laquelle, l'estimation à partir d'une moyenne est meilleure que sur une seule mesure.

✍ Si une grandeur X est estimée à partir de p -observations répétées et indépendantes $x_1, x_2, \dots, x_p$ et si $s(X)$ est l'écart-type expérimental d'une mesure (obtenue auparavant à partir de n -valeurs),

$$\text{alors, l'incertitude-type } u(x) \text{ sur son estimation } \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_p}{p} \quad (2.8)$$

est :

$$u(x) = \frac{s(X)}{\sqrt{p}} \quad (2.9)$$

Exemple

On effectue deux séries de 10-mesures (en mm) de manière indépendante et on obtient le tableau (1) suivant :

L ₁	52,36	52,35	52,34	52,35	52,36	52,34	52,35	52,35	52,36	52,34
L ₂	59,17	59,18	59,17	59,17	59,19	59,18	59,18	59,17	59,18	59,19

Déterminer les incertitudes-types $u(L_1)$ et $u(L_2)$ des deux séries L_1 et L_2 respectivement.

- Nous allons évaluer l'incertitude-type $u(L_1)$.

- Évaluons la moyenne $\bar{x}_1$:

$$\bar{x}_1 = \frac{52,36 + 52,35 + 52,34 + 52,35 + 52,36 + 52,34 + 52,35 + 52,35 + 52,36 + 52,34}{10} = 52,35$$

- Évaluons l'écart-type de répétabilité $s(L_1)$:

$$s(L_1) = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x}_1)^2} = \frac{1}{\sqrt{9}} \sqrt{6 \cdot 10^{-4}} = \frac{2,4495 \cdot 10^{-3}}{3}$$

On obtient alors, $s(L_1) = 8,165 \cdot 10^{-4}$ mm

- Évaluons alors $u(L_1)$: $u(L_1) = \frac{s(L_1)}{\sqrt{n}} = \frac{8,165 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{10}} = 2,582 \cdot 10^{-4}$ mm.

- En procédant de la même manière pour évaluer $u(L_2)$, on trouve :

$$u(L_2) = \frac{s(L_2)}{\sqrt{10}} = \frac{7,888 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{10}} = 2,494 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

2.1.2. Évaluation de type B d'une incertitude-type

☞ Imprégnation et vocabulaire

- Lorsque l'estimation d'une grandeur X ne peut être obtenue à partir d'observations répétées, la **variance estimée $u^2(X)$** ou l'incertitude-type $u(X)$, sont évaluées par un jugement fondé sur des **lois de probabilité** supposée auparavant.
- La détermination de la loi de l'erreur est liée à la maîtrise du processus de mesure et à l'expérience de l'opérateur (expérimentateur) ; elle dépend d'un ensemble d'informations pouvant être :
 - Les résultats des mesures antérieures ;
 - L'expérience ou la connaissance du comportement et des propriétés des matériaux et instruments utilisés ;
 - Les facteurs d'influence intérieure (température, pression,...)

- Les spécifications du fabricant ;
- Les données fournies par les certificats d'étalonnage ou autres ;
- L'incertitude assignée à des valeurs de référence et donnée avec ces valeurs ;
- Etc.
- Certaines lois sont utilisées dans les calculs des incertitudes notamment les **lois normales** et les **lois rectangulaires** ou **uniformes**.
 - La loi **normale** ou **gaussienne** est centrale dans la théorie des erreurs.
 - La loi **rectangulaire** ou **uniforme** est utilisée en calcul d'incertitude, lorsqu'on ne connaît qu'une majorité de l'erreur, ce qui est souvent le cas sur les erreurs systématiques (programme de 2^{nde} C)

Supposons par exemple que l'erreur soit comprise entre les valeurs **a** et **b**, la loi rectangulaire sur **[a ; b]** (*elle vaut 1 entre a et b et 0 ailleurs*) est de toutes les lois définies sur ce même intervalle [a ; b], celle qui a le plus grand écart-type ; pour cela, on a la nomme le plus souvent la « **loi du pire** » en ce sens qu'on ne minimise pas l'écart-type qui caractérise l'incertitude-type.

☞ Détermination d'incertitudes de type B

Le travail va être de choisir, en fonction des informations recueillies ou des connaissances des processus, la loi de probabilité qui lui semble être le mieux représentative du phénomène étudié. Ainsi, si on sait raisonnablement que les valeurs de la grandeur X sont comprises entre M - d et M + d, le choix de la loi de propagation de X entre M - d et M + d va décider de l'incertitude-type retenue :

- Si on suppose que la loi est normale, on prendra $u(x) = \frac{d}{3}$ (2.10)

La loi normale est une loi importante car elle se trouve entre les limites de la moyenne de variables aléatoires dans le cas de nombreuses lois, lors d'observations répétées de manières indépendantes.

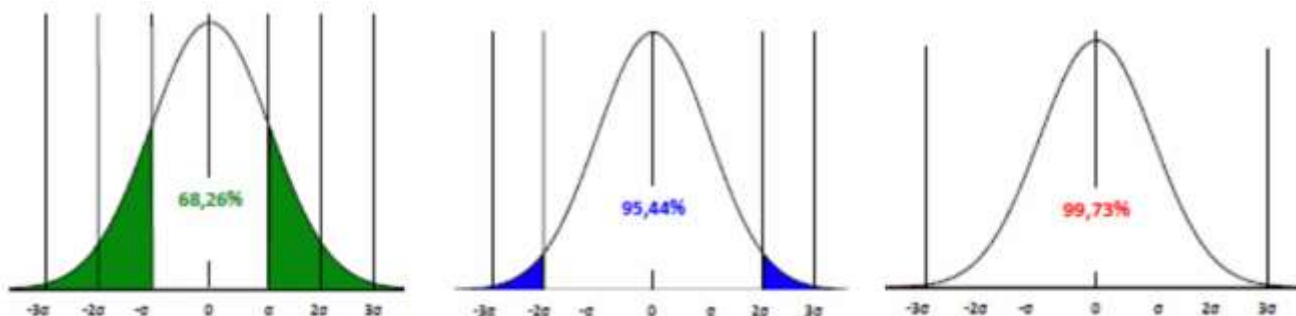


Figure 2.1 : Allure de la densité de la loi normale ou gaussienne

- Si on suppose que la loi est rectangulaire, on prendra $u(x) = \frac{d}{\sqrt{6}}$ (2.11)

Une variable X suit une loi uniforme sur un intervalle [a ; b] si sa fonction de densité f est définie par :

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{Pour } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (2.13)$$

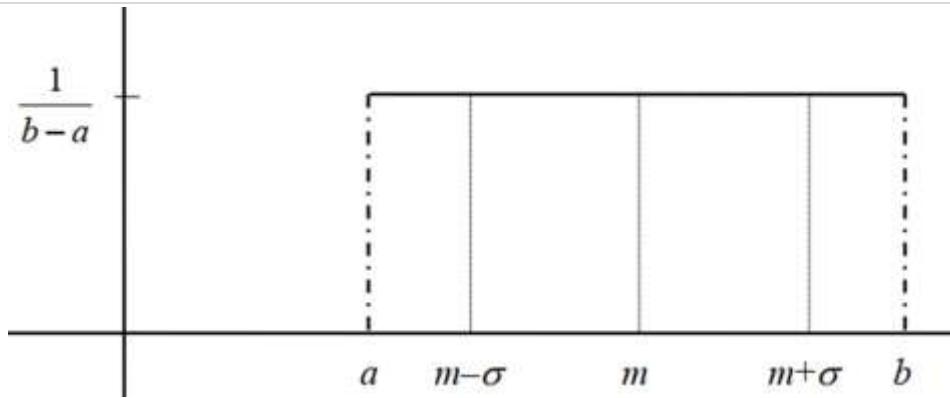


Figure 2.2 : Allure de la densité de la loi uniforme

La moyenne **m** de X et l'écart-type **σ** sont donnés par :

$$\begin{cases} m = \frac{a+b}{2} \\ \sigma = \frac{b-a}{2\sqrt{3}} \end{cases} \quad (2.14)$$

- Si on suppose que la loi est rectangulaire, on prendra $u(x) = \frac{d}{\sqrt{3}}$ (2.15)

Une variable X suit la loi triangulaire sur un intervalle [a ; b] si sa fonction de densité est définie par :

$$f(x) = \begin{cases} \frac{4(x-a)}{(b-a)^2} & \text{Si } a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ \frac{4(b-x)}{(b-a)^2} & \text{Si } \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (2.16)$$

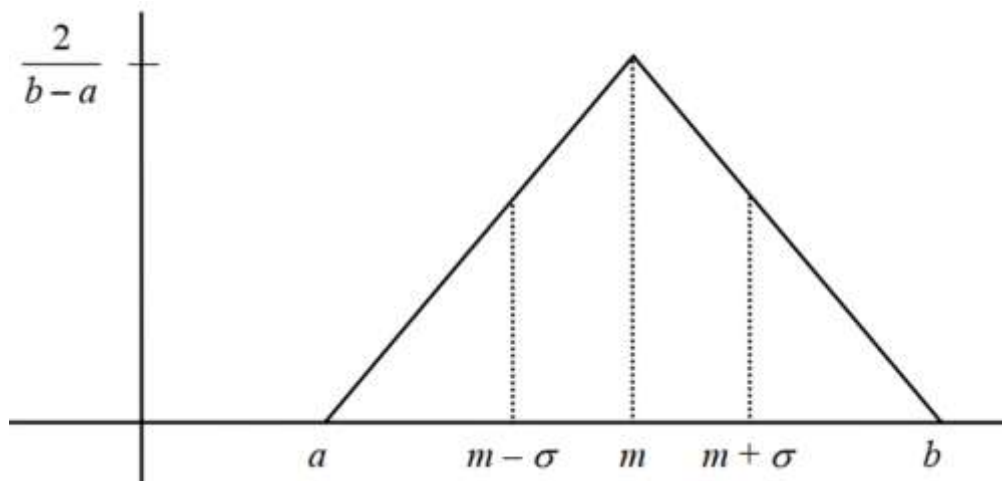


Figure 2.3 : Allure de la densité d'une loi triangulaire

La moyenne **m** de X et son écart-type **σ** sont donnés par :

$$\begin{cases} m = \frac{a+b}{2} \\ \sigma = \frac{b-a}{2\sqrt{6}} \end{cases} \quad (2.17)$$



☞ Recommandations pratiques

• **Choix des composantes de l'incertitude**

Dans la pratique il existe de nombreuses sources possibles d'incertitudes dans un mesurage, parmi lesquelles :

- La définition incomplète de la mesurande ;
- Un échantillonnage non représentatif ;
- Une connaissance insuffisante ou un mesurage imparfait des conditions d'environnement ;
- Un biais (dû à l'observateur) dans la lecture des instruments analogiques ;
- La résolution de l'instrument ;
- Des valeurs inexactes des étalons et matériaux de référence ;
- Des valeurs inexactes des constantes et paramètres retenus (obtenus par des sources extérieures par exemple) ;
- Des approximations dans la méthode de calcul des incertitudes ou dans le processus de mesure ;
- Etc.

NB

Ces sources ne sont pas nécessairement indépendantes, et certaines contribuent aux variations entre les observations répétées du mesurande dans des conditions identiques.

• **Incertitude-type sur une grandeur**

Le mesurage d'une grandeur Y peut être modélisé par $Y = y_0 + E_1 + E_2 + \dots + E_n$ où les variables $E_1, E_2, \dots, E_n$ sont les différentes composantes **indépendantes** de l'erreur.

Un résultat statistique montre que :

$$u^2(Y) = u^2(E_1) + u^2(E_2) + \dots + u^2(E_n) \quad (2.19)$$

Supposons Y le mesurage d'une pièce dans les conditions contrôlées. On effectue une série d'observations à l'aide d'un instrument de mesure et que les composantes retenues de l'erreur amènent au calcul de :

- u_A , l'incertitude-type déterminée statistiquement sur la série des observations ;
- u_B , l'incertitude-type déterminée sur la justesse de l'instrument de mesure.

L'incertitude retenue alors sur la grandeur Y est alors :

$$u^2(Y) = u_A^2 + u_B^2 \quad (2.20)$$

Exemple

Reconsidérons les mesures L_1 et L_2 reportées dans le tableau (1) ci-dessus. Les mesures de longueur sont effectuées à l'aide d'un pied à coulisse au 1/100 dont l'erreur de justesse maximale est de $30\mu\text{m}$, alors, l'incertitude sur une mesure de L_1 est :

- $u_A = 0,00816 \text{ mm}$ et
- $u_B = \frac{0,030}{\sqrt{3}} = 0,01732 \text{ mm}$ (instrument vérifié)

On a alors, $u^2(L_1) = u_A^2 + u_B^2 = 0,00036658 \dots \text{mm}$ et on en déduit que $u(L_1) = 0,0190 \dots \text{mm}$

Remarque

L'instrument de mesure est adapté au mesurage, les erreurs attachées à la résolution de l'instrument sont prises en compte dans la variabilité des résultats des mesures sinon il faudrait prendre en compte l'erreur attachée à la résolution de l'appareil de mesure.



2.2. L'incertitude élargie

2.2.1. Présentation

- De ce qui précède, on a modélisé la mesure d'une grandeur Y comme variable aléatoire, et on a déterminé une approximation de l'écart-type de cette variable que l'on a noté $u_c(Y)$
- Notre intention en premier, est de fournir, autour du résultat d'un mesurage, un intervalle dont on puisse s'attendre à ce qu'il contienne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient raisonnablement être distribuées à la mesurande Y .
- Après l'estimation de l'écart-type de Y , il reste à exprimer la loi de probabilité suivie par cette variable.
- Idéalement, on aimerait déterminer un nombre k tel que si Y est estimé par y avec une incertitude $U(y) = k \times u_c(y)$ (2.21), alors on peut affirmer que : $y - U(y) \leq Y \leq y + U(y)$ avec une probabilité p proche de 1.
- $U(y) = U$ est appelée **incertitude élargie sur Y** .

2.2.2. Détermination du facteur d'élargissement k

- La détermination de k correspond à ce qu'on appelle en statistique la détermination d'un **intervalle de confiance** à un niveau de confiance p .
- Pour obtenir le facteur k , il est nécessaire d'avoir une connaissance de la loi de probabilité de la variable représentée par le résultat de mesure.

Remarque

Dans la pratique, nous n'avons au moins qu'une approximation de cette loi et de l'écart-type associé.

- Les propriétés de la loi normale montrent que $\frac{Y - y}{u_c(y)}$ suit approximativement une loi normale centrée réduite dès que l'une des conditions suivantes est vérifiée :
 - $u_c(y)$ n'est pas dominée par une composante d'incertitude-type obtenue par une évaluation de type A fondées sur quels observations, ni par une composante d'incertitude-type obtenue par une évaluation de type B fondée sur moins de trois lois rectangulaires ;
 - Les composantes de $u_c^2(y)$ fondées sur des lois normales sont significativement beaucoup plus grandes que toute autre composante.
- Dans le cas d'un instrument étalonné, le certificat d'étalonnage annonce une incertitude U . en réalité, U est égale à l'incertitude-type $u(x)$ multipliée par un facteur d'élargissement k :

$$u(x) = \frac{U}{k} \quad (2.22)$$

Remarque

- ✍ Le facteur d'élargissement devrait être précisé avec l'incertitude donnée par le constructeur.
- ✍ Si aucune précision n'est faite, on supposera $k = 2$.
- ✍ Pour conserver une cohérence, les incertitudes seront données avec au plus deux chiffres significatifs. Tout arrondissement des incertitudes se fera par prudence, par **excès**.
- ✍ Pour limiter le cumul d'erreurs sur les arrondis, l'arrondissement est effectué sur le résultat final. Pour les calculs intermédiaires, on pourra garder des chiffres qui peuvent ne pas être des chiffres significatifs.

Exemple

Si $y = 12,3257$ et $u_c(y)$ estimé à $0,232$ avec $k = 2$, alors, $U = 0,464$. L'erreur d'arrondissement devrait alors être inférieure à $0,04$. On arrondit donc au $1/100$ près. De ce fait, on écrira :

$$y = 12,32 \pm 0,07$$



3. Intervalle de confiance

3.1. Définition

- 📖 Selon une approche mathématique, un **intervalle de confiance** encadre une valeur réelle que l'on cherche à estimer à l'aide des mesures prises par un procédé **aléatoire**.
- 📖 En particulier, la notion d'intervalle de confiance (I_c) permet de définir une marge d'erreur entre les résultats d'un sondage et un relevé exhaustif de la population totale (approche statistique).

3.2. Principe d'un intervalle de confiance et construction

- Un intervalle de confiance doit être associé à un **niveau** en général sous la forme d'un **pourcentage**, qui minore la **probabilité** de contenir la valeur à estimer.
- Les intervalles de confiance sont souvent élaborés à partir d'un **échantillon** i.e. une série de mesures indépendantes sur une population, notamment pour estimer les **indicateurs statistiques** telles que la **moyenne m (ou $\bar{x}$)**, la **médiane M_e** ou la **variance V** .
- Mathématiquement, un intervalle de confiance est modélisé par un **couple de variables aléatoires** qui encadrent un paramètre réel, et ne doit cependant pas être confondu avec l'**intervalle de fluctuation I_F** .
- L'intervalle de fluctuation est déterminé par le paramètre et encadre une variable aléatoire.
- Toutefois, c'est précisément en inversant les inégalités d'un intervalle de fluctuation, issu du **théorème central limite** ou de l'inégalité de **Bienaymé – Tchebychev** que l'on peut obtenir l'expression d'un intervalle de confiance, comme celui qui estime l'espérance d'une loi à partir de la moyenne empirique et d'une majoration de l'écart-type :

$$I_c(m) \in \left[\bar{x} - t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} ; \bar{x} + t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} \right] \quad (2.23)$$

Cette formule (2.23) est celle de l'intervalle de confiance autour d'une moyenne $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ avec un écart-type observé sur un échantillon s de taille n ; t_α , le **fractile** ⁽²⁾ à l'ordre $1 - \frac{\alpha}{2}$ de la loi **St(n-1)**.

- Pour construire un intervalle de confiance, on utilise une variable aléatoire dont on connaît la distribution de probabilité.

Exemple d'encadrement d'une proportion p .

Si on cherche à évaluer quelle **proportion p** de la population se reconnaîtrait dans une catégorie donnée (*qu'elle soit médicale, sociale, politique,...*), on peut poser la question à un nombre n d'individus tirés au hasard et calculer la **fréquence f** observée définie comme le quotient du nombre de réponses positives par le nombre de sondés.

La loi des **grands nombres** assure qu'il est très probable que la fréquence f observée soit proche de la proportion p . Mais le **théorème central limite** précise que la loi de probabilité qui décrit les valeurs possibles de f est proche d'une loi normale de paramètre p et d'écart-type :

$$\sigma = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad (2.24)$$

Avec cette approximation, on obtient un encadrement de la forme :

$$p - k \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \leq f \leq p + k \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad (2.25)$$

Où k est un coefficient indépendant de n et p et qui provient des tables de la loi normale centrée réduite. Il est d'autant plus grand que l'on souhaite un niveau de confiance élevé.



Dans l'inégalité (2.25) ci-dessus, en exprimant p en fonction de f , n et k , on retrouve l'intervalle de confiance classique suivant :

$$f - k\sqrt{\frac{f(1-f)}{n}} \leq p \leq f + k\sqrt{\frac{f(1-f)}{n}} \quad (2.26)$$

Les inégalités

$$\begin{cases} k < 2 \\ \sqrt{f(1-f)} \leq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (2.27)$$

mènent à l'approximation par un intervalle de confiance légèrement plus grand mais à la formulation plus simple :

$$p \in \left[f - \frac{1}{\sqrt{n}}, f + \frac{1}{\sqrt{n}} \right] \quad (2.28)$$

Principe général

Soit X une variable aléatoire de loi paramétrée par θ et $X_1, \dots, X_n$ n -variables indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d) selon la loi de X .

Plutôt que d'estimer ponctuellement la vraie valeur inconnue de paramètre θ , on recherche un intervalle recouvrant « très vraisemblablement » cette vraie valeur.

Définition

- On appelle **intervalle de confiance I_c** de niveau de confiance **$1 - \alpha$** du paramètre **θ** , tout intervalle I_c tel que : **$P(I_c \ni \theta) = P\left(\bar{x} - t \frac{s}{\sqrt{n}} \leq m \leq \bar{x} + t \frac{s}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha$** pour **$\alpha \in [0, 1]$** fixé. (2.29)
- Les bornes de l'intervalle de confiance dépendent de l'échantillon, elles sont dites **aléatoires** (ou **stochastiques**).
- Par abus de langage, on note souvent : **$P(\theta \in I_c) = 1 - \alpha$** .

Remarque

Si $\alpha = k$ (dans 2.27) augmente ou que si n augmente, l'amplitude de l'intervalle de confiance diminue.

3.3. Les types d'intervalles de confiance (vocabulaire)

La probabilité α pour que l'intervalle de confiance ne contienne pas la vraie valeur, peut être répartie différemment de part et d'autre des bornes de l'intervalle de confiance.

Soit **$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$** où α_1 et α_2 mesurent respectivement les risques à gauche et à droite de dépasser un seuil plancher ou plafond.

Cette approche montre alors qu'il existe deux types d'intervalle de confiance :

- **L'intervalle de confiance unilatéral**
- **L'intervalle de confiance bilatéral.**

3.3.1. Intervalle de confiance unilatéral

L'intervalle de confiance est dit **unilatéral** si **$\alpha_1 \alpha_2 = 0$** . (2.30)

- Quand on veut estimer une valeur minimale au paramètre à estimer, on considère **$\alpha_1 = \alpha$** et **$\alpha_2 = 0$** ; l'intervalle de confiance est alors de la forme : **$I_c = [a ; +\infty[$** (2.31)

- Quand on veut absolument pas dépasser un seuil maximal, on prend **$\alpha_1 = 0$** et **$\alpha_2 = \alpha$** ; l'intervalle de confiance sera alors sous la forme : **$I_c =]-\infty ; b]$** (2.32)



3.3.2. Intervalle de confiance bilatéral

L'intervalle de confiance est dit **bilatéral** si $\alpha_1 \neq 0$ et $\alpha_2 \neq 0$.

Si $\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\alpha}{2}$, l'intervalle de confiance bilatéral est dit **symétrique** et dans le cas contraire, il est dit **dissymétrique**.

4. Exemple de modèles utilisés en physique – chimie : Loi physique

Pour notre travail, nous avons choisi deux lois physiques à savoir la loi d'Ohm et la loi des gaz parfaits.

4.1. Intervalle de confiance pour la loi d'Ohm

Pour cela, un rappel sur la loi d'Ohm est nécessaire :

« La différence de potentielle (ddp) U (en V) aux bornes d'un conducteur ohmique (R) de résistance R (en Ω), parcouru par un courant d'intensité I (en A) est égale au produit de la résistance R par le courant I : **$U = R \times I$** ». (2.33)

Nous n'allons pas faire de commentaires sur cette loi car notre objectif ici est de pouvoir établir l'intervalle de confiance de l'équation (2.33). Nous allons procéder par un exemple.

En utilisant un dispositif approprié (voltmètre par exemple), on effectue 5-mesures de deux tensions u_1 et u_2 (exprimées en volts) aux bornes de deux conducteurs ohmiques de résistances respectives R_1 et R_2 . Les résultats de ces mesures sont reportés sur le tableau ci-dessous :

$u_1(V)$	23,14	23,15	23,14	23,16	23,15
$u_2(V)$	25,18	25,18	25,17	25,19	25,16

- (1) Calculer les moyennes m_1 et m_2 respectives des mesures indépendantes u_1 et u_2 .
- (2) Calculer les écarts-types de répétabilité $S(u_1)$ et $S(u_2)$.
- (3) En déduire les incertitudes-types $U(u_1)$ et $U(u_2)$.
- (4) Évaluer les incertitudes U_1 et U_2 dues à l'étalonnage des instruments utilisés.
- (5) Déterminer les intervalles de confiance $I_c(R)$ des résistances R_1 et R_2 si l'on suppose les distributions de probabilité être à 95% (fractile = 1,96) et le courant traversant les conducteurs ohmiques est $I = 2$ A.

Solution

- (1) Calculons les moyennes observées m_1 et m_2 .

$$\text{Par définition, } \begin{cases} m_1 = \frac{\sum_{i=1}^5 u_i}{5} = \frac{23,14 + 23,15 + 23,14 + 23,16 + 23,15}{5} = \frac{115,74}{5} \approx 23,15 \\ m_2 = \frac{\sum_{k=1}^5 u_k}{5} = \frac{25,18 + 25,18 + 25,17 + 25,19 + 25,16}{5} = \frac{125,88}{5} \approx 25,18 \end{cases}$$

- (2) Calculons les écarts-types de répétabilité $S(u_1)$ et $S(u_2)$.

Par définition,

$$\begin{cases} S^2(u_1) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^5 (u_i - m_1)^2 = \frac{(23,14 - 23,15)^2 + (23,14 - 23,15)^2 + (23,16 - 23,15)^2 + 0 + 0}{4} = 7,5 \cdot 10^{-5} \\ S^2(u_2) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^5 (u_k - m_2)^2 = \frac{0 + 0 + (25,17 - 25,18)^2 + (25,17 - 25,18)^2 + (25,16 - 25,18)^2}{4} = 1,5 \cdot 10^{-4} \end{cases}$$



On a alors :
$$\begin{cases} S(u_1) = \sqrt{7,5 \cdot 10^{-5}} = 8,66 \cdot 10^{-3} \text{ V} \\ S(u_2) = \sqrt{1,5 \cdot 10^{-4}} = 1,2248 \cdot 10^{-2} \text{ V} \end{cases}$$

(3) Dédisons-en les incertitudes-types $U(u_1)$ et $U(u_2)$

Par définition,
$$\begin{cases} U(u_1) = \frac{S(u_1)}{\sqrt{n}} = \frac{S(u_1)}{\sqrt{5}} = \frac{8,66 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{5}} = 2,24 \text{ V} \\ U(u_2) = \frac{S(u_2)}{\sqrt{n}} = \frac{S(u_2)}{\sqrt{5}} = \frac{1,2248 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{5}} = 2,24 \text{ V} \end{cases}$$

(4) Évaluons les incertitudes U_1 et U_2 dues à l'étalonnage des instruments utilisés.

Par définition,
$$\begin{cases} U_1 = k \times U(u_1) = 2 \times 2,24 = 4,48 \text{ V} \\ U_2 = k \times U(u_2) = 2 \times 2,24 = 4,48 \text{ V} \end{cases}$$

(5) Déterminons les intervalles de confiance $I_C(R)$ des résistances R_1 et R_2 si l'on suppose les distributions de probabilité être à 95% (fractile $t = 1,96$) et le courant traversant les conducteurs ohmiques est $I = 2 \text{ A}$.

On sait par définition que,

$$\begin{aligned} - \quad m_1 - t \times \frac{S(u_1)}{\sqrt{5}} \leq u_1 \leq m_1 + t \times \frac{S(u_1)}{\sqrt{5}} &\Rightarrow m_1 - t \times U(u_1) \leq R_1 \times I \leq m_1 + t \times U(u_1) \\ &\Rightarrow \frac{m_1 - t \times U(u_1)}{I} \leq R_1 \leq \frac{m_1 + t \times U(u_1)}{I} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 9,38 \leq R_1 \leq 13,77 \text{ } (\Omega)$$

- De même,

$$\begin{aligned} \frac{m_2 - t \times U(u_2)}{I} \leq R_2 \leq \frac{m_2 + t \times U(u_2)}{I} \\ \Rightarrow 10,79 \leq R_2 \leq 14,79 \text{ } (\Omega) \end{aligned}$$

4.2. Intervalle de confiance pour la loi des gaz parfaits

Une attention particulière est tenue dans cette partie.

4.2.1. Définition

Un gaz contenant **n-moles** (en mole → **mol**) de molécules à la pression **P** (en Pascal → **Pa**) occupant un volume **V** (en **m³**), à la température **T** (en Kelvin → **K**) si la loi suivante est vérifiée :

$$P \times V = n \times R \times T \quad (2.34)$$

Remarque

✍ **$R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 0,08207 \text{ L} \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$** , est la constante des gaz parfaits (GP)

✍ Pour convertir une température θ en degrés Celsius, vers une température T en degré kelvin, il suffit d'appliquer la formule suivante :

$$T = \theta + 273,15 \quad (2.35)$$

✍ L'équation (2.34) est une autre formulation des lois de **Boyle – Mariotte** et **Gay – Lussac**.

- Si l'on effectue un processus **isobare** i.e. une **transformation à pression constante** (**P = cste**), alors, V et T varient proportionnellement et on a :

$$V/T = \text{cste} \Rightarrow V \propto T \quad (2.36)$$

C'est la **loi de Charles**.

- Si l'on effectue un processus **isotherme** i.e. une **transformation à température constante** (**T = cste**), alors, P et V varient de façon inverse et on a :

$$PV = \text{cste} \Rightarrow P \propto V^{-1} \quad (2.37)$$

C'est la **loi de Boyle**.

✍ Dans les conditions normales de température et de pression (CNTP), $P = 1 \text{ atm}^{(3)}$, $T_C = 0^\circ\text{C}$. Une mole de gaz parfait à CNTP occupe un volume **$V = 22,4 \text{ L}$** .



Soit d la densité d'un gaz de masse molaire M . On a : $M = 29 \times d$ ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) (2.38)

Exemple

On considère un hydrocarbure de formule $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ et de densité $d = 1,10$ par rapport à l'air.

- (1) Déterminer la masse molaire moléculaire M de cet hydrocarbure.
 - Est-ce un gaz ou un liquide ? Justifier.
- (2) On transforme 30 g de cet hydrocarbure en liquide sous une pression de 2 atm et le volume de liquide obtenu est de 1 m^3 .
 - (2.1.) Quel nom donne-t-on à ce type de transformation ?
 - (2.2.) Déterminer la température T en kelvin puis en degré Celsius nécessaire à cette transformation. On donne : $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Solution

- (1) Déterminons la masse molaire moléculaire M de cet hydrocarbure si $d = 1,10$

On sait que : $M = 29 \times d$.

AN : $M \approx 32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

- Étant donné que la formule brute de cet hydrocarbure est C_2H_6 , alors, il s'agit d'un gaz.
- (2) On donne : $P = 2 \cdot 10^{-2} \text{ atm} = 2 \cdot 10^3 \text{ Pa}$; $m = 30 \text{ g}$; $V = 1 \text{ m}^3$.
 - (2.1.) Cette transformation est appelée **liquéfaction**.
 - (2.2.) Déterminons la température T .

D'après la loi des gaz parfaits, $PV = n \times R \times T \Rightarrow T = \frac{P \times V}{n \times R} = \frac{P \times V \times M}{m \times R}$ avec $n = \frac{m}{M}$

AN : $T = 256,6 \text{ K} = -16,55 \text{ °C}$. (car $T (\text{°C}) = 273,15 - T(\text{K})$)

4.2.2. Quelques applications

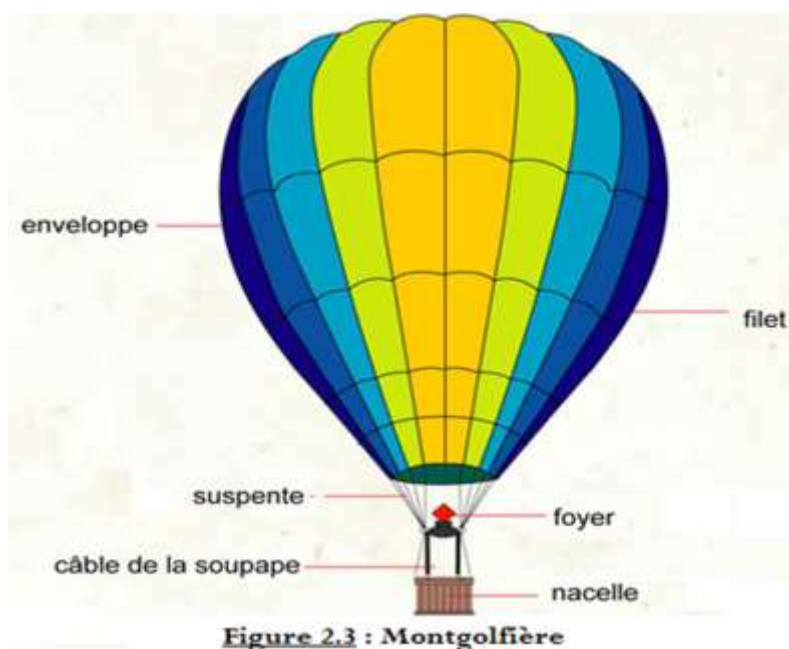
(a) Le moteur thermique

En chauffant un gaz, la pression P et le volume V augmentent ; on peut pousser ou tirer un piston ou tourner une hélice (turbine). C'est le principe de tous les moteurs thermiques (essence, gasoil, gaz, à vapeur, Stirling⁽⁴⁾, turbine à vapeur ou à gaz, etc.).

(b) Vol d'une montgolfière (ballon à air chaud)

Présentation

Une montgolfière est un ballon souple, ouvert sur l'extérieur et qui est équipé d'un puissant brûleur à gaz qui permet de chauffer l'intérieur du ballon.



- Comme le ballon est souple, la pression intérieure P_{int} est égale à la pression extérieure P_{ext} :

$$P_{\text{int}} = P_{\text{ext}} \quad (2.39)$$
- Comme le ballon est ouvert, l'air peut entrer et sortir.
- La toile du ballon n'est pas élastique, le volume du ballon reste **constant** (**transformation isochore**) :

$$V = \text{cste} \quad (2.40)$$
- On constate alors que dans la montgolfière, seuls le nombre de moles n et la température T peuvent varier.

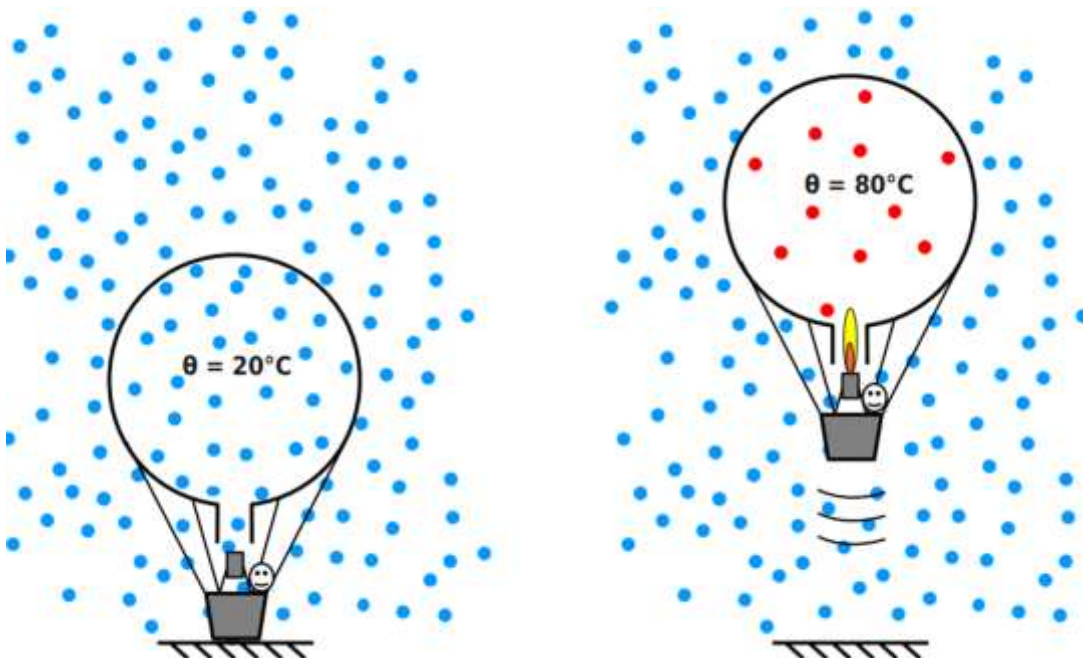


Figure 2.4 : Figures expérimentales

- Sachant que P et V sont identiques dans les deux cas de figure ci-dessus, appliquons-y la loi des gaz parfaits :

$$PV = n_1 \times R \times (\theta_1 + 273,15) \quad PV = n_2 \times R \times (\theta_2 + 273,15) \quad (*)$$

- On calcule la masse d'air contenue dans le ballon dans chaque cas, connaissant la quantité de matière n et la masse molaire moléculaire M_{air} de l'air :

$$m_1 = n_1 \times M_{\text{air}} \quad m_2 = n_2 \times M_{\text{air}} \quad (2^*)$$

(2*) dans (*) donne :

$$PV = \frac{m_1 \times R \times (\theta_1 + 273,15)}{M_{\text{air}}} \quad PV = \frac{m_2 \times R \times (\theta_2 + 273,15)}{M_{\text{air}}} \quad (3^*)$$

- En tirant les masses dans (3*), on obtient,

$$m_1 = \frac{M_{\text{air}} \times P \times V}{R \times (\theta_1 + 273,15)} \quad m_2 = \frac{M_{\text{air}} \times P \times V}{R \times (\theta_2 + 273,15)} \quad (4^*)$$

- Calculons la masse volumique ρ de l'air dans le ballon :

$$\rho_1 = \frac{m_1}{V} = \frac{M_{\text{air}} \times P}{R \times (\theta_1 + 273,15)} \quad \rho_2 = \frac{m_2}{V} = \frac{M_{\text{air}} \times P}{R \times (\theta_2 + 273,15)} \quad (5^*)$$

- On évalue la densité d de l'air dans le ballon :

$$d = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\theta_1 + 273,15}{\theta_2 + 273,15} \approx 0,83$$

- Conclusion** : $d = 0,83 < 1$, l'air chaud va flotter sur l'air froid. Donc si l'enveloppe du ballon est suffisamment légère et l'air suffisamment chaud par rapport à l'extérieur, on pourra emporter une charge plus ou moins utile.



4.2.3. Intervalle de confiance d'un GP

Nous allons procéder par un simple exercice d'échauffement.

On comprime 280 g d'un gaz parfait (GP) de densité par rapport à l'air égale à 2, dans un pneu. La pression du GP est de 3,5 bars.

Recopier et compléter le tableau ci-dessous :

T (°C)	25	30	35	40	45	50
V (m ³)						

Puis déterminer l'intervalle de confiance $I_c(V)$ si le fractile $t = 1,64$.

Solution

Données : $d = 2$; $m = 280$ g ; $P = 3,5$ bars = $3,5 \cdot 10^5$ Pa ; $R = 8,314$ J.mol⁻¹.K⁻¹

- Pour compléter ce tableau, les étapes suivantes sont à respecter :
- Expression du volume V en fonction de la température T :

$$\text{On sait que, pour un gaz parfait, } PV = n \times R \times T \Rightarrow V = \left(\frac{n \times R}{P} \right) \times T$$

$$\text{Or } \begin{cases} n = \frac{m}{M} \\ M = 29 \times d \end{cases} \Rightarrow V = \left(\frac{m \times R}{29 \times d \times P} \right) \times T = (1,15 \cdot 10^{-4}) \times T \quad (6^*)$$

- On convertit la température du tableau en kelvin, en utilisant la formule : $T(K) = 273,15 + T(^{\circ}\text{C})$, on obtient alors le tableau suivant :

T(°C)	25	30	35	40	45	50
T(K)	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15	323,15

- On complète alors le tableau, en appliquant la formule (6*) ci-dessus :

T(°C)	25	30	35	40	45	50
T(K)	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15	323,15
V (m ³) ($\times 10^{-4}$)	342,87	348,62	354,37	360,12	365,87	371,62

- Pour déterminer $I_c(V)$, les étapes suivantes sont importantes :
- Détermination de la moyenne m sur le volume

$$\text{Par définition, } m = \frac{\sum_{i=1}^6 V_i}{6} = \frac{(342,87 + 348,62 + 354,37 + 360,12 + 365,87 + 371,62) \times 10^{-4}}{6} = 0,036$$

- Détermination de l'écart-type de répétabilité $S(V)$.

$$\text{Par définition, } S^2(V) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - m)^2 = 1,8 \cdot 10^{-6} \Rightarrow S(V) = 0,00134 \text{ m}^3.$$

- Détermination de l'incertitude-type $U(V)$

$$\text{Par définition, } U(V) = \frac{S(V)}{\sqrt{n}} = \frac{0,00134}{\sqrt{6}} = 2,45 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

- On a alors : $m - t \times U(V) \leq V \leq m + t \times U(V) \Rightarrow -3,982 \leq V \leq 4,054 \quad (\text{m}^3)$

Étant donné que le volume ne peut être négatif, nous prendrons alors la valeur absolue de cet encadrement : **$3,982 \leq V \leq 4,054$** (m³).

5. Jeu bilingue

Expression française	Expression anglaise
Incertitude absolue	Absolute uncertainty
Incertitude relative	Relative uncertainty
Écart-type	Standard deviation
Variance	Variance
Loi gaussienne	Gaussian law
Étalonnage	Calibration
Incertitude élargie	Expanded uncertainty
Facteur d'élargissement	Elargement factor
Intervalle de confiance	Confidence interval
Échantillon	Sample ; specimen.
Fractile	Fractile
Intervalle de confiance unilatéral	One-sided confidence interval
Intervalle de confiance bilatéral	Bilateral confidence interval
Gaz parfait	Perfect gas
Isochore	Isochore
Isobare	Isobare
Isotherme	Isotherm

Phrase

L'incertitude-type d'une grandeur étudiée est le quotient du rapport entre l'incertitude de répétabilité et la racine carrée du nombre d'observations.

Translation

The standard uncertainty of a studied quantity is the quotient of the ratio between the uncertainty of repeatability and the square root of the number of observations.

-
- (1) Erreur : cette notion est divisée en erreur systématique et aléatoire (programme de 2^{nde} C)
- (2) Fractile : Valeur d'une fonction de répartition d'une variable aléatoire pour laquelle une certaine fraction de l'échantillon se trouve en-dessous.
- (3) Atmosphère normale : Unité de mesure de pression correspondant à la pression conventionnelle exercée par l'atmosphère terrestre au niveau de la mer. $1\text{atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1,013 \text{ bar} = 760 \text{ mmHg} = 760 \text{ torr}$.
- (4) Moteur Stirling (à lire sur https://docs.google.com/presentation/d/1rUmeFTlLkuasXYal8-nTHHXUkC9BP8AF9AgUwARO_E/edit#slide=id.i0).

**EXERCICES DE LA LEÇON 2 : INCERTITUDE SUR LA MESURE****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****Exercice 1 : Évaluation des savoirs**

- Définir : incertitude ; incertitude absolue ; incertitude relative ; incertitude-type ; intervalle de confiance.
- Énoncer la loi d'Ohm.
- Rappeler l'équation des gaz parfaits.
- Vrai ou faux
 - Un mélange isochore est un mélange à température constante.
 - Un mélange isobare est un mélange à volume constant.
 - Un mélange isotherme est un mélange à pression constante.
 - Pour des conditions normales de température et de pression, la pression vaut 761 mmHg.
 - Le nombre 0,000324 est un nombre à six (6) chiffres significatifs.
 - La différence entre deux grandeurs physiques (ou chimiques) de même grandeur est appelée incertitude-type.
 - Le facteur de qualité devrait être précisé avec l'incertitude donnée par le constructeur, dans le cas contraire, il faut 2.
 - L'intervalle de confiance est dit unilatéral lorsque $\alpha_1 \alpha_2 \neq 0$.
 - La température en kelvin et en degré Celsius sont liées par la relation : $T(^{\circ}\text{C}) = 273,15 + T(\text{K})$.
 - L'incertitude est toujours donnée par la moitié de la plus petite division.
 - Les incertitudes absolue et relative sont une indication de la précision de la mesure.
 - Les incertitudes absolue et relative sont toujours égales.
- Choisir la bonne réponse
 - L'intervalle de confiance se dit en anglais :
 - Trust interval ;
 - Confiance interval ;
 - Confidence interval ;
 - Aucune réponse.
 - L'erreur relative du nombre $100,0 \pm 0,1$ est :
 - 0,01 ;
 - 0,1 ;
 - 0,1% ;
 - Aucune réponse.
 - L'erreur absolue du nombre $100,0 \pm 0,1$ (m) est :
 - 0,01 m ;
 - 0,1 m ;
 - 0,1% ;
 - Aucune réponse
 - Une grandeur calculée vaut $a = 187,25$.
L'incertitude Δa calculée vaut $\Delta a = 1,23$.
L'écriture de la grandeur a sous la forme $a \pm \Delta a$ est :
 - $187,25 \pm 1,23$
 - $187,250 \pm 1,23$
 - Aucune réponse

- Un hydrocarbure a une densité $d = 1,52$. Sa masse molaire moléculaire M vaut :
 - $44,1 \text{ g.mol}^{-1}$
 - 44 g.mol^{-1}
 - 44 g.mol
 - Aucune réponse.
- La température dans l'espace interstellaire est de 3 K. Son équivalent en degré Celsius est :
 - 3°C
 - $270,15^{\circ}\text{C}$
 - Aucune réponse.
- En tenant compte de la précision faite sur le nombre $231,25 \pm 0,2$, la valeur de la grandeur calculée est alors :
 - 231,25
 - 231,2
 - 231,3
 - Aucune réponse.
- Après dix mesures faites sur le courant électrique, on a trouvé l'écart-type de répétabilité être égal à 0,00821 A. L'incertitude-type est alors :
 - 0,00821 A
 - $8,21 \times 10^{-3} \text{ A}$
 - $2,296.10^{-3} \text{ A}$
 - Aucune réponse.
- On introduit 3 moles d'un gaz parfait dans un cylindre de 1 m de hauteur et de 10 cm de rayon de base. La température dans le cylindre est supposée constante et vaut 0°C . Dans ces conditions, la pression est alors :
 - 650914,71 Pa.
 - 950914,71 Pa.
 - 640915,012 Pa.
 - Aucune réponse.
- On dépose une roue de 300 kg sur une table de carrée de 20 m de côtés. On donne $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$. La pression exercée par la roue sur la table est :
 - 6000 Pa.
 - 15 Pa.
 - 7,5 Pa.
 - Aucune réponse.

Exercice 2 : Évaluation des savoir-faire

- (Approche mathématique) Le staff médical d'une grande entreprise fait ses petites statistiques sur le taux de cholestérol de ses employés ; les observations sur 100 employés tirés au sort sont les suivantes.

Taux de cholestérol en cg (centre des classes)	120	160	200	240	280	320
Effectifs employés	9	22	25	21	16	7

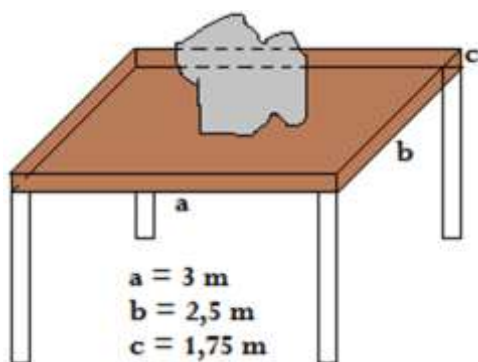
- Calculer la moyenne m_e et l'écart-type σ_e sur l'échantillon.

- 1.2. Estimer la moyenne et l'écart-type pour le taux de cholestérol dans toute l'entreprise.
- 1.3. Déterminer un intervalle de confiance pour la moyenne.
- 1.4. Apporter une brève conclusion sur le résultat obtenu.
2. On place un ballon à l'ombre : la température du gaz contenu dans le ballon est de 20°C et sa pression est $P_1 = 1,0$ bar. On place ensuite le même ballon au soleil : la température du gaz contenu dans le ballon est alors de 37°C et sa pression devient P_2 .
- 2.1. Quelles sont les variables d'état qui restent constantes au cours du changement d'état ?
- 2.2. Quel indice montre que la pression interne a augmenté ?
- 2.3. En utilisant l'équation des gaz parfaits, en déduire la valeur de la pression P_2 en bar puis en Pa.
3. Après 16 essais d'un exercice qui consistait à déposer puis soulever une pierre de sur une table de forme parallélépipédique comme le présente la figure ci-dessous, on a relevé les variations du volume V (en m^3) du parallélépipède en fonction de celles de la température T (°C) du milieu. L'ensemble des données est regroupé dans le tableau suivant :

T	0	20	20,10	20,12	20,10	20,16	20,17	20,18
V	13,13	13,14	13,15	13,16	13,15	13,20	13,21	13,23

T	20,18	20,16	20,12	20,17	20,17	20,18	20,10	20,10
V	13,23	13,20	13,16	13,21	13,21	13,23	13,15	13,15

- 3.1. Calculer les moyennes m_1 et m_2 de la température et du volume respectivement.
- 3.2. Calculer les écart-types expérimentaux $S(T)$ et $S(V)$.
- 3.3. En déduire les incertitudes-types $U(T)$ et $U(V)$.
- 3.4. Évaluer les incertitudes U_1 et U_2 dues à l'étalonnage des instruments utilisés. Prendre le facteur d'élargissement égal à 3.
- 3.5. Déterminer les intervalles de confiance $I_c(T)$ et $I_c(V)$, en supposant les distributions de probabilité être à 95% (fractile = 1,96).
- 3.6. Pour une mole de gaz dans le milieu expérimental, en déduire l'intervalle de confiance de la pression P exercée par la pierre sur la table.
- 3.7. En déduire l'intervalle de confiance de la force pressante $\vec{F}$.



PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Effet sur la densité des gaz

On gonfle deux ballons l'un avec le dioxyde de carbone et l'autre avec de l'hélium. Que peut-on prévoir ?

Situation 2 : Comparaison des Surfaces pressées

Pourquoi est-il plus douloureux de marcher sur une punaise que de s'allonger sur 500 clous ?

Situation 3 : Transformation isochore

Un pneu de voiture est gonflé à 27°C à 2 bars. Après que la voiture a roulé, la pression du pneu est de 2,2 bars.

En supposant le volume du pneu constant, et en approximant l'air du pneu par un gaz parfait, quelle est la température à l'intérieur du pneu ?

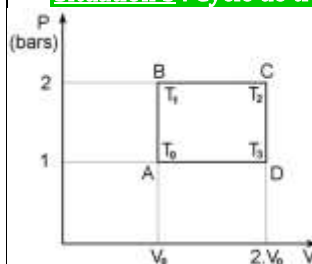
Situation 4 : Expression force, surface et pression

Deux vases cylindriques (fig. ci-dessous) sont appliqués l'un contre l'autre, de manière à former une enceinte étanche. À l'aide d'une pompe, on fait un vide très poussé à l'intérieur de cette cavité.



1. Montrer que la somme vectorielle des forces pressantes (due à la pression atmosphérique) qui s'exercent sur une moitié du cylindre ainsi formé, est une force de direction horizontale s'appliquant sur la surface d'un cercle de diamètre D , égal à celui du cylindre.
2. Calculer l'intensité de cette force en un lieu où la pression est 10^5 Pa. (Prendre $D = 8$ cm).

Situation 5 : Cycle de transformation



On réalise l'expérience suivante.

Dans un cylindre muni d'un piston, on ferme 0,1 mole d'air sous la pression $P_0 = 1,0$ bar et la température normale $T_0 = 273$ K (point A).

1. Quel est le volume V_0 de cette quantité d'air dans le cylindre ? On donne la constante des gaz parfaits $R = 8,32 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.
2. Grâce à un dispositif de chauffage, on élève la température de ce gaz en maintenant son volume constant et égal à V_0 jusqu'à ce que la pression atteigne $P_1 = 2$ bars (point B). Calculer la température T_1 correspondante.
3. L'état du gaz étant pression P_1 , et température T_1 , on augmente alors le volume de V_0 à $V_2 = 2 V_0$ en maintenant la pression constante P_1 (point C). Calculer la nouvelle température T_2 .
4. En refroidissant le gaz à volume constant V_2 (point D), puis en réduisant son volume à pression constante P_0 , on revient à l'état initial (point A). l'air a alors décrit le cycle ABCD. Calculer la température T_3 correspondant au point D.



Leçon 3

CONTRAINTES D'UNE LOI



ACTIVITÉ

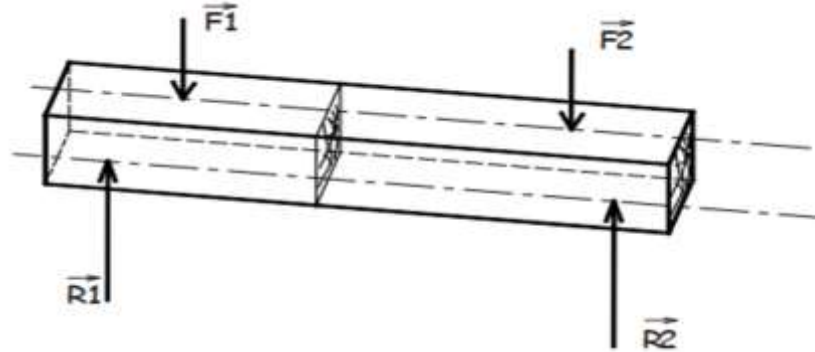
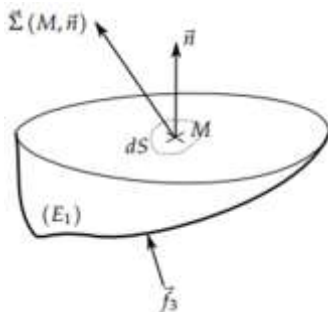


Figure 3.1 : Figure d'activité

Considérons un solide en équilibre sous l'action des forces extérieures ; si ce système est en équilibre, le système des forces est équivalent à zéro (somme vectorielle des forces est un vecteur nul).

Si on coupe ce solide en deux parties, que se passe-t-il au niveau de la coupure sur chaque petit élément de surface que nous appellerons ds ?

Objectifs

- ⇒ Définir : contrainte d'une loi physique.
- ⇒ Évaluer la contrainte due à l'élasticité, la contrainte de la loi d'Ohm et la contrainte des gaz parfaits.

1. Définition et symbole

1.1. Définition

- Du point de vue physique, les **contraintes** peuvent être vues comme des **efforts internes infinitésimaux**.
- Ce sont des efforts de cohésion qui vont s'opposer aux **déformations** du solide pour garder sa cohésion et son intégrité.
- Il est possible de déterminer ces efforts de cohésion en réalisant une coupe fictive du solide étudié.

1.2. Symbole normalisé

On considère une barre de section constante S , faite dans un matériau parfaitement uniforme et isotrope⁽¹⁾. La barre est attachée à un bout ; on applique au bout libre, une force $\vec{F}$ comme le montre la figure ci-contre.

Le rapport $\frac{\|\text{force}\|}{\text{Surface}} = \frac{F}{S}$ représente les efforts extérieurs : c'est la **pression**.

On a alors :

$$P = \frac{F}{S} = \sigma \quad (3.1)$$

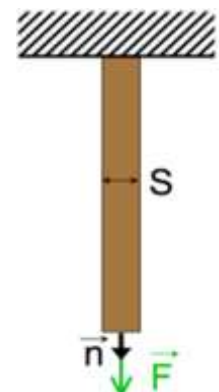


Figure 3.2

Dans cette formule,

- La force $\vec{F}$, s'exprime en Newtons de symbole **N** ;
- La surface **S**, s'exprime en mètre carré de symbole **m²** ;
- La pression **P** s'exprime en Pascal de symbole **Pa** ;
- Les efforts ou contraintes extérieures σ s'expriment en Pascal : $\sigma = P$.

Remarque

Dans cet exemple, la contrainte a la dimension de la pression et est appelée **contrainte normale**.

D'après la figure 3.2, la force $\vec{F}$ et la normale $\vec{n}$ à la surface sont portées par le même axe : elles sont donc **colinéaires**. On peut alors assister aux situations suivantes :

- Une **extension** (**traction**, **tension**) uniaxiale⁽²⁾ : $\vec{F} \cdot \vec{n} > 0$ (3.2)

- Une **compression** uniaxiale : $\vec{F} \cdot \vec{n} < 0$. (3.3)

Exemple

Un tabouret de masse $m = 2,5$ kg repose sur le sol par quatre pieds de 6 cm^2 de section chacun. Quelle est la pression exercée sur le sol lorsqu'une personne de $57,5$ kg monte sur ce tabouret ? Prendre $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

Solution

Données : $m_1 = 2,5$ kg ; $m_2 = 57,5$ kg ; $M = m_1 + m_2 = 60$ kg ; $S = 4 \times 6 \text{ cm}^2 = 24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

Par définition, $\sigma = \frac{F}{S} = \frac{M \times g}{S} = 25 \times 10^4 \text{ Pa}$

2. Contraintes des lois physiques

Pour cette partie, nous avons choisi trois lois physiques :

- Loi de compression et de détente (loi d'élasticité $\Rightarrow$ loi de Hooke)
- Loi d'Ohm
- Loi des gaz parfaits.

2.1. Contrainte élastique (loi de Hooke)

- Lorsqu'un corps est soumis à des forces extérieures, il y a un changement de sa forme ou de ses dimensions. Ce changement s'appelle **déformation**.
- La **déformation** est la modification que subit un corps sous l'effet de la force qu'il subit
- La déformation est plus ou moins grande dépendamment de la grandeur des forces et des matériaux qui sont en cause. On peut alors assister soit à un **étirement** soit à une **compression** du corps comme le montrent les figures 3.3 ci-dessous.

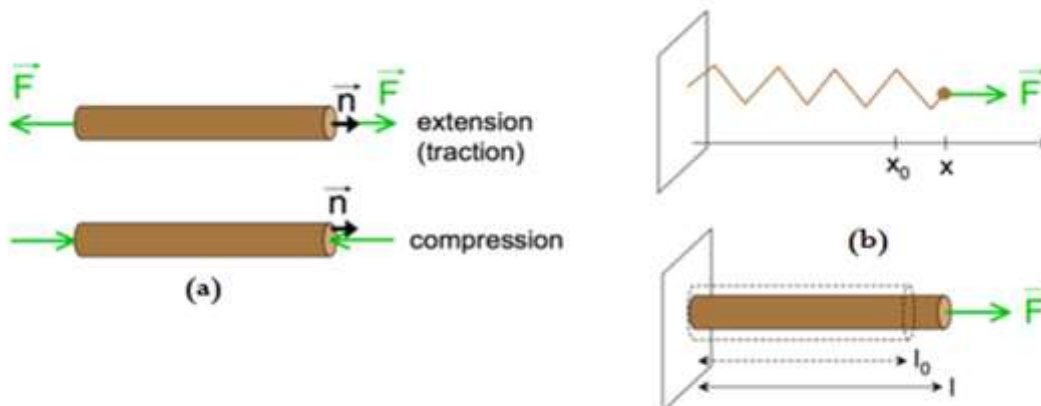


Figure 3.3 : Mise en évidence de l'étirement et raccourcissement d'un corps

- Comportement élastique linéaire
 - **Ressort** : $F_{\text{ext}} = k(x - x_0) = k\Delta x$ (3.4)



- L'allongement du ressort (fig. 3.3. (b.1)) par rapport à sa longueur d'équilibre est :

$$\Delta x = x - x_0 \quad (\text{en m}) \quad (3.5)$$

- k (en N.m^{-1}) = constante de raideur du ressort. Elle dépend du matériau dont est fait le ressort. Si le matériau est dur, k est élevé, il faut alors une force plus grande pour obtenir le même allongement.

k dépend aussi des paramètres géométriques du ressort : longueur à vide x_0 et section S

$$\begin{cases} k \propto x_0^{-1} \\ k \propto S \end{cases} \quad (3.6)$$

Remarque

Pour démontrer la première relation de (3.6), il suffit de placer plusieurs ressorts identiques en série et la seconde en plaçant ces ressorts en parallèle.

- Par analogie : barre sous traction : $\sigma = E \times \varepsilon$ (3.7)

- La **déformation longitudinale** (δ) : C'est l'allongement ou le raccourcissement que subit une pièce sous l'effet d'un effort de traction ou de compression :

$$\delta = \ell - \ell_0 \quad (\text{en m}) \quad (3.8)$$

- La **déformation unitaire** (ε) : C'est la déformation par unité de longueur. Elle est sans unité.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\ell_0} = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} \quad (3.9)$$

- Le module de Young (élasticité) (E) : C'est la constante de proportionnalité entre la contrainte qu'un matériau subit et sa déformation unitaire. C'est une constante propre à chaque matériau :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} > 0 \quad (3.10)$$

Remarque

✍ **Loi de HOOKE** : « Lorsqu'on charge un matériau, si la contrainte produite demeure inférieure à sa limite élastique, sa déformation est proportionnelle à la déformation qu'il subit : $\sigma = E \times \varepsilon$ »

✍ Dans le domaine du linéaire, $\varepsilon \ll 1$.

✍ Pour un allongement radial, $\delta_R = R - R_0$ (m) (3.11)

✍ La déformation unitaire radiale est : $\varepsilon_R = \frac{\delta_R}{R_0}$ (3.12)

✍ Le coefficient de poisson (ν) est : (à voir plus loin) $\nu = -\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_R}$ (3.13)

C'est le rapport entre les déformations unitaires transversale ε_L et axiale ε_R , quand la déformation a lieu dans les limites d'élasticité.

✍ La loi de Hooke en cisaillement est telle que : $\tau = G \times \gamma$ (3.14)

- La grandeur G est appelée **module de rigidité** et s'exprime en pascal : $G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\tau}{\varepsilon_s}$ (3.15)

- La grandeur τ est la **contrainte en cisaillement** : $\tau = \frac{V}{A}$ ($V = F$ en Newton) (3.16)

- La grandeur ε_s est la déformation unitaire : $\varepsilon_s = \frac{\delta_s}{L}$ (3.17)

- L'angle de déformation γ ou déformation angulaire (en radians) est : $\text{tg} \gamma \approx \gamma = \varepsilon_s = \frac{\delta_s}{L}$ (3.18)

✍ La relation entre le module de rigidité G , le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson est donnée par :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.19)$$

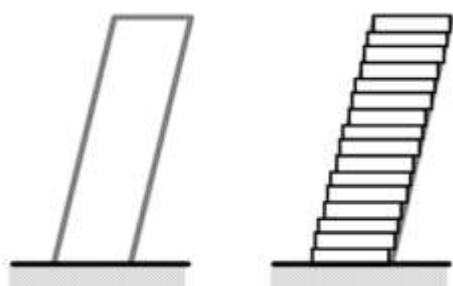


Figure 3.4

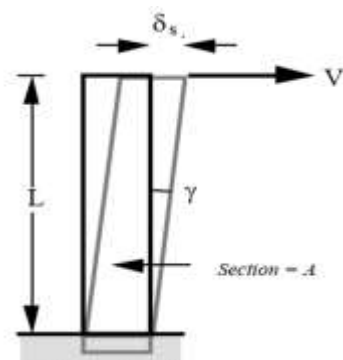


Figure 3.5

Exemples

Ex.1 : Une barre d'acier (module d'élasticité $E = 200 \text{ GPa}$) de 3 m de longueur et de section carrée ayant 12,5 mm de côté, est sollicitée par une tension de 21360 N. Quel est son allongement total ?

Solution

Données :

$L_0 = 3 \text{ m}$; $S = 12,5 \text{ mm} \times 12,5 \text{ mm} = 1,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$; $E = 200 \text{ GPa} = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$; $F = 21360 \text{ N}$; $\delta = ?$

- On sait que : $\sigma = \frac{F}{S} = \frac{21360}{1,56 \cdot 10^{-4}} = 1369230769 \text{ Pa} = 136,9 \text{ MPa}$

- On sait que : $\sigma = E \times \varepsilon \Rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{136,9}{2 \cdot 10^5} = 68,45 \cdot 10^{-5}$

- On a alors : $\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \Rightarrow \delta = \varepsilon \times L_0 = 205,35 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 2,0535 \text{ mm}$

Ex.2 : Calculer la déformation angulaire d'une tige d'aluminium de 5 m de long et de 1 cm^2 de section qui est soumise à un effort transversal de 100 kN.

Solution

Données : $L_0 = 5 \text{ m}$; $S = 1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$; $F = 100 \text{ kN} = 10^5 \text{ N}$; $\gamma = ?$

- On sait que : $\tau = \frac{F}{S} = \frac{10^5}{10^{-4}} = 10^9 \text{ Pa} = 1 \text{ GPa}$

- On a alors : $\tau = G \times \gamma \Rightarrow \gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{1}{27} = 0,037 \text{ rad}$

- On regroupe les propriétés des matériaux couramment utilisés en construction dans le tableau suivant :

Matériau	Masse volumique ρ [kg/m ³]	Limite élastique σ_e [MPa]	Cont. ultime σ_u [MPa]	Module élasticité E [GPa]	Module rigidité G [GPa]	Coef. de Poisson ν	Coef.dila. thermique α $10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
Acier	7,85	300,0	550,0	200,0	80,0	0,25	12,0
Aluminium	2,7	300,0	400,0	72,0	27,0	0,33	24,0
Béton	2,4	-	30,0	25,0	11,0	0,15	11,3
Bois (fib.)	0,55	-	40,0	10,0	-	-	5,4
Cuivre	8,9	50,0	150,0	120,0	45,0	0,33	16,6
Laiton	8,5	200,0	350,0	100,0	37,0	0,35	18,9

Tableau 3.1 : Propriétés des matériaux couramment utilisés en construction

2.2. Contrainte sur la loi d'Ohm

- Comme nous l'avons énoncé à la leçon précédente, la loi d'Ohm est cette loi qui met en relation,
 - La tension électrique **U** (en volts), qui joue le rôle de tension **T** d'un ressort ($T = kx$) en mécanique et qui se mesure à l'aide d'un **voltmètre**.
 - Le courant électrique **I** (en Ampères), qui joue le rôle de vitesse (linéaire $\dot{x}$ ou angulaire $\dot{\theta}$) en mécanique et qui se mesure à l'aide d'un **ampèremètre**.
 - La résistance **R** (en Ohms), qui joue le rôle de coefficient de frottement b ($\vec{f} = -b \times \vec{V}$) en mécanique et qui se mesure à l'aide d'un **ohmmètre**. Voir figure 3.6.

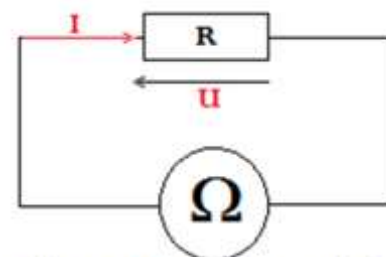


Figure 3.6 : Mesurage de la résistance R

- La loi d'Ohm s'écrit alors : $U = R \times I \Rightarrow R = \frac{U}{I}$ (3.20)

Dans cette relation,

- Lorsqu'on ajoute un résistor en série dans un circuit, l'**intensité** du courant **diminue**.
- Plus la résistance est grande, plus l'intensité électrique est petite.
- Tout conducteur présente une **résistance au passage du courant électrique** ce qui provoque son **échauffement** : c'est l'**effet Joule**.
- On constate alors que, la résistance joue le rôle d'effort extérieur : c'est la **contrainte** σ de la loi d'Ohm. On a alors :

$$\sigma_{\Omega} = \frac{U}{I} = R \quad (\text{en } \Omega) \quad (3.21)$$

Remarque

Dans le tracé de la caractéristique $U = f(I)$, σ_{Ω} représente la pente de la droite obtenue et son inverse, la **conductance G** qui s'exprime en **siemens** ($S = \Omega^{-1}$).

2.3. Contrainte sur la loi des gaz parfaits

Dans cette partie, nous allons juste utiliser les relations déjà vues, afin de ressortir la contrainte des gaz parfaits.

Nous avons vu en (2.34) que : $P \times V = n \times R \times T$ où P est la pression (en Pa), V le volume (en m^3), n le nombre de moles (en mol), $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ la constante des gaz parfaits et T (en K) la température.

Selon (3.1), $P = \frac{F}{S} = \sigma$ on a alors, $\begin{cases} PV = nRT \\ P = \sigma_{GP} \end{cases} \Rightarrow \sigma_{GP} = \frac{F}{S} = \frac{n \times R \times T}{V} = \frac{m \times R \times T}{M \times V}$ (3.22)

3. Jeu bilingue

Expression française	Expression anglaise
Contrainte	Stress
Déformation	Strain
Module de Young	Young modulus
Rigidité	Rigidity, stiffness
Cisaillement	Shear

Sentence: **HOOKE's law:** "When loading a material, if the stress produced remains below its elastic limit, its deformation is proportional to the deformation it undergoes: $\sigma = E \times \epsilon$ ".

- (1) **Isotrope** : Ensemble des corps ayant les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions.
- (2) **Uniaxiale** : Même axe ; un seul axe.

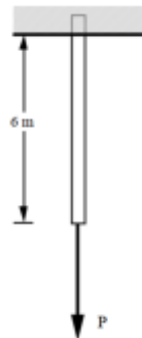
**EXERCICES DE LA LEÇON 3 : CONTRAINTES D'UNE LOI****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****Exercice 1 : Évaluation des savoirs**

- Définir : contrainte ; déformation ; élasticité ; module de Young ; déformation unitaire ; déformation longitudinale.
- Énoncer la loi de Hooke.
- Vrai ou faux
 - La loi de Hooke s'applique sur tous les corps déformables.
 - On peut déterminer la contrainte de toutes les lois physiques.
 - L'unité de la contrainte est toujours le pascal.
 - La tension électrique joue le rôle de vitesse en mécanique.
 - Le courant électrique joue le rôle de vitesse en mécanique.
 - La résistance électrique s'exprime en oméga et joue le rôle de vitesse en mécanique.
 - La loi de Hooke est représentée par la relation : $\sigma = U \times I$
 - Tout corps déformable est élastique.
 - Un fil rigide est élastique.
 - Un mélange isotrope est un mélange homogène.
- Choisir la bonne réponse
 - Pour un allongement radial, la déformation δ est donné par :
 - $\delta = L - L_0$ (m)
 - $\delta = R - R_0$ (m)
 - $\delta = \gamma - \gamma_0$ (rad)
 - La contrainte de cisaillement τ est donnée par :
 - $\tau = G / \gamma$;
 - $\tau = \gamma / G$;
 - $\tau = G \times \gamma$
 - À l'équilibre, un ressort est long de 3 cm. On accroche à son extrémité inférieure, un solide, celui-ci s'allonge alors de 2 cm de plus que la position précédente. Sa déformation unitaire est alors :
 - 0,67
 - 0,67 cm
 - 0,67 m
 - Un individu de 60 kg s'assoit sur une chaise en plastique de 500 g dont la section de chacun de ses pieds est de 2 cm². La contrainte sur le sol est alors de : (g = 10 SI)
 - $75,625 \cdot 10^{-4}$ Pa
 - $75,625 \cdot 10^4$
 - $75,625 \cdot 10^4$ Pa.
 - La dilatation thermique ε , le coefficient thermique α et la variation de température $\Delta\theta$ sont liées par :
 - $\varepsilon = \alpha / \Delta\theta$
 - $\varepsilon = \alpha \times \Delta\theta$
 - $\varepsilon = \Delta\theta / \alpha$.

Exercice 2 : Évaluation des savoir-faire

- Quelle est la déformation unitaire que subit une pièce de métal de 5 m de long qui s'étire de 3 mm sous l'action d'une charge de 151 kN ?

- On applique une charge P de 285 kN à la tige de la figure ci-dessous et elle s'allonge de 3,8 mm. La tige a une section carrée de 20 cm par 20 cm. Calculer :
 - La déformation unitaire ;
 - La contrainte en traction ;
 - Son module d'élasticité.



- Combien de résistors de résistance 5 Ω faut-il associer, et de quelle façon, pour obtenir un conducteur ohmique de résistance : a) 20 Ω ; b) 1 Ω ; c) 7,5 Ω ?

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES**Situation 1 : Détermination du courant I**

On fait passer un courant d'intensité I dans un conducteur de résistance $R = 10 \Omega$. Ce résistor est plongé dans un calorimètre dont la capacité calorifique est $K = 750 \text{ J/}^\circ\text{C}$. L'élévation de la température est de 6°C en 5 min. Quelle est la valeur numérique du courant I ?

Situation 2

Un poteau de bois est utilisé pour supporter une charge compressive dans le sens des fibres. La section du poteau est rectangulaire et vaut 235 mm $\times$ 230 mm. Évaluer la charge maximum permise. Données : contrainte utile tolérée par le bois : 40 MPa ; facteur de sécurité : $n = 8$.

Situation 3

Un fil de cuivre a une longueur d'1 m à 20°C ; à 100°C , sa longueur devient 1,0016 m. que faut son coefficient de dilatation linéaire ? À quelle température sa longueur sera-t-elle de 1,0020 m ?

Situation 4

Pour votre prochaine fête, vous invitez une femme et un éléphant africain. Montrer à l'aide des calculs, lequel des deux cause des dommages plus importants à votre parquet. La masse de l'éléphant vaut 5,5 t et chacun de ses pieds peut être considéré comme un disque ayant un diamètre de 30cm. Pour simplifier, on suppose que la femme de 60 kg répartie tout son poids sur les talons carrés (côté 1cm) de ses chaussures.





EXERCICES DE SYNTHÈSE DU MODULE 1

Exercice 1 : Mesure et incertitude

On effectue 20-mesures du diamètre d'un cylindre à l'aide d'un pied à coulisse et on obtient $S(X) = 0,018 \pm 0,01$ mm.

1. Pour quelle raison a-t-on effectué plus d'une mesure ?
2. L'écriture de $S(X)$ est-elle correcte ? Sinon, corriger-la.
3. En vous aidant de l'écriture de $S(X)$, déterminer son incertitude relative I_R .
4. Évaluer l'incertitude-type sur la moyenne de ces 20-observations.

Exercice 2 : Homogénéité d'une relation

En analyse dimensionnelle, la force est exprimée par l'équation : $[F] = [M][L][T]^{-2}$ où M représente la masse en kilogramme, L la longueur en mètre et T le temps en seconde.

Lors du décollage d'un avion, le débit D d'éjection des gaz est $D = 29.10^2 \text{ kg.s}^{-1}$ et la vitesse d'éjection des gaz est $V = 4,01 \text{ km.s}^{-1}$.

Montrer que le produit $D \times V$ est homogène ou équivalent à une force.

Exercice 3 : Notion d'encadrement

On mesure les dimensions d'une feuille de papier avec une règle graduée au millimètre. On trouve une largeur $\ell = 21,0$ cm et une longueur $L = 29,7$ cm.

1. (a) Exprimer la largeur et la longueur sous la forme $\ell \pm \Delta\ell$ et $L \pm \Delta L$ en ne tenant compte que de l'incertitude de lecture.
(b) Donner l'incertitude relative associée à ces deux mesures.
2. (a) En déduire un encadrement de la surface S de la feuille, puis exprimer cette surface sous la forme $S \pm \Delta S$ (incertitude relative)
(b) En déduire l'incertitude relative sur cette surface.

Exercice 4 : Incertitude et série de mesures

Plusieurs mesures d'une grandeur x ont donné les résultats suivants : 4,24 ; 4,12 ; 4,32 ; 4,18 ; 4,30 ; 4,28 ; 3,01.

1. Donner la valeur moyenne et l'écart-type σ de cette série de mesure.
2. Sachant que, pour un niveau de confiance de 95%, l'incertitude absolue Δx est donnée par la formule $\Delta x = \frac{2\sigma}{\sqrt{n}}$, n étant le nombre de mesures effectuées, calculer cette incertitude.
3. La valeur réelle est de 4,23. Commenter. La mesure est-elle juste ? Fidèle ? Que pourrait-on faire pour améliorer ce résultat ?

Exercice 5 : Estimation de l'intervalle de confiance

Une entreprise commercialise un polymère servant à la fabrication de microprocesseurs et stocké dans une cuve dont la caractéristique à contrôler est la viscosité ; celle-ci doit être comprise entre 75 et 95 pour pouvoir commercialiser le polymère. Quatre extractions ont été réalisées dans des zones différentes de la cuve et on conduit aux valeurs de l'échantillon : $x_1 = 78$, $x_2 = 85$, $x_3 = 91$ et $x_4 = 76$. Ayant choisi un seuil de niveau de confiance à gauche de la cuve de 10%, le fractile d'ordre 0,95 de la loi normale centrée réduite vaut 1,64.

1. Déterminer la moyenne de ces mesures.
2. Calculer l'écart-type de répétabilité.
3. En déduire l'intervalle de confiance de ces mesures.
4. On évalue le risque de dépasser le seuil, et on trouve 95%.
4.1. Évaluer le risque à droite.
4.2. De quel type d'intervalle de confiance s'agit-il ?
4.3. Évaluer la probabilité $P(x \in I_C)$.
5. L'incertitude-type due à la justesse de l'instrument utilisé pour ces extractions est de 3,40.
Quelle est l'incertitude retenue sur la grandeur extraite ?

Exercice 6 : Binôme de dilatation linéaire

Un cube a une arête de longueur a_0 à 0°C .

1. Quelle est la longueur de l'arête à la température T si le cube est fait d'une substance de coefficient de dilatation linéaire λ ?
2. Quel est le volume du cube à la température T ?
Montrer que ce volume peut se mettre sous la forme $V \approx V_0 (1 + 3\lambda T)$.

On donne la formule d'approximation suivante : si λ petit, $(1 + \lambda)^n \approx 1 + n\lambda$.

Exercice 7 : Type expérimental

On considère le tableau ci-dessous :

U(V)	0	2,97	4,52	6,03	7,57	9,06	12,11
I (mA)	0	13,3	20,2	27,0	33,9	40,6	54,5

Tracer la courbe $U = f(I)$ et en déduire la contrainte de ce circuit. Quelle est la valeur de la conductance ?

Échelle : 1cm → 5 mA ; 1cm → 1 V.

Exercice 8 : Exploitation de la loi des gaz parfaits

On réalise la compression d'un gaz. Le volume initial est $V_1 = 10 \text{ cm}^3$, la pression initiale est $P_1 = 1,0$ bar. Après la compression, le volume est $V_2 = 3 \text{ cm}^3$ et la pression P_2 .

Déterminer la valeur de la pression P_2 .



CORRECTION DES EXERCICES DU MODULE 1

Leçon 1 : MESURE DES GRANDEURS PHYSIQUE ET CHIMIQUE

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

Exercice 1 : Évaluation des savoirs

1. Définitions :

Instrument de mesure : C'est appareil servant à mesurer une grandeur physique ou chimique.

Grandeur physique : C'est un élément mesurable, permettant de décrire sans ambiguïté une partie d'un phénomène physique.

Métrologie : C'est la science de la mesure associée à l'évaluation de son incertitude.

Ordre de grandeur : C'est la puissance de 10 la plus proche d'un résultat.

Chiffre significatif : C'est un chiffre dont l'instrument de mesure permet de le connaître avec une fiabilité suffisante.

2. Citons les qualités métrologiques d'un instrument de mesure :

L'étendue de mesure ; la résolution ; la sensibilité ; la fidélité ; l'exactitude ; la justesse ; la reproductibilité ; la répétabilité.

3. Complétons les pointillés :

3.1. Voltmètre ; mesure.

3.2. Celsius ; Kelvin ; $T(K) = 273,15 + T(^{\circ}C)$

3.3. Étendue de mesure ; maximale et minimale ; portée maximale ; portée minimale.

3.4. $0,0521 \text{ m} = 5,21 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 5,21 \cdot 10^1 \text{ mm}$ et a pour ordre de grandeur $10^{1+1} = 100 \text{ mm}$ ou $0,1 \text{ m}$.

3.5. $210 \text{ [m]} : 0,02 \text{ [m]} = 10500 = 105 \cdot 10^2$ et pour ordre de grandeur 10^4 ; possède 5-chiffres significatifs.

4. Vrai (V) ou faux (F)

Q	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
R	F	F	F	F	F	V

5. Donnons la notation scientifique des nombres suivants :

5.1. $1 = 1,0 \cdot 10^0$.

5.2. $0,1 = 1,0 \cdot 10^{-1}$.

5.3. $100,03 = 1,0003 \cdot 10^2$.

5.4. $0,0250 + 852 = 852,025 \approx 852$.

5.5. $0,158 \times 125,03 = 19,75474 \approx 19,75$

Exercice 2 : Évaluation des savoir-faire

1. On dispose de deux longueurs : le diamètre de l'atome d'aluminium $L_1 = 0,00000024 \text{ mm}$ et le diamètre d'un virus $L_2 = 20 \text{ nm}$.

1.1. Convertissons ces grandeurs en mètres :

$L_1 = 0,00000024 \text{ mm} = 0,0000000024 \text{ m}$

$L_2 = 20 \text{ nm} = 0,00000002 \text{ m}$

1.2. Écrivons les valeurs en écriture scientifique :

$L_1 = 0,00000000024 \text{ m} = 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ m}$; il possède donc deux chiffres significatifs.

$L_2 = 0,00000002 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m}$; il possède donc un chiffre significatif.

1.3. Donnons leur ordre de grandeur

L_1 a 10^{-10} m comme ordre de grandeur.

L_2 a 10^{-8} m comme ordre de grandeur.

Calcul du rapport R des ordres de grandeur :

$$R = \frac{10^{-8}}{10^{-10}} = 100$$

1.4. Déterminons cet objet.

L'ordre de grandeur de $L_3 = 0,0502 \text{ } \mu\text{m} = 5,02 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ est 10^{-7} m , aucun des deux objets n'a le même ordre de grandeur.

2. On effectue des mesures répétées sur la valeur de la température d'un corps et on obtient les valeurs extrêmes suivantes : $\theta_1 = 300,201^{\circ}\text{C}$ et $\theta_2 = 304,202^{\circ}\text{C}$.

2.1. L'instrument de mesure utilisé est le **thermomètre**.

2.2. Donnons les ordres de grandeur de ces valeurs

$\theta_1 = 300,201^{\circ}\text{C} = 3,00201 \cdot 10^2 ^{\circ}\text{C}$.

$\Rightarrow \text{OG}_1 = 10^2 ^{\circ}\text{C} = 100 ^{\circ}\text{C}$

$\theta_2 = 304,202^{\circ}\text{C} = 3,04202 \cdot 10^2 ^{\circ}\text{C}$.

$\Rightarrow \text{OG}_2 = 10^2 ^{\circ}\text{C} = 100 ^{\circ}\text{C}$

Autrement (encadrement)

• $100 < 300,201 < 500 \Rightarrow 300,201$ est plus proche de 100 que de 500, donc son OG = $100 ^{\circ}\text{C}$.

• $100 < 300,202 < 500 \Rightarrow 300,201$ est plus proche de 100 que de 500, donc son OG = $100 ^{\circ}\text{C}$.

2.3. Déterminons la fidélité F du thermomètre

$$\text{Par définition, } F = \pm \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} = 5 \cdot 10^{-4} ^{\circ}\text{C}$$

3. Par un calcul d'une grandeur A, la calculatrice donne le résultat suivant : $A = 3,183098862$.

Recopions et complétons le tableau.

Chiffre significatif	Valeur de A
1	3
2	3,2
3	3,18
4	3,183
5	3,1831
6	3,18310
7	3,183099
8	3,1830989
9	3,18309886

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Jeu bilingue

Traduction (en anglais)

P1 : Une mesure expérimentale est toujours une approximation, elle dépend de l'appareil de mesure et de l'expérimentateur.

T1 : An experimental measurement is always an approximation, it depends on the measuring device and the experimenter.



P2: La qualité métrologique d'un instrument de mesure, est l'ensemble des données caractérisant la qualité de la mesure effectuée par le dispositif considéré.

T1: The metrological quality of a measuring instrument is the set of data characterizing the quality of the measurement performed by the device under consideration.

Situation 2 : Détermination de la sensibilité d'un instrument de mesure : expérience.

À l'aide d'un montage approprié, on a pu relever les variations de la tension électrique U en fonction de celles du courant I et les résultats sont portés dans le tableau ci-dessous :

$U(V)$	10	14	18	22	26
$I(A)$	6,67	9,33	12	14,67	17,33

1. Réalisons la figure de cette expérience

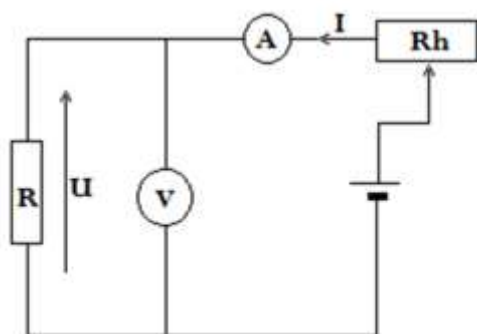
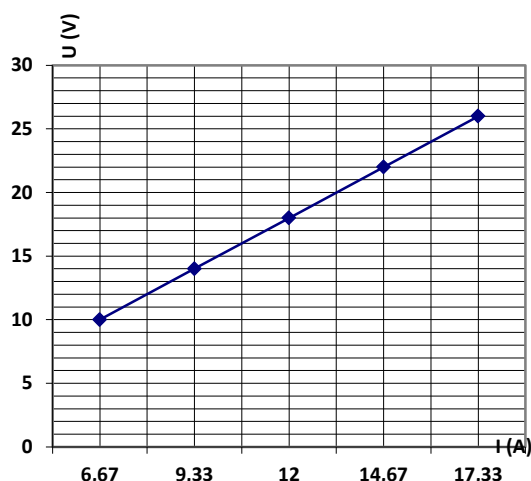


Fig. expérimentale

2. Réalisons la courbe $U = f(I)$



Carcatéristique courant-tension

3. Déterminons graphiquement la sensibilité S
Par définition, la sensibilité correspond à la pente de la courbe. On a alors :

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{26 - 10}{17,33 - 6,67} = 1,5$$

L'unité de S est l'**Ohm** de symbole Ω .

Son appareil de mesure est l'**ohmmètre**.

4. $\frac{1}{S} = 0,67 \cdot \Omega^{-1} = 0,67 \cdot S$ donc S^{-1} représente la **conductance**.

Situation 3 : Réalité ou fiction

Données :

- Nombre de lingots : $n = 60$;
- Forme lingot : parallélépipède : $a = 9 \text{ cm}$; $b = 4 \text{ cm}$; $c = 2 \text{ cm}$;
- Volume $V = a \times b \times c = 72 \text{ cm}^3 = 72 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$;
- Masse volumique : $\rho = 6,97 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
- Constante gravitationnelle terrestre : $g_T = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1. Calculons la masse M (en kg) du butin et donnons le résultat en notation scientifique.

Par définition, m , ρ et V sont liés par :

$$m = \rho \times V$$

Où m représente la masse d'un lingot d'or.

AN : $m = 501,84 \text{ kg}$.

La masse M du butin est alors :

$$M = n \times m$$

AN : $M = 30110,4 \text{ kg}$

Écriture scientifique : $M = 3,01104 \cdot 10^4 \text{ kg}$.

2. Déterminons la poids P du butin sur Terre.

Par définition,

$$P = M \times g_T$$

AN : $P = \underbrace{30110,4}_{1 \text{ décimale}} \times \underbrace{9,81}_{2 \text{ décimales}} = 295383,024 \text{ N}$

$P = 295383,0 \text{ N}$

3. Oui cela est possible, car sur Mars, la gravité est faible par rapport à la Terre et les objets semblent alors être plus légers que sur Terre.

***** **FIN** *****

**Leçon 2 : INCERTITUDE SUR LA MESURE****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****Exercice 1 : Évaluation des savoirs****1. Définitions :**

Incertitude : C'est la valeur qui caractérise la dispersion des valeurs pouvant être attribuée à la grandeur mesurée.

Incertitude absolue : C'est la grandeur qui représente la moitié de l'intervalle à l'intérieur duquel on est certain que se trouve la valeur exacte de la mesure.

Incertitude relative : C'est le quotient de l'incertitude absolue d'une mesure par la mesure elle-même.

Incertitude-type : Soit A une variable aléatoire du mesurage. On appelle incertitude-type notée $u(a)$, la dispersion des valeurs (écart-type) que peut prendre A.

Intervalle de confiance : C'est l'encadrement d'une valeur réelle que l'on cherche à estimer à l'aide des mesures prises par un procédé aléatoire.

2. Énonçons la loi d'Ohm

« La différence de potentielle U aux bornes d'un conducteur ohmique, est égale au produit de sa résistance R par l'intensité I du courant qui le traverse ».

3. Rappelons l'équation des gaz parfaits (GP)

$$P \times V = n \times R \times T$$

- P : pression en pascal (Pa)
- V : volume en mètre cube (m^3)
- n : nombre de moles (mol)
- R : constante des gaz parfaits = $8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
- T : la température en Kelvin (K).

4. Vrai (V) ou faux (F)

Q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R	F	F	F	F	F	F	V	F	F	F	V	F

5. QCM

Q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	(c)	(c)	(b)	(a)	(b)	(b)	(c)	(c)	(d)	(c)

Exercice 2 : Évaluation des savoir-faire**1. Nombre d'employé : n = 100 employés.****1.1. Calculons :**

- Moyenne m_e :

$$m_e = \frac{120 \times 9 + 160 \times 22 + 200 \times 25 + 240 \times 21 + 280 \times 16 + 320 \times 7}{100}$$

Soit, $m_e = 213,6 \approx 214$.

- L'écart-type σ_e :

$$\sigma_e = \sqrt{V} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^6 n_j (x_j - m_e)^2} \quad (V = \text{variance})$$

$$\text{AN:} \quad \sigma_e = 55,77.$$

1.2. Estimons la moyenne m et l'écart-type $\tilde{\sigma}_e$ pour le taux de cholestérol dans l'entreprise.

On a : $m = m_e = 214$.

$$\text{Par définition,} \quad \tilde{\sigma}_e = \sigma_e \sqrt{\frac{n}{n-1}}$$

$$\text{AN:} \quad \tilde{\sigma}_e = 56,05.$$

1.3. Déterminons un intervalle de confiance $I_C(m_e)$ pour la moyenne.

En estimant un seuil de 95%, l'intervalle de confiance pour la moyenne sera alors :

$$I_C(m_e) = \left[m_e - t_\alpha \frac{\tilde{\sigma}_e}{\sqrt{n}}; m_e + t_\alpha \frac{\tilde{\sigma}_e}{\sqrt{n}} \right]$$

Avec $t_\alpha = 1,96$ (le fractile)

$$\text{AN:} \quad I_C(m_e) = [203,01; 224,99]$$

1.4. Conclusion : Le taux moyen de cholestérol est, à un seuil de confiance de 95%, situé entre 203 et 225 cg.**2. Données :**

Ombre : $T_1 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$; $P_1 = 1,0 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$,
Soleil : $T_2 = 37^\circ\text{C} = 310 \text{ K}$; $P_2 = ?$

2.1. Les variables d'état qui restent constantes au cours du changement d'état sont :

- Le volume V ;
- Le nombre de moles n.

2.2. C'est la température, car celle-ci passe de 20°C à 37°C .**2.3. Exploisons l'équation des GP pour déterminer P_2 .**

$$\begin{cases} P_1 V = n R T_1 \\ P_2 V = n R T_2 \end{cases} \Rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow P_2 = \frac{P_1 \times T_2}{T_1}$$

$$\text{AN:} \quad P_2 = 1,85 \text{ bar} = 1,85 \cdot 10^5 \text{ Pa}.$$

3. Exploitation du tableau.**3.1. Calculons les moyennes m_1 et m_2 .**

$$m_1 = \frac{0 + 20 + 20,10 \times 4 + 20,12 \times 2 + 20,16 \times 2 + 20,17 \times 3 + 20,18 \times 3}{16}$$

Soit, $m_1 = 302,01/16 = 18,88$.

$$m_2 = \frac{13,13 + 13,14 + 13,15 \times 4 + 13,16 \times 2 + 13,20 \times 2 + 13,21 \times 3 + 13,23 \times 3}{16}$$

Soit, $m_2 = 210,91/16 = 13,18$.

3.2. Calculons les écart-types expérimentaux $S(T)$ et $S(V)$.

$$S(T) = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \sqrt{\sum_{i=1}^{16} (T_i - m_1)^2}$$



Soit, $S(T) = \frac{\sqrt{380,08}}{\sqrt{15}} \Rightarrow S(T) = 5,03 \text{ } ^\circ\text{C}.$

• $S(V) = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \sqrt{\sum_{j=1}^{16} (V_j - m_2)^2}$

Soit, $S(V) = \sqrt{\frac{0,0195}{15}} \Rightarrow S(V) = 0,036 \text{ m}^3.$

3.3. Déduisons-en les incertitudes-types $U(T)$ et $U(V)$.

• $U(T) = \frac{S(T)}{\sqrt{16}} = 1,26 \Rightarrow U(T) = 1,26 \text{ } ^\circ\text{C}.$

• $U(V) = \frac{S(V)}{\sqrt{16}} = 9.10^{-3} \Rightarrow U(V) = 9.10^{-3} \text{ m}^3.$

3.4. Évaluons les incertitudes U_1 et U_2 dues à l'étalonnage des instruments utilisés. Prendre $k = 3$.

• $U_1 = k \times U(T) \quad \text{AN:} \quad U_1 = 3,78 \text{ } ^\circ\text{C}.$

• $U_2 = k \times U(V) \quad \text{AN:} \quad U_2 = 27.10^{-3} \text{ m}^3.$

3.5. Déterminons $I_C(T)$ et $I_C(V)$ si $t_\alpha = 1,96$

• $I_C(T) = [m_1 - t_\alpha U(T); m_1 + t_\alpha U(T)]$

$I_C(T) = [16,41; 21,35]$

• $I_C(V) = [m_2 - t_\alpha U(V); m_2 + t_\alpha U(V)]$

$I_C(V) = [13,16; 13,19]$

3.6. Pour $n = 1 \text{ mol}$, déduisons-en l'intervalle de confiance de la pression P .

$16,41 \leq T \leq 21,35 \text{ } (^\circ\text{C})$

$\Rightarrow 289,56 \leq T \leq 294,5 \text{ (K)}$

$13,16 \leq V \leq 13,19 \text{ (m}^3\text{)}$

Or, $P = R \frac{T}{V}$ car $n = 1 \text{ mol}$ et $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

$\Rightarrow 182,93 \leq P \leq 185,63 \text{ (Pa)}$

3.7. Déduisons-en l'intervalle de confiance de la force pressante $\vec{F}$.

On sait par définition que, $\vec{F} = P \times S$ où S est la surface $S = (a + b) \times c = 9,63 \text{ m}^2$.

$\Rightarrow 1761,62 \leq F \leq 1787,62 \text{ (N)}.$

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Effet sur la densité des gaz

Il suffit dans ce cas de comparer les densités des deux gaz.

On a : $d = M/29$.

- Ballon gonflé de CO_2 : $M_1 = 44 \text{ g.mol}^{-1}$.

$\Rightarrow$ la densité du CO_2 est de : $d_1 = 1,52$

- Ballon gonflé d'hélium He : $M_2 = 4 \text{ g.mol}^{-1}$.

$\Rightarrow$ la densité de l'hélium est : $d_2 = 0,14$.

On constate que $d_2 < d_1$, on prévoit alors que, le ballon gonflé d'hélium ira plus haut que celui gonflé avec le CO_2 .

Situation 2 : Comparaison des surfaces pressées

Il est plus douloureux de marcher sur une punaise que de s'allonger sur 500 clous, parce que, la surface pressée par une punaise est faible (petite), par conséquent, la pression est grande. Alors que, la surface pressée par 500 clous est large et par conséquent, diminue la pression.

Raison pour laquelle marcher sur une punaise est plus douloureux que de s'allonger sur 500 clous.

Situation 3 : Transformation isochore.

$T_1 = 27^\circ\text{C}$; $P_1 = 2 \text{ bars}$; $T_2 ?$ $P_2 = 2,2 \text{ bars}$.

Déterminons la température T_2 à l'intérieur du pneu.

Dans cet exercice, le volume est supposé constant (transformation isochore), de même que le nombre de mole.

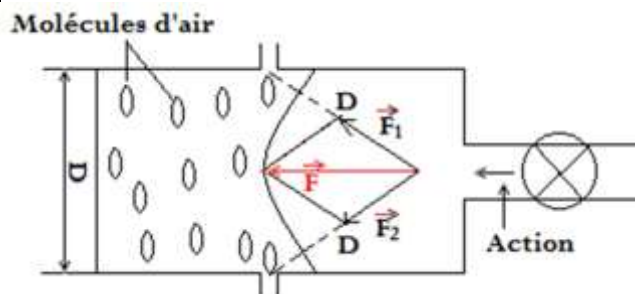
D'après la loi des GP, et à volume constant, on a :

$$P_1 \times T_2 = P_2 \times T_1 \Rightarrow T_2 = \frac{P_2}{P_1} \times T_1$$

AN : $T_2 = 29,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$

Situation 4 : Expression force, surface et pression

1. Montrons que la somme vectorielle des forces pressantes qui s'exercent sur une moitié du cylindre ainsi formé, est une force de direction horizontale s'appliquant sur la surface d'un cercle de diamètre D . Pour cela, nous allons le faire par une schématisation.



2. Calculons l'intensité F de cette force si $P = 10^5 \text{ Pa}$ et $D = 8 \text{ cm}$.

Par définition, $F = P \times S$ ou S est l'aire de la surface pressée par la force $\vec{F}$.

$$\Rightarrow F = P \times S = \pi \times P \times \frac{D^2}{4}$$

AN : $F = 502,4 \text{ N}.$

Situation 5 : Cycle de transformation

Données :

Au point A : $P_0 = 1 \text{ bar}$; $n = 0,1 \text{ mol}$; $T_0 = 273 \text{ K}$.

1. Déterminons le volume V_0 .

Par définition, $P_0 V_0 = nRT_0 \Rightarrow V_0 = \frac{n \times R \times T_0}{P_0}$



- (b) Pour avoir une résistance équivalente $R' = 1 \Omega$, il faudrait monter en parallèle, 5-résistors de 5Ω chacun. Car en parallèle,

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{5}{R_0} \quad (\text{car les résistors sont identiques})$$

$$\Rightarrow R' = \frac{R_0}{5} = 1\Omega$$

- (c) Pour avoir une résistance équivalente $R = 7,5 \Omega$, il faudrait monter 3-résistors de 5Ω chacun, dont un résistor en série avec deux résistors en parallèle (montage mixte). On aura alors :

$$R = 5 + \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right)^{-1} = 5 + \frac{5}{2} = 7,5\Omega$$

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Détermination du courant I

Données :

- Résistance $R = 10 \Omega$;
 - Capacité calorifique : $K = 750 \text{ J/}^\circ\text{C}$
 - Élévation de température : $\Delta\theta = 6^\circ\text{C}$
 - Temps $t = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}$.
- Déterminons le courant I

$$\text{Par définition, } \begin{cases} Q = RI^2t \\ Q = K\Delta\theta \end{cases} \Rightarrow I = \sqrt{\frac{K \times \Delta\theta}{R \times t}}$$

AN : $I = 1,23 \text{ A}$.

Situation 2

Données :

- Surface (rectangle) : $S = 235 \text{ mm} \times 230 \text{ mm} = 5,405 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$.
 - Contrainte utile : $\sigma_u = 40 \text{ MPa} = 40 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
 - Facteur de sécurité : $n = 8$.
- Évaluons la charge maximum $F_{\max}$ permise

On sait par définition que, $F_{\max} = \sigma \times S$ où σ est la contrainte extérieure ;

$$\text{Aussi a-t-on, } \sigma = \frac{\sigma_u}{n}$$

$$\Rightarrow F_{\max} = \frac{\sigma_u \times S}{n}$$

AN : $F_{\max} = 270250 \text{ N} = 270,25 \text{ kN}$.

Situation 3

Données

- Conditions initiales : $\ell_0 = 1 \text{ m}$; $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$;
 - Conditions d'après : $\ell_1 = 1,0016 \text{ m}$; $\theta_1 = 100^\circ\text{C}$.
 - Déterminons son coefficient de dilatation linéaire λ .
- On sait par définition que, $\Delta\ell = \ell_1 - \ell_0 = \lambda \times \ell_0 \times \Delta\theta$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{\Delta\ell}{\ell_0 \times \Delta\theta} = \frac{\ell_1 - \ell_0}{\ell_0 \times (\theta_0 - \theta_1)}$$

AN : $\lambda = 2 \cdot 10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1}$.

- Déterminons la température θ pour une longueur $\ell = 1,0020 \text{ m}$.

Le coefficient de dilatation linéaire étant constant, on utilisera le principe de linéarité précédant :

$$\ell - \ell_0 = \ell_0 \times \lambda \times (\theta - \theta_0)$$

$$\Rightarrow \theta = \theta_0 + \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0 \times \lambda}$$

AN : $\theta = 120^\circ\text{C}$.

Situation 4

Pour connaître celui qui, entre l'éléphant et la femme, cause plus de dommages sur le parquet, il suffit de comparer la pression exercée par chaque espèce sur le parquet (surface où se trouve l'espèce).

- Pour l'éléphant :

- $m_e = 5,5 \text{ t} = 5500 \text{ kg}$;
- Diamètre d'un pied : $d = 30 \text{ cm}$. L'éléphant ayant 4 pattes, alors, le diamètre total sera $D = 4d = 120 \text{ cm} = 1,2 \text{ m}$.

- La force pressante ici est son poids :

$$P = m_e \times g = 5500 \times 9.83 = 54065 \text{ N}$$

- La surface pressée sera pour un pied :

$$A = \text{rayon} \times \text{rayon} \times 3,14 = 0,07065 \text{ m}^2$$

Pour 4 pieds d'éléphant, on aura : $S = 4A = 0,2826 \text{ m}^2$.

$$\text{La pression sera : } P_{\text{éléphant}} = \frac{P}{S}$$

AN : $P_{\text{éléphant}} = 191.312,81 \text{ Pa}$

- Pour la femme :

- Masse : $m_f = 60 \text{ kg}$.
- Forme d'un talon : carré de côté $a = 1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$.
Pour deux talons (car la femme n'a que deux pieds) : $L = 2a = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$.

- La surface pressée sera pour les deux talons :

$$S_{\text{femme}} = L \times L = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

- La force pressante par les deux talons sera :

$$P_{\text{talons}} = m_f \times g = 60 \times 9.83 = 589,8 \text{ N}$$

$$\text{La pression sera : } P_{\text{femme}} = \frac{P_{\text{talons}}}{S_{\text{femme}}}$$



AN : $P_{\text{femme}} = 1.474.500 \text{ Pa}$.

On constate de ces résultat que $P_{\text{femme}} > P_{\text{éléphant}}$, donc c'est la femme qui cause d'importants dommages sur le parquet.

*****FIN*****

EXERCICES DE SYNTHÈSE DU MODULE 1

Exercice 1 : Mesure et incertitude

On donne : $n = 20$ mesures ; $S(X) = 0,018 \pm 0,01 \text{ mm}$

- On effectue plus d'une mesure afin de vérifier la précision de l'instrument de mesure.
- L'écriture de $S(X)$ n'est pas correcte. Son écriture corrigée est : $S(X) = 0,02 \pm 0,01 \text{ mm}$.

- Déterminons l'incertitude relative I_R .

$$\text{Par définition, } I_R = \frac{\Delta X}{X} = \frac{0,01}{0,02} = 0,5 = 50\%$$

- Évaluons l'incertitude-type $u(x)$ sur la moyenne de ces 20-observation.

$$\text{Par définition, } u(x) = \frac{S(X)}{\sqrt{n}} = \frac{0,02}{20} = 10^{-3} \text{ mm}$$

Exercice 2 : Homogénéité d'une relation

Données :

$$(*) [F] = [M][L][T]^{-2}$$

$$D = 29.10^2 \text{ kg.s}^{-1}; V = 4,01 \text{ km.s}^{-1} = 4010 \text{ m.s}^{-1}$$

En utilisant la notation précédente, on a :

$$[D] = 2900 [M][T]^{-1}; [V] = 4010 [L][T]^{-1}$$

Le produit $D \times V$ est alors :

$$\begin{aligned} D \times V &= [D] \times [V] = 1,2.10^8 [M][T]^{-1}[L][T]^{-1} \\ &= 1,2.10^8 [M][L][T]^{-2} \\ &= 1,2.10^8 [M][L][T]^{-2} \end{aligned}$$

On voit alors que ce résultat est semblable à $(*)$: on dit alors que le produit $D \times V$ est homogène à une force.

Exercice 3 : Notion d'encadrement

Données

$$\text{Largeur : } \ell = 21,0 \text{ cm} = 0,21 \text{ m}$$

$$\text{Longueur : } L = 29,7 \text{ cm} = 0,297 \text{ m}$$

- (a) écrivons ℓ et L sous la forme $\ell = \ell \pm \Delta\ell$ et $L = L \pm \Delta L$ en tenant compte de l'incertitude de lecture.
Étant donné que l'incertitude correspond à la plus petite graduation 0,05 (ici le mm), on aura alors :
 $\ell = 21,00 \pm 0,05 \text{ cm}$; $L = 29,70 \pm 0,05 \text{ cm}$.

(b) Donnons l'incertitude relative associée à ces deux mesures

$$I_\ell = \frac{\Delta\ell}{\ell} = \frac{0,05}{21} = 0,2\%$$

$$I_L = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0,05}{29,7} = 0,2\%$$

Ce résultat est dû à l'arrondi à un seul chiffre significatif.

- (a) Déduisons-en un encadrement de la surface S de la feuille, puis exprimons cette surface sous la forme $S \pm \Delta S$.
- encadrement de S

$$S = \ell \times L \text{ (rectangle)}$$

$$S_{\min} = (\ell - 0,05) \times (L - 0,05) = 621,17 \text{ cm}^2;$$

$$S_{\max} = (\ell + 0,05) \times (L + 0,05) = 626,24 \text{ cm}^2;$$

$$\Rightarrow 621,17 \leq S \leq 626,24 \text{ (cm}^2\text{)}$$

- écriture de S sous la forme $S \pm \Delta S$

Pour cela, prenons la valeur moyenne de S qui sera :

$$S_{\text{moy}} = \frac{626,24 + 621,17}{2} = 623,71 \text{ cm}^2$$

$$\Delta S = S_{\max} - S_{\min} = 5,07 \text{ cm}^2$$

$$\Rightarrow S = 623,71 \pm 5,07 \text{ (cm}^2\text{)}$$

- (b) Déduisons-en l'incertitude relative $I_R(S)$

$$\text{Par définition, } I_R(S) = \frac{\Delta S}{S} = \frac{5,07}{623,71} = 0,8\%$$

Exercice 4 : Incertitude et série de mesures

Plusieurs mesures d'une grandeur x ont donné les résultats suivants : 4,24 ; 4,12 ; 4,32 ; 4,18 ; 4,30 ; 4,28 ; 3,01.

- Donnons la valeur moyenne $\bar{x}$ et l'écart-type σ de cette série de mesure.

$$\bar{x} = \frac{4,24 + 4,12 + 4,32 + 4,18 + 4,3 + 4,28}{7}$$

$$\Rightarrow \bar{x} = 4,24$$

Remarque : Nous n'avons pas utilisé la valeur 3,01 parce qu'elle est très différente des autres.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (x_i - \bar{x})^2}{7}} = 0,065$$



2. Pour notre cas, $n = 7$ – mesures. L'incertitude absolue est alors :

$$\Delta x = \frac{2\sigma}{\sqrt{n}} = 0,049$$

3. La mesure est juste car la moyenne (4,24) est très proche de la valeur réelle. Elle n'est cependant pas très fidèle, car certaines valeurs s'en éloignent (4,12 par exemple).
Pour améliorer ce résultat, on pourrait faire encore plus de mesure.

Exercice 5 : Estimation de l'intervalle de confiance

On donne :

- Nombre d'observations : $n = 4$:
- Fractile : $t_\alpha = 1,64$ (à 10%)
- Risque à gauche : $\alpha_G = 10\%$

1. Calculons la moyenne m :

Il est admis que la variabilité du processus de fabrication est connue avec $\sigma = 5$. Dans ce cas, l'estimateur de m est gaussienne, $t_{\alpha-1/2} = 1,64$.

$$\text{Par définition, } m = \frac{78 + 85 + 91 + 76}{4} = 82,5$$

2. Calculons l'écart-type de répétabilité $S(X)$

Par définition,

$$S(X) = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \sqrt{\sum_{j=1}^4 (x_j - m)^2} = 6,86$$

3. Déduisons-en l'intervalle de confiance $I_C(X)$

Par définition,

$$I_C(X) = \left[m - t_\alpha \frac{S(X)}{\sqrt{n}} ; m + t_\alpha \frac{S(X)}{\sqrt{n}} \right]$$

$$I_C(X) = [76,88 ; 88,13]$$

4. On évalue le risque de dépasser le seuil et on trouve, $\alpha = 95\%$

- 4.1. Évaluons le risque α_D à droite.

Par définition, $\alpha = \alpha_G + \alpha_D \Rightarrow \alpha_D = \alpha - \alpha_G = 85\%$

- 4.2. Étant donné que $\alpha_G \neq \alpha_D$, on peut alors dire qu'il s'agit d'un intervalle de confiance **bilatéral**.

- 4.3. Évaluons la probabilité $P(x \in I_C)$

Par définition, $P(x \in I_C) = 1 - \alpha = 0,05$

5. L'incertitude due à la justesse de l'instrument est $u_2(x) = 3,40$. Déterminons l'incertitude-type $u(x)$ retenue sur la grandeur extraite.

Par définition,

$$u(x) = \sqrt{u_1^2(x) + u_2^2(x)} = \sqrt{\frac{S^2(X)}{n} + u_2^2(x)}$$

AN :

$$u(x) = 4,83.$$

Exercice 6 : Binôme de dilatation linéaire

Un cube a une arête de longueur a_0 à $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

1. Déterminons la longueur a à T connaissant λ .

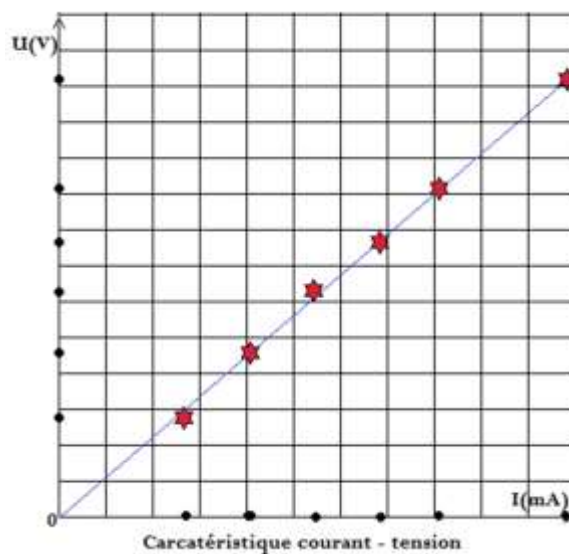
On sait par définition que,

$$a - a_0 = \lambda a_0 \left(T - \underbrace{T_0}_0 \right) \Rightarrow a = a_0 (1 + \lambda T) \quad (*)$$

2. Déterminons le volume V à la température en le mettant sous la forme : $V = V_0(1 + 3\lambda T)$
Par définition, le volume d'un cube est de la forme, $V = a^3$ et $V_0 = a_0^3$. En élevant (*) au cube, on aura,
 $a^3 = a_0^3(1 + \lambda T)^3 \Leftrightarrow V = V_0(1 + \lambda T)^3$
Or, $(1 + \lambda)^n \approx 1 + n\lambda$.
On obtient alors, $V = V_0(1 + 3\lambda T)$ CQFD.

Exercice 7 : Type expérimental

Traçons la courbe $U = f(I)$ et déduisons-en la contrainte de ce circuit et la valeur de la conductance.



- Contrainte :

$$\sigma = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{(12,11 - 0)}{(54,5 - 0) \cdot 10^{-3}} = 222,2 \Omega$$

- Conductance : $G = \frac{1}{\sigma} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ S}$

Exercice 9 : Exploitation de la loi des gaz parfaits

$V_1 = 10 \text{ cm}^3$; $P_1 = 1 \text{ bar}$; $V_2 = 3 \text{ cm}^3$; $P_2 = ?$

On sait par définition que (Loi de Charles) :

$$\begin{cases} P_1 V_1 = nRT \\ P_2 V_2 = nRT \end{cases} \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Soit alors que, $P_2 = \frac{V_1}{V_2} \times P_1$

AN :

$$P_2 = 3,33 \text{ bars.}$$

*****FIN*****



Leçon 4

TRAVAIL D'UNE FORCE

Activité 1

Deux élèves A et B de première se disputent dans la cour de récréation de leur établissement, lorsque ceux-ci observent par un trou du mur du campus, une femme placée avec un sceau plein d'eau à l'intérieur et qu'ils parvenaient à observer qu'elle coulait aussi de la sueur.

ACTIVITÉS

- ♦ L'enfant A : Man, je te jure la mater si work, sans blague.
- ♦ L'enfant B : No, elle ne work pas, louche, elle est tenue debout là, elle n'avance pas ; donc elle ne bosse pas.
- ♦ L'enfant A : Tu ndem gars, ya la sueur que la mater là coule, toi tu dis qu'elle ne bosse pas ? il faut qu'on nettoie tes yeux là avec du javel.
- ♦ L'enfant B : C'est plutôt toi qui ndem I swear ;
Expliquer pourquoi ces deux élèves ont raison, chacun avec son argument.

Activité 2

On considère les situations ci-contre, présentant deux sportifs.

Comment expliquer que, l'individu de la situation A ne travaille pas ? Et que pour l'individu de la situation B, ce n'est pas lui qui travaille, mais plutôt l'objet qu'il tend à soulever ?



Situation A



Situation B

Objectifs

- ⇒ Définir : travail d'une force
- ⇒ Exprimer et calculer le travail du poids
- ⇒ Définir et calculer la puissance d'une force

1. Définition du travail d'une force et unité

- Le travail d'une force fait intervenir deux grandeurs : la **force $\vec{F}$** et le **déplacement $\overrightarrow{AB}$** .
- En physique, on dit d'une force qu'elle travaille, lorsqu'elle est capable de déplacer son point d'application (**son point d'appui**).
- Les définitions ci-dessous sont valables

1.1. Définition

- Le **travail** d'une force, est le produit scalaire des vecteurs force et déplacement.
- Le **travail**, est la grandeur, l'action d'une force qui déplace son point d'application.

D'après la première définition, on voit directement que le travail d'une force est une grandeur algébrique, i.e. qu'il possède un signe.



1.2. Symbole et unité du travail d'une force

- Le travail (**Work** en anglais) d'une force $\vec{F}$ est noté $W(\vec{F})$ et est obtenu par la relation :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \times AB \times \cos(\widehat{\vec{F}; \overrightarrow{AB}}) \quad (4.1)$$

- L'unité du travail est le **Joule** de symbole **J** : c'est donc de l'**énergie** ; la force en Newton (**N**) et le déplacement en mètres (**m**).

Remarque

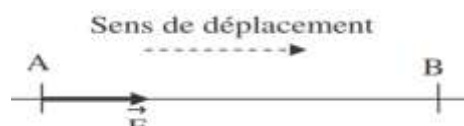
Le Joule est le travail d'une force de 1 Newton dont le point d'application se déplace de 1 m dans sa propre direction.

Conséquences de la formule (4.1)

Posons $\alpha = (\widehat{\vec{F}; \overrightarrow{AB}})$

- Si $0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$ (**angle aiguë**), alors, le travail est dit **moteur** ou **positif**. (figure 4.1)

Si la force et le déplacement sont dans le même sens, le travail est moteur.



- Si $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (**angle droit**), le travail est **nul**. Cela signifie que si la force est perpendiculaire au déplacement, alors son travail est nul. (figure 4.2)

- Si $\frac{\pi}{2} < \alpha \leq \pi$ (**angle obtus**), le travail est dit **résistant** ou **négatif**. (figure 4.3)

Si la force et le déplacement sont en sens contraires, le travail est dit résistant.

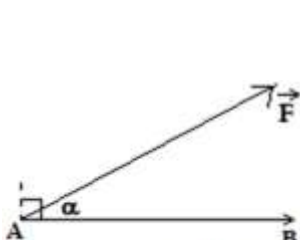
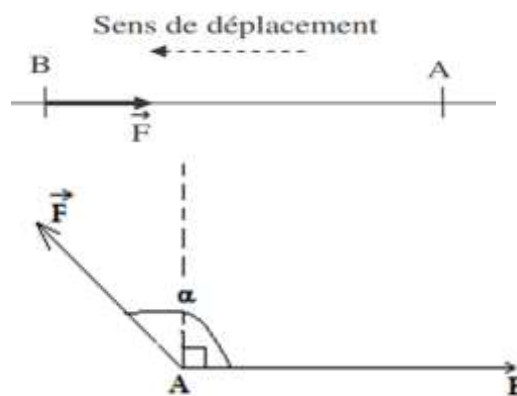


Figure 4.1 : Travail moteur

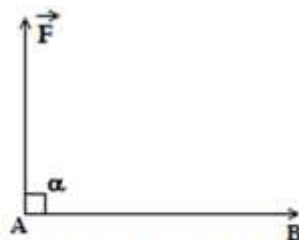


Figure 4.2 : Travail nul

Figure 4.3 : Travail résistant

Exemple

Calculer le travail d'une force de 10 N se déplaçant le long d'une portion rectiligne $AB = 10$ m dans les cas où : $\alpha = \{30^\circ; 60^\circ; 120^\circ\}$.

Solution

Données : $F = 10$ N ; $AB = 10$ m ; $\alpha = \{30^\circ; 60^\circ; 120^\circ\}$

On sait par définition que : $W_{AB}(\vec{F}) = F \times AB \times \cos \alpha$

- Pour $\alpha = 30^\circ$, $W(\vec{F}) = 86,60$ J.
- Pour $\alpha = 60^\circ$, $W(\vec{F}) = 50$ J.
- Pour $\alpha = 120^\circ$, $W(\vec{F}) = -50$ J.

1.3. Travail d'une force en translation

- Une force est dite en translation, lorsque son point d'application se déplace le long d'une portion rectiligne.

- Une force peut donc être :
 - Soit sur un plan horizontal ou vertical (figure 4.4)

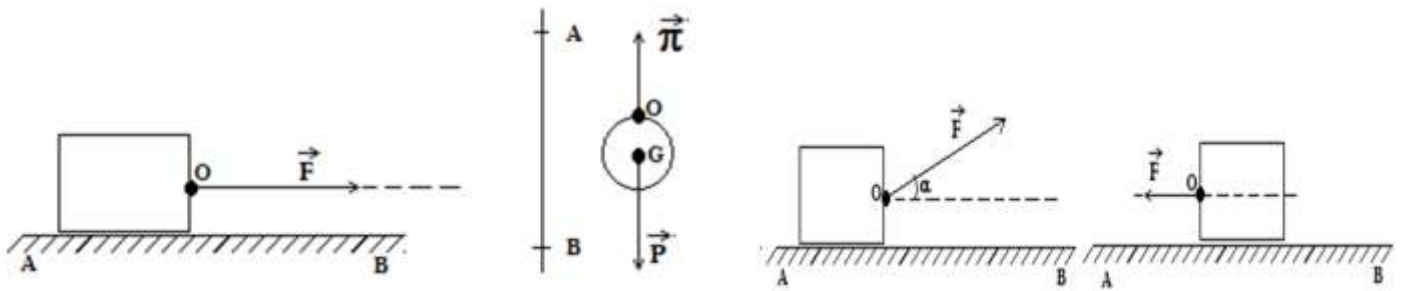


Figure 4.4 : Forces sur une trajectoire rectiligne

- Soit sur un plan incliné (figure 4.5)

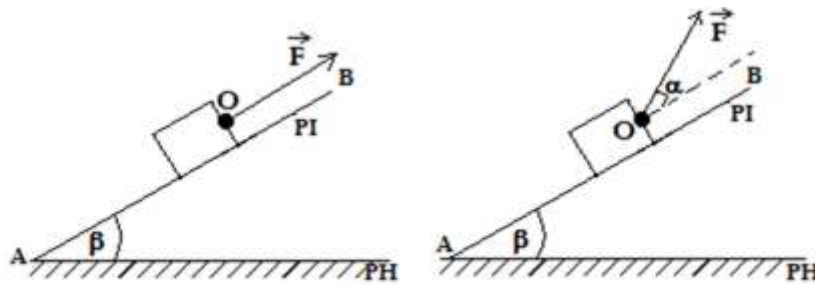


Figure 4.5 : Force sur un plan incliné

Remarque

- ✍ Un plan est dit **incliné**, lorsqu'il forme un angle avec l'horizontal.
- ✍ Toute force qui s'oppose au déplacement, est dite **force de résistance** ou **force de frottement** et est généralement notée $\vec{f}$ ou $\vec{\pi}$ (résistance de l'air ou poussée d'Archimède de l'air), $\vec{R}$ (résistance d'un support)...
- ✍ Toute force de frottement a un travail négatif ou résistant : **$W(\text{force de résistance}) < 0$** .
- ✍ Lorsqu'une force est inclinée par rapport à l'horizontal, il est nécessaire de faire les projections de celle-ci suivant les axes d'un repère **cartésien** ($\vec{i}$; $\vec{j}$) ou de **Frenet** ($\vec{t}$; $\vec{n}$).

Exemple

Donnons les expressions des forces qui s'appliquent sur le solide ci-dessous :

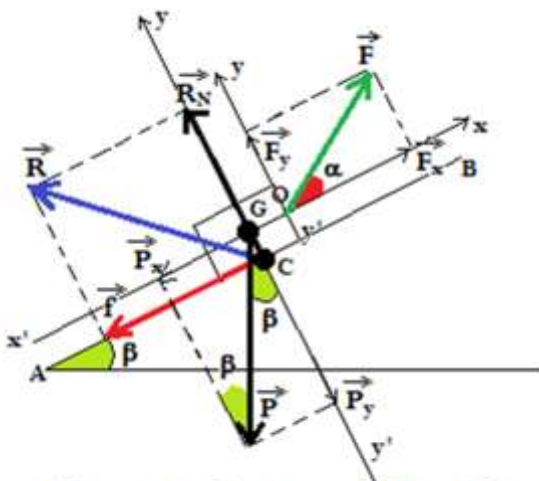


Figure 4.6 : Figure expérimentale

- Système : solide (S) de masse m.
- Référentiel : de laboratoire ou terrestre.
- Bilan des forces appliquées à (S)
 - $\vec{F}$: force de traction ou force motrice, en O
 - $\vec{P}$: poids du solide (S), en G
 - $\vec{R}$: réaction du plan incliné, en C.

En présence des forces de frottement, $\vec{R} = \vec{R}_N + \vec{f}$ (4.2)

Avec $\begin{cases} \vec{f} : \text{force de frottement} \\ \vec{R}_N : \text{réaction normale au plan incliné (PI)} \end{cases}$



Selon la figure 4.6 ci-dessus, les trois forces du bilan sont toutes inclinées. Nous allons donc passer aux projections dans le repère cartésien (G ; x ; y). Orientations : x'x ; y'y

$$\bullet \quad \vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y \text{ avec } \begin{cases} F_x = F \cos \alpha \\ F_y = F \sin \alpha \end{cases} ;$$

$$\Rightarrow W(\vec{F}) = W(\vec{F}_x) + W(\vec{F}_y) = \underbrace{\vec{F}_x \cdot \vec{AB}}_0 = (F \cos \alpha) \cos(\underbrace{\vec{F}_x; \vec{AB}}_0) = F \times AB \times \cos \alpha \quad (4.3)$$

$$\bullet \quad \vec{P} = \vec{P}_x + \vec{P}_y \text{ avec } \begin{cases} P_x = P \sin \beta = mg \sin \beta \\ P_y = P \cos \beta = mg \cos \beta \end{cases}$$

$$\Rightarrow W(\vec{P}) = W(\vec{P}_x) + W(\vec{P}_y) = \underbrace{\vec{P}_x \cdot \vec{AB}}_0 = (P \sin \beta) \cos(\underbrace{\vec{P}_x; \vec{AB}}_\pi) = -m \times g \times AB \times \sin \beta \quad (4.4)$$

$$\bullet \quad \vec{R} = \vec{R}_x + \vec{R}_y \text{ avec } \begin{cases} R_x = f \\ R_y = R_N \end{cases}$$

$$\Rightarrow W(\vec{R}) = W(\vec{f}) + W(\vec{R}_N) = \underbrace{\vec{f} \cdot \vec{AB}}_0 = (f \times AB) \cos(\underbrace{\vec{f}; \vec{AB}}_\pi) = -f \times AB \quad (4.5)$$

Remarque

✍ Un **système** en physique est tout objet sur lequel porte une étude physique.

✍ En présence des forces de frottement, $W(\vec{R}) = W(\vec{f})$ (4.6)

✍ En absence des frottements, $W(\vec{R}) = W(\vec{R}_N) = 0$ (4.7)

✍ Le travail d'une force ne dépend pas du chemin suivi, mais seulement du point de départ et du point d'arrivée.

Pour démontrer cette dernière remarque, considérons le déplacement suivant :

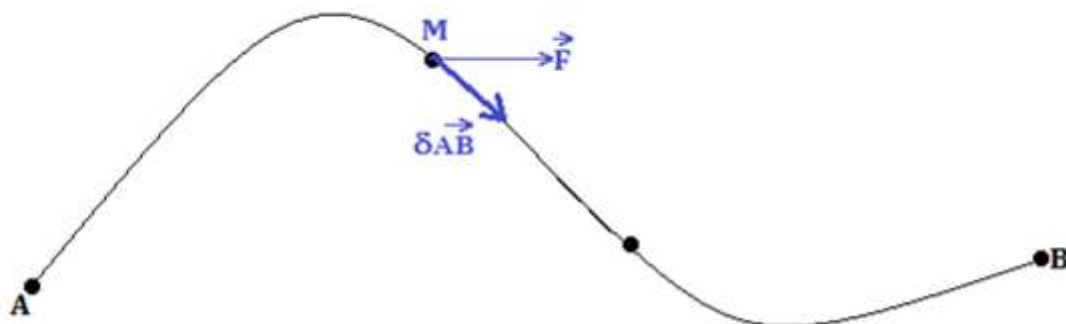


Figure 4.7 : Déplacement quelconque d'une force constante $\vec{F}$

Pour cela, nous supposons la force $\vec{F}$ constante.

Décomposons le trajet **AB** en portion : **Aa₁, a₁a₂, ..., a_nB**, assez petite pour qu'elle puisse être considérée comme rectiligne. Le travail de $\vec{F}$ pour le déplacement AA' est la somme des **travaux élémentaires** $\delta W_{AB}(\vec{F})$ pour chacun des petits déplacements. On aura donc :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \delta W_{Aa_1}(\vec{F}) + \delta W_{a_1a_2}(\vec{F}) + \dots + \delta W_{a_nB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{Aa_1} + \vec{F} \cdot \vec{a_1a_2} + \dots + \vec{F} \cdot \vec{a_nB} = \vec{F} \cdot (\vec{Aa_1} + \vec{a_1a_2} + \dots + \vec{a_nB})$$

$$W_{AA'}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB}$$

1.4. Travail d'une force en rotation

Considérons un solide (S) mobile autour d'un axe fixe (Δ) perpendiculaire en O au plan de la figure 4.8.

Lors de la rotation, le point d'application de la force $\vec{F}$, constante, appliquée au solide, décrit un cercle de rayon OA situé dans le plan de la figure.

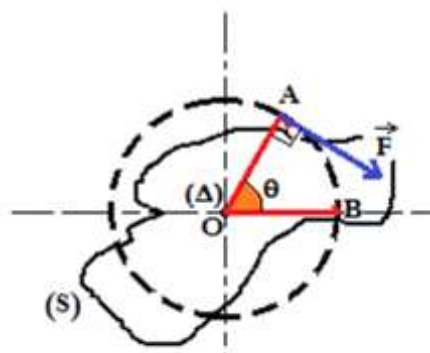


Figure 4.8 : Mouvement circulaire

Par définition, le travail d'une force constante est donné :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{\ell}_{AB} \quad (4.8)$$

Or, la longueur de l'arc fermé est donnée par :

$$\ell_{AB} = R \times \theta = OA \times \theta \quad \begin{cases} \theta \text{ en radians (rad)} \\ R \text{ en mètres (m)} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\Rightarrow W_{AB}(\vec{F}) = \underbrace{F \cdot OA}_{M_{\Delta}(\vec{F})} \cdot \theta \quad (4.10)$$

En posant,

$$\mathcal{M}_{\Delta} = F \times OA \text{ (N.m)} \quad (4.11)$$

le moment de la force $\vec{F}$, l'équation (4.10) devient alors,

$$W_{AB}(\vec{F}) = M_{\Delta} \cdot \theta \quad (4.12)$$

Remarque

Le moment d'une force est une valeur algébrique, car dépend du sens de rotation du système.

Pour un couple de forces, le travail est donné par :

$$W_D(C) = F \times D \times \theta = M_{\Delta}(C) \times \theta \quad (4.13)$$

Avec C, couple de forces ; F, force équivalente ; D, diamètre = 2R.

Si n est le nombre de tours effectués, alors, l'angle $\theta = 2\pi n$. (4.14)

$2\pi \text{ rad} = 360^\circ = 400 \text{ grades} = 1 \text{ tr}$ (4.15)

Exemple

Une planche OA de masse 14 kg et de longueur 5 m, repose sur un sol horizontal. On exerce en 3 s sur l'extrémité A, une force $\vec{F}$ perpendiculaire à OA et la planche tourne autour de l'extrémité O d'un angle α (voir schéma ci-dessous). G est le centre de gravité de la planche et on a : OG = GA.

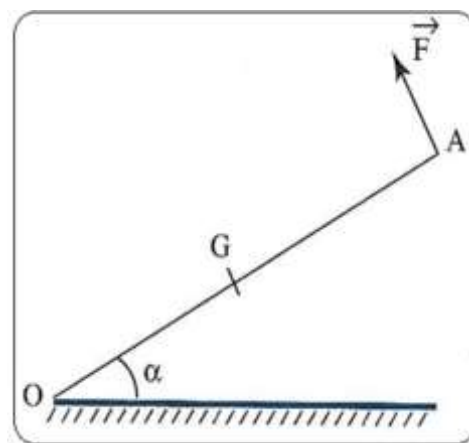
1. Exprimer en fonction de α :

1.1. L'intensité de la force $\vec{F}$;

1.2. La variation d'altitude du point G ;

1.3. Le travail et la puissance de $\vec{F}$ et du poids $\vec{P}$ de la planche.

2. Faire l'application numérique dans le cas où $\alpha = 30^\circ$.



Solution

(1) Donnons, en fonction de α

1.1. L'intensité de la force F.

Selon la figure ci-dessus, les forces F et P_y forment un couple de forces. Donc, elles ont un moment égal.

On a : $M_O(\vec{F}) = M_O(\vec{P}_y) \Rightarrow F \cdot AO = P_y \cdot OG$

Soit $F \cdot AO = m \cdot g \cdot OG \cdot \cos \alpha$ or $OG = 1/2 OA$



$$\Rightarrow F = \frac{1}{2} mg \cos \alpha = 68,6 \times \cos \alpha$$

1.2. La variation d'altitude h du point G.

Selon la figure, $h = OG \times \sin \alpha = 2,5 \times \sin \alpha$

1.3. Travail et puissance de :

♦ De la force F

$$- W(\vec{F}) = M_o(\vec{F})\theta = 2\pi F \cdot AO = 2154,04 \times n \times \cos \alpha$$

$$- P = \frac{W(\vec{F})}{t} = 718,01 \times n \times \cos \alpha$$

♦ Du poids P

$$- W(\vec{P}) = W(\vec{P}_y) = -mgh = -343 \times \sin \alpha$$

$$- P = \frac{W(\vec{P})}{t} = 114,33 \times \sin \alpha$$



(2) Faire l'application pour : $\alpha = 30^\circ$; $n = \frac{1}{4}$ tour.

1.5. Travail du poids d'un corps

Le travail du poids d'un corps se calcule en fonction du déplacement du **centre de gravité** dudit corps. Supposons que le centre de masse du corps s'est déplacé d'un point A vers un point B. Selon la formule (1), le travail sera : $W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AB}$ (4.16)

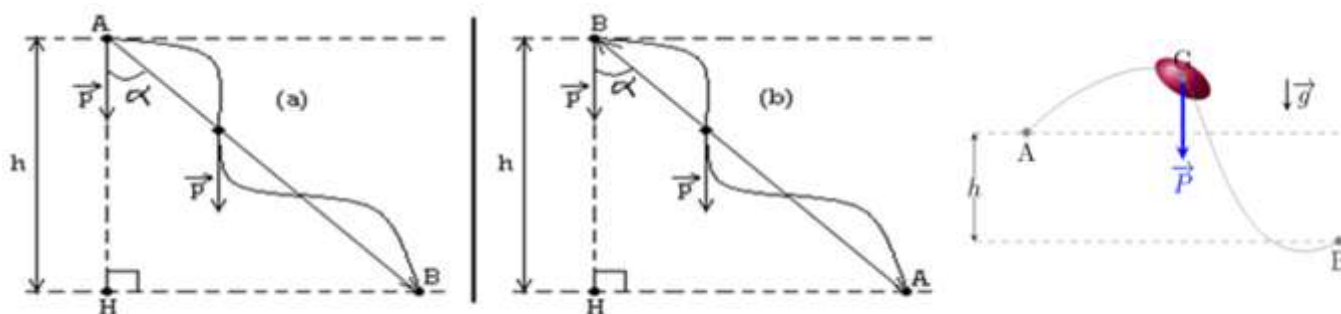


Figure 4.9 : Trajets du poids d'un corps.

• Selon la figure 4.9 (a), $W_{AB}(\vec{P}) = P \cdot h$ (4.17) car $\cos \alpha > 0$. Le travail du poids dans ce cas est dit **moteur**.

• Selon la figure 4.9 (b), $W_{AB}(\vec{P}) = -P \cdot h$ (4.18) car $\cos \alpha < 0$ pour $\alpha > \frac{\pi}{2}$. Le travail est dit **résistant**.

Démonstration du pourquoi h et non $AB \cos \alpha$:

Par définition : $W_{AB}(\vec{P}) = P \times AB \times \cos \alpha$. Or dans le triangle AHB de la figure 4.9 (a), $\cos \alpha = \frac{h}{AB}$

$$\Rightarrow h = AB \times \cos \alpha$$

D'où, $W_{AB}(\vec{P}) = P \times h$ (La présence du signe moins sera démontré plus bas).

Remarque

Le vecteur poids dans ces cas de figure est incliné par rapport au déplacement. Il est donc important de penser aux projections sur les axes, pour pouvoir expliciter le travail du poids le long du trajet AB.

Conclusion

C11 : Le travail du poids ne dépend pas du chemin suivi, mais de la différence d'altitude entre le point de départ et le point d'arrivée.

C12 : Pour parler du travail du poids, il faudrait que le centre de gravité du solide se déplace verticalement.

Exemple

Quel travail est nécessaire pour ériger 3 pierres cubiques d'arrête $a = 40\text{cm}$ initialement placées sur le sol sous forme d'une colonne ? Même question pour 20 pierres. On donne la masse volumique d'une pierre : $\rho = 2400\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Solution

Il suffit de calculer le travail W du poids de l'ensemble formé par :

- 3 pierres de masse volumique $\rho = 2400\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et d'arrête $a = 40\text{ cm} = 0,4\text{ m}$ chacune.

$$W = Mgh \text{ or } h = \frac{3}{2}a - \frac{1}{2}a = a \text{ et } m = \rho V = \rho a^3$$

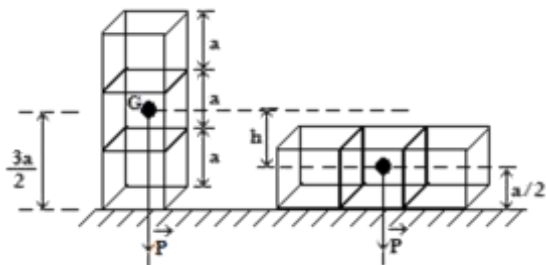
$$\Rightarrow M = 3m = 3\rho a^3$$

$$\Rightarrow W = 3\rho g a^4 = 1806,336\text{ J}$$

- 20 pierres. Dans ce cas, $h = \frac{20}{2}a - \frac{1}{2}a = \frac{19}{2}a$ et

$$M = 20\rho a^3.$$

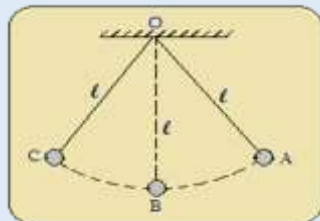
$$\Rightarrow W = 190 \times \rho \times g \times a^4 = 114401,28\text{ J}.$$



Exemple

Un pendule est constitué d'une petite bille de masse $m = 200\text{g}$ fixée à l'extrémité d'un fil inextensible de longueur $l = 80\text{cm}$. Le pendule oscille dans le plan vertical avec une amplitude de $\alpha = 30^\circ$. Calculer le travail du pendule, lorsque la boule passe :

- Du point A au point B ;
- Du point B au point C ;
- Du point A au point C.



SOLUTION

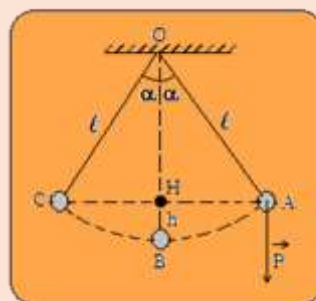
D'après la formule (2), on a : $W_{\text{déplacement}}(\vec{P}) = \pm P \cdot h$

D'après la figure ci-contre, $h = OH = l(1 - \cos\alpha)$

1. Partant donc du point A au point B, le solide descend, par conséquent, le travail du poids est moteur. On aura, alors : $W(\vec{P}) = m \times g \times l \times (1 - \cos\alpha) = 0,21\text{ J}$.

2. Partant du point B au point C, le solide monte, le travail du poids est par conséquent résistant. On aura alors : $W(\vec{P}) = -m \times g \times l \times (1 - \cos\alpha) = -0,21\text{ J}$.

2. Partant du point A au point C, il suffit d'additionner les travaux entre A et B puis entre B et C. On aura donc, $W_{AC}(\vec{P}) = W_{AB}(\vec{P}) + W_{BC}(\vec{P}) = 0,21 + (-0,21) = 0\text{ J}$.



$$OB = OH + HB$$

$$\Rightarrow HB = OB - OH$$

$$\text{or } \cos\alpha = \frac{OH}{OA} = \frac{OH}{OC} = \frac{OH}{l}$$

$$\Rightarrow OH = l \cdot \cos\alpha$$

$$OH = l(1 - \cos\alpha)$$

2. Notion de puissance d'une force

- La puissance d'une force fait intervenir le **travail W** et le **temps t** ou **Δt**
- La puissance **P** , est la grandeur qui relie le travail et la vitesse d'exécution.
- Plus l'exécution d'un travail est rapide, plus la puissance mise en jeu est grande.

2.1. La puissance moyenne P_m .

- La puissance moyenne **P_m** d'une force est le quotient du travail (**W**) effectué par la force par le temps (**t**) mis pour l'effectuer :



$$P_m = \frac{W}{\Delta t} = \frac{W}{t} \quad \text{en } \textcolor{red}{watts} (W) \quad (4.17)$$

- Un **watt** est la puissance d'une force qui effectue un travail de un joule en une seconde.
- On emploie encore dans l'industrie, le **cheval** (**ch**) : $1 \text{ ch} \approx 3/4 \text{ kW}$.

2.2. La puissance instantanée P_i

2.2.1. Puissance d'un solide en translation

Soit $\vec{F}$ une force appliquée en un point A du solide. Si $\vec{v}$ est la vitesse du point A à un instant donné, la puissance de $\vec{F}$ à cet instant est par définition :

$$P_i = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{AB}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} = F \times v \times \cos(\widehat{\vec{F}, \vec{v}}) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} F \text{ en } (N) \\ v \text{ en } (m.s^{-1}) \\ P_i \text{ en } (W) \end{cases} \quad (4.18)$$

Remarque :

Si la force $\vec{F}$, constante, est appliquée en un point d'un solide en mouvement rectiligne uniforme (i.e. à **vitesse constante**), la puissance de la force est constante et est égale à la puissance moyenne.

En effet, $P = \vec{F} \cdot \vec{v} = \vec{F} \cdot \frac{\vec{AB}}{t} = \frac{W}{t}$

2.2.2. Puissance d'un solide en rotation

Soit une force $\vec{F}$, de moment $M_\Delta(\vec{F})$, appliquée en un point A d'un solide mobile autour d'un axe (Δ). Si ω (oméga) est la vitesse angulaire du solide à l'instant t, la puissance de $\vec{F}$ à cet instant sera :

$$P = M_\Delta(\vec{F}) \cdot \omega \quad \text{avec} \quad \begin{cases} M_\Delta(\vec{F}) \text{ en } (N.m) \\ \omega \text{ en } (rad.s^{-1}) \\ P \text{ en } (W) \end{cases} \quad (4.19)$$

Remarque

$$\begin{cases} \theta = \omega \times t \\ n = N \times t \text{ avec } N \text{ nombre de tours par seconde (tr.s}^{-1}\text{)} ; n \text{ nombre de tours (tr).} \\ \omega = 2\pi N \end{cases} \quad (4.20)$$

Si le moment de la force $\vec{F}$ est constante et si le mouvement du solide est en rotation uniforme, la puissance de la force est constante et égale à la puissance moyenne.

En effet, $P = M_\Delta(\vec{F}) \cdot \omega = M_\Delta(\vec{F}) \cdot \frac{\theta}{t} = \frac{W}{t}$

3. Jeu bilingue

Expression française	Expression anglaise
Travail	Work
Force	Force
Puissance instantanée	Instantaneous power
Puissance moyenne	Average power
Vitesse de rotation	Rotation speed

Sentence :

Le travail d'une force constante, est le produit scalaire du vecteur force et du vecteur déplacement.

Translation

The work of a constant force, is the scalar product of the force vector and the displacement vector.

**EXERCICES DE LA LEÇON 4 : TRAVAIL D'UNE FORCE****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS**

- Définir : travail d'une force ; puissance moyenne ; puissance instantanée ; couple de force ; moment d'une force.
- Pour quelle raison dit-on que le travail est une grandeur algébrique ?
- Choisir la (ou les) bonne(s) réponse(s) :
 - Une force de 2 N, parallèle à la trajectoire, se déplaçant sur une distance de 3,5 m en 1 s, et en sens contraire, effectue :
 - Un travail de 7 J.
 - Un travail de -7 J.
 - Une puissance de 7 W.
 - Une puissance de -7 W.
 - Dans le système international, l'unité de la puissance est :
 - Le kilogramme (kg)
 - Le joule (J)
 - Le watt (W)
 - Le cheval (ch)
 - La vitesse angulaire d'un solide en rotation est donnée par :
 - $\omega = \pi Dn$
 - $\omega = 2\pi R$
 - $\omega = 2\pi N$
 - L'angle de rotation, θ pour un solide ayant effectué n tours, est donné par :
 - $\theta = \pi Dn$
 - $\theta = 2\pi n$
 - $\theta = 2\pi R$
 - La relation entre la vitesse angulaire ω et l'angle de rotation θ , est donnée par (t = temps) :
 - $\omega = \theta \times t$
 - $\theta = \omega \times t$
 - $\theta = \omega \div t$
- Vrai ou faux
- Le moment d'une force est une grandeur algébrique.
- Lorsqu'on double l'intensité d'une force sans modifier la distance parcourue par celle-ci, son travail double aussi.
- La puissance est une grandeur physique algébrique.
- Le travail du poids dépend non seulement du chemin suivi, mais également du point de départ et du point d'arrivée.
- Pour un déplacement élémentaire d'une force constante, le travail élémentaire est noté δW .
- Lorsqu'une force varie en fonction du temps, on écrit : $\vec{F}(t)$
- Le travail est une énergie.
- Tout corps ou système, même au repos, travail.
- En anglais, le travail se dit boulot.
- Plus le temps est grand, moins est la puissance.
- Rappeler le théorème des moments.
- Compléter les pointillés

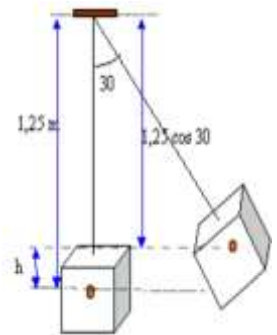
- Dans le système international, l'unité du travail est le...(a)...Son symbole est...(b)...
- Le travail d'une force est dit...(c)....lorsqu'il est positif et résistant lorsqu'il est...(d)...
- Le travail d'une force est nul lorsque sa direction est...(e)...à celle du déplacement de son point d'application.
- La puissance moyenne P_m développée par une force constante fournissant un travail W pendant une durée t est définie par la relation...(f)...

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

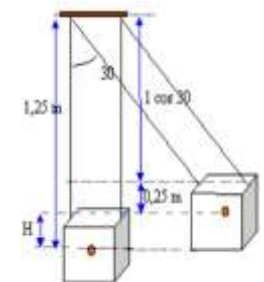
1.

Un cube homogène, de masse $m = 100 \text{ kg}$ et d'arête $a = 50 \text{ cm}$, peut être suspendu de deux façons.

Dans le schéma 1 ci-contre, il est suspendu à une tige rigide de longueur $L = 1 \text{ m}$. Cette tige pivote autour d'un point fixe O , mais fixée rigidement au centre C de la surface supérieure du cube.



Dans le schéma 2 ci-contre, il est suspendu à deux cordes parallèles de même longueur $L = 1 \text{ m}$. Ces deux cordes sont fixées en O_1 et O_2 sur la même horizontale et attachées au cube aux centres A_1 et A_2 des deux arêtes parallèles de sa surface supérieure.



Au départ, la tige et les deux cordes sont verticales. On déplace le tout jusqu'à ce que la tige ou les cordes fassent un angle de 30° avec la verticale.

Question : Déterminer le travail du poids du cube dans les deux cas.

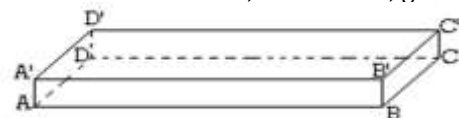
- Deux jumeaux A et B de même masse $m = 75,0 \text{ kg}$, montent au 6^{ème} étage d'un immeuble en partant du rez-de-chaussée (RDC). Le jumeau A emprunte l'ascenseur et le jumeau B les escaliers. La distance entre le plancher du RDC et celui du 6^{ème} étage est de 17,5 m.

- Quel est le travail du poids de A au cours de l'ascension ?

- Quel est celui de B ?
- Dans quel référentiel sont-ils définis ?

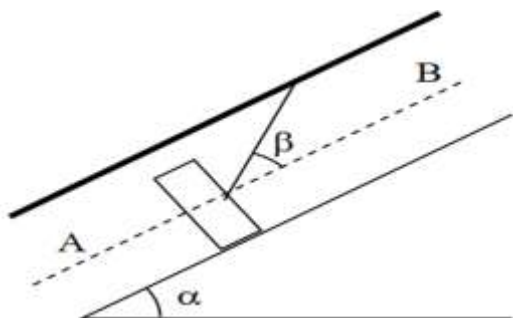
- Quel est le travail correspondant au poids de A dans le référentiel de l'ascenseur ?

- Une pierre parallélépipédique, de masse 1 t, repose sur le sol par sa face ABCD. Quel travail faut-il fournir pour la redresser de façon qu'elle repose sur sa face BCC'B' ? $AB = 2 \text{ m}$; $AA' = 40 \text{ cm}$; $g = 10 \text{ SI}$.





4. Une planche, de longueur $L = 10\text{m}$ et de masse $m = 30,5\text{kg}$, est d'abord couchée sur sa grande face.
- 4.1. Quel est la valeur numérique du travail du poids de cette planche ? Justifier.
- 4.2. On lève verticalement cette planche de telle sorte que, pour la maintenir droit, on l'enfonce de 2m dans le sol.
Donner l'expression du travail du poids de cette planche à l'équilibre. En déduire sa valeur numérique.
5. Une bille ponctuelle de masse $m = 50\text{g}$ suspendue à un fil rigide de longueur $\ell = 30\text{cm}$, est écartée d'un angle $\theta = 60^\circ$ de la verticale. On l'abandonne sans vitesse initiale. On prendra l'énergie potentielle de pesanteur égale à zéro sur le sol horizontal situé à 30cm du point de suspension de la bille.
Au passage par la position $\theta = 45^\circ$, calculer :
- 5.1. La vitesse V de la bille.
- 5.2. La valeur de l'énergie potentielle de pesanteur.
6. Dans un repère cartésien, une force est repérée par ses composantes : $\vec{F} = 6\vec{i} - 2\vec{j}$ et le vecteur position par : $\vec{OG} = -5\vec{j}$ où O est le centre du repère et G la position du centre de masse du solide étudié.
- 6.1. Placer ces deux vecteurs dans un repère $(O; \vec{i}; \vec{j})$.
- 6.2. En appliquant la formule du produit scalaire, déterminer l'angle θ (en $^\circ$ puis en rad) que font ces deux vecteurs.
7. Soit un skieur tracté par une perche faisant un angle $\beta = 22^\circ$ avec la pente.



Le skieur s'élève d'un point A vers un point B distant de 350m . la piste est supposée plane et faisant un angle $\alpha = 25^\circ$ avec l'horizontale. Le poids du skieur est de 750N et il avance à vitesse constante de $7,2\text{km.h}^{-1}$. La force $\vec{F}$ exercée par la perche sur le skieur est de 370N . La piste exerce sur skieur une force de frottement constante $\vec{f}$ (ou $\vec{R}_T$) de 26N .

- 7.1. Exprimer en fonction de la norme du vecteur considéré, le travail de toutes les forces s'exerçant sur le skieur. Puis faire l'application numérique.
- 7.2. Calculer la puissance moyenne $P_{(F)}$ de la force exercée par la perche.
- 7.3. Pour quoi le skieur peut-il être considéré comme pseudo-isolé ?
- 7.4. D'après le principe de l'action de la réaction, quelles sont les forces au poids du skieur et à $\vec{F}$? Préciser pour chacune, leurs caractéristiques.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Approche mathématique

Une force $\vec{F}$ et la position $\vec{x}$ sont exprimées, en fonction du temps de la manière suivante :

$$F(t) = 3t^2 + 2t - 1 \text{ (N)} ; x(t) = 2t - 1 \text{ (m)}$$

Pour $t = \{0, 2, 4\}$ (s), calculer la puissance instantanée.

Situation 2 : Barrage

L'eau d'un barrage est amenée à la turbine de la centrale électrique par une conduite forcée. La dénivellation entre le barrage et la turbine est $h = 800\text{m}$.

- Quel est le travail du poids correspondant à $1,1\text{m}^3$ entre le barrage et la turbine ?
- Déterminer la puissance de cette chute d'eau si son débit est $d = 30\text{m}^3.\text{s}^{-1}$.
- On admet que toute la puissance de la chute d'eau est transformée en puissance électrique par l'alternateur relié à la turbine. Quel devrait être le débit d'une chute d'eau de même dénivellation pour que sa puissance soit celle d'un réacteur nucléaire de 1000MW ?

Situation 3

A girl weighing 500Newton takes 50.0seconds to climb a flight of stairs 18meters high.
Calculate the girl's vertical power output.

Situation 4

Determine the power developed by a man weighing $6.0 \times 10^2\text{newtons}$ who climbs a rope at a constant speed of $2.0\text{meter per second}$.

Situation 5 : Pendule simple

Un pendule simple est constitué d'une bille de petite dimension, de masse $m = 50\text{g}$, reliée à un support fixe par un fil inextensible de longueur $L = 60\text{cm}$ et de masse négligeable.

On écarte ce pendule de sa position d'équilibre d'un angle $\theta_0 = 30^\circ$ et on le lâche sans vitesse initiale.

- Faire l'inventaire des forces qui s'applique au système étudié, puis les représenter sur un schéma.
- Calculer le travail de toutes les forces inventoriées ci-dessus, entre la position initiale et la position d'équilibre θ_E .
- Déterminer le travail du poids de la bille entre la position repérée par θ_0 et $-\theta_0$.
- Déterminer le travail de la tension du fil entre deux positions quelconques du pendule.



Leçon 5

ÉNERGIE CINÉTIQUE

Activité

Lorsque deux voitures de masses différentes entrent en collision, les dégâts sont plus importants sur la voiture de faible masse et de grande vitesse que sur la voiture de grande masse mais de faible vitesse.

Comment expliquer cela ?

ACTIVITÉS

Objectifs

- ⇒ Définir et expliciter l'énergie cinétique d'un système.
- ⇒ Énoncer et exploiter le théorème de l'énergie cinétique.

1. Définition, présentation et unité1.1. Définitions

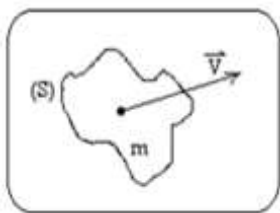
- En physique, on dit d'un corps qu'il possède de l'énergie, lorsqu'il est capable de fournir un travail au milieu extérieur.
- L'**énergie cinétique** est l'énergie que possède un corps à cause de sa vitesse.

1.2. Symbole et unité de l'énergie cinétique

- De son nom anglais, **kinetic energy**, l'énergie cinétique est notée **E_c** ou **K_E**.
- Étant donné qu'il s'agit d'une énergie, l'énergie cinétique s'exprime alors en **joule** de symbole **J**.

2. Calcul de l'énergie cinétique2.1. Cas d'un solide en translation

En translation, l'énergie cinétique **E_c** est la moitié du produit de la masse **m** du mobile et du carré de la vitesse **V** dudit mobile :



$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (5.1)$$

V en **m.s⁻¹** ; m en **kg** et E_c en **J**.

On démontre cette formule de la manière suivante :

D'après la deuxième loi de Newton et celle du travail d'une force,

$$\begin{cases} W = F \cdot d \\ F = ma \end{cases} \Rightarrow W = E = m \times a \times d$$

$$\text{Or } \begin{cases} a = \frac{\bar{v}}{t} \\ \bar{v} = \frac{V}{2} \end{cases} \Rightarrow E = m \times \frac{V}{2} \times \frac{d}{\frac{t}{V}} = \frac{1}{2} m V^2$$

Remarque

Une force appliquée à un solide en translation et parallèle au vecteur vitesse, modifie l' E_C de ce solide.

Exemple

Une voiture de masse $m = 250$ kg, parcourt une distance de 75 km après 1h30 min. Calculer l'énergie cinétique de ce véhicule.

Solution

Données : $m = 250$ kg, $d = 75$ km = 75 000m ; $t = 1$ h30min = 5400 s

Par définition,
$$\begin{cases} E_C = \frac{1}{2} m V^2 \\ V = \frac{d}{t} \end{cases} \Rightarrow E_C = \frac{1}{2} m \times \left(\frac{d}{t} \right)^2$$
 AN : $E_C = 24112,65$ J.

2.2. Cas d'un solide en rotation

a) Cas d'un point matériel

Un **point matériel** est un solide de dimension suffisamment petite, assimilable à un point, on l'appelle **mobile**.

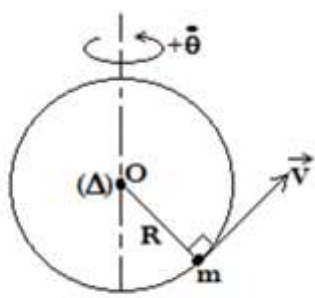


Figure 5.1 : Mouvement circulaire d'un point matériel

$$\begin{cases} E_C = \frac{1}{2} m V^2 \\ V = R \cdot \dot{\theta} = R \cdot \omega \end{cases} \Rightarrow E_C = \frac{1}{2} m R^2 \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} J_{\Delta} \omega^2 \quad (5.2)$$

$$\text{Avec } J_{\Delta} = m \cdot R^2 \quad (5.3)$$

- J_{Δ} est le moment d'inertie du point matériel par rapport à (Δ) et la caractérise. Il s'exprime en **kg.m²**.
- $\dot{\theta} = \omega$ = vitesse angulaire en **rad/s**.

b) Cas d'un solide

Un **système matériel** est un ensemble de points matériels. Lorsque la distance entre deux points du système matériel est **constante** (i.e. **invariable**), ce système matériel est appelé **solide**.

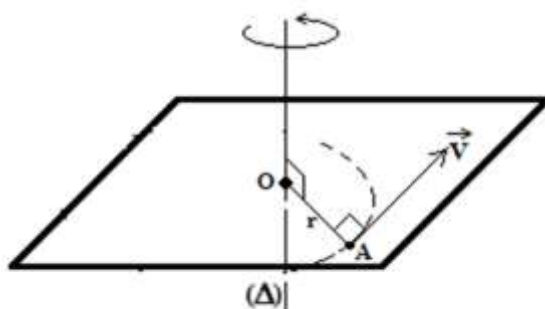


Figure 5.2 : Schéma illustratif

Pour un solide en rotation autour d'un axe (Δ) , à la vitesse angulaire ω , son énergie cinétique est la somme des énergies cinétiques de chacun des points matériels qui le constituent. On écrit à cet effet :

$$E_C = \sum_{i=1}^n E_{C_i} = E_{C1} + E_{C2} + \dots + E_{Cn} = \frac{1}{2} m_1 r_1^2 \omega_1^2 + \frac{1}{2} m_2 r_2^2 \omega_2^2 + \dots + \frac{1}{2} m_n r_n^2 \omega_n^2$$



Or $\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_n = \omega$, car tous les points du solide ont à chaque instant la même vitesse angulaire.

$$\Rightarrow E_C = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \right) \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} J_{\Delta} \omega^2$$

Exemple

Déterminer l'énergie cinétique d'un volant de masse 100 kg (centre masse étant supposée répartie sur une circonférence de 0,50 m de rayon) quand il tourne à la vitesse de 600 tours par minute. On donne : $J_{\Delta} = mr^2$; $\pi^2 \approx 10$.

Solution

Données : $m = 100 \text{ kg}$; $r = 0,5 \text{ m}$; $N = 600 \text{ tr/min} = 10 \text{ tr/s}$; $J_{\Delta} = mr^2$.

$$\begin{cases} E_C = \frac{1}{2} J_{\Delta} \omega^2 \\ \omega = 2\pi N \end{cases} \Rightarrow E_C = 2\pi^2 N^2 J_{\Delta} = 20 \times m \times (N \times r)^2$$

On sait par définition que,

$$\text{AN : } E_C = 5.10^4 \text{ J.}$$

2.3. Cas d'un solide en mouvement mixte : translation + rotation

Pour un mouvement combiné (**translation et rotation simultanées**), on utilise le principe de **sommation** des énergies pour avoir l'énergie cinétique totale du solide :

$$E_C = E_C(\text{trans.}) + E_C(\text{rot.}) = \frac{1}{2} m.v^2 + \frac{1}{2} J_{\Delta} \omega^2 \quad (5.4)$$

Remarque

Une force perpendiculaire au vecteur vitesse ne modifie pas l'énergie cinétique du solide ; elle modifie la direction du déplacement sans changer la norme du vecteur vitesse.

Exemple 1

Une petite bille de masse $m = 50 \text{ g}$, assimilable à une sphère pleine de rayon $r = 10 \text{ cm}$, glisse le long d'une pente inclinée d'un angle $\alpha = 30^\circ$ par rapport l'horizontale à la vitesse $V = 25 \text{ m.s}^{-1}$.

Montrer que l'énergie cinétique de cette bille est : $E_C = \frac{7}{10} mV^2$ On donne : $J_{\Delta} = \frac{2}{5} mr^2$.

Solution

Données : $m = 50 \text{ g} = 0,05 \text{ kg}$; $r = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$; $V = 25 \text{ m.s}^{-1}$.

$$\text{On sait par définition que, } E_C = E_C(\text{trans.}) + E_C(\text{rot.}) = \frac{1}{2} mV^2 + \frac{1}{2} J_{\Delta} \omega^2 = \frac{1}{2} mV^2 + \frac{1}{5} mr^2 \omega^2$$

$$\begin{aligned} (*) \\ \text{Or } \begin{cases} V = \pi DN \\ \omega = 2\pi N \\ D = 2r \end{cases} \Rightarrow \frac{V}{\omega} = \frac{D}{2} = r \Rightarrow \omega = \frac{V}{r} \end{aligned} \quad (2*)$$

$$(2*) \text{ dans } (*), E_C = \frac{1}{2} mV^2 + \frac{1}{5} m \underbrace{(r\omega)^2}_V = \frac{1}{2} mV^2 + \frac{1}{5} mV^2 = \frac{7}{10} mV^2 \quad (\text{CQFD})$$

$$\text{AN : } E_C = 21,88 \text{ J} \approx 22 \text{ J.}$$

Exemple 2

Un cylindre plein et homogène a pour rayon $R = 1,0 \text{ cm}$ et pour longueur $l = 5,0 \text{ cm}$. Son moment d'inertie par rapport à son axe est $J = 6,1.10^{-6} \text{ kg.m}^2$.

- Établissez la relation qui lie la masse volumique μ du cylindre aux grandeurs R , l et J . Calculer μ .
- Ce cylindre tourne autour de son axe à la vitesse angulaire $N = 3000 \text{ tr/min}$. calculer son E_C .



- c) Quelle devrait être sa vitesse de translation pour qu'il possède la même E_c ?
 d) Que devient cette énergie cinétique si l'on double la vitesse précédente ?
 e) Pour arrêter son mouvement de rotation, un patin presse sa périphérie en exerçant une force tangentielle constante F . Sachant que le cylindre effectue 10 tours avant de s'arrêter, calculer l'intensité de la force F . on donne $J = (mR^2)/2$.

Solution

Données : cylindre plein et homogène $\begin{cases} R = 1,0\text{cm} \\ \ell = h = 5,0\text{cm} \\ J = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2 \end{cases}$

- a) Relation entre $\mu = f(R, \ell \text{ et } J)$.

On sait que $\mathbf{m} = \mu \cdot \mathbf{V}$ or $\mathbf{V} = \pi R^2 \mathbf{h}$ et $J = (mR^2)/2 \Rightarrow (2J)/R^2 = \pi \mu R^2 h$

$$\Rightarrow \mu = \frac{2J}{\pi R^4 h} \quad \underline{\text{AN}} : \mu = 7770,7 \text{ kg/m}^3.$$

- b) Calculons E_c si $N = 3000 \text{ tr/min} = 50 \text{ tr/s}$.

En appliquant la formule 5.2 et en posant $\omega = 2\pi N = 100\pi \text{ rad/s}$, on obtient : $E_c = 3,05 \cdot 10^{-2} \text{ J}$.

NB : N = vitesse angulaire ou fréquence angulaire et peut s'exprimer en Hertz (Hz) ou tr/s.

- c) Déterminons V si $E_c(\text{trans}) = E_c(\text{rot})$. À cette égalité, on vérifie sans douleur que :

$$V = R\omega \sqrt{\frac{1}{2}} = 2,22 \text{ m.s}^{-1}.$$

- d) Posons $V' = 2V$

$$\rightarrow E'_c = \frac{1}{2} V'^2 = \frac{1}{2} (2V)^2 = 4 \left(\frac{1}{2} V^2 \right) = 4E_c.$$

Conclusion : Lorsqu'on double la vitesse d'un mobile, son énergie est dans ce cas, quadruplée.

- e) À voir plus loin.

3. Théorème de l'énergie cinétique**3.1. Énoncé du théorème**

« La variation de l'énergie cinétique ΔE_c d'un système entre deux instants t_1 et t_2 donnés, est égale à la somme algébrique des travaux de toutes les forces agissant sur le système pendant cet intervalle

de temps : $\Delta E_c \Big|_{t_1}^{t_2} = E_{c_2} - E_{c_1} = \frac{1}{2} m V_2^2 - \frac{1}{2} m V_1^2 = \sum W(\vec{F}_{\text{ext}}) \quad (5.5)$

Exemple

Répondons à la question e) de l'exemple 2 ci-dessus.

Solution

Étant donné que la force exercée sur le cylindre arrête le mouvement de celui-ci, elle est alors considérée comme force de frottement ou force de freinage. On aura alors, en appliquant le théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta E_c = E_{c_f} - E_{c_i} = W(\vec{F}) = M \times \theta = -2\pi n F.R. \Rightarrow F = \frac{E_{c_i}}{2\pi n R} \quad \underline{\text{AN}} : F = 0,049 \text{ N} \approx 0,1 \text{ N}.$$

Exemple

Un solide (S) de masse $m = 10 \text{ kg}$, tombe en chute libre du haut d'un immeuble de hauteur par rapport au sol, $h = 13 \text{ m}$.

- (a) Qu'appelle-t-on chute libre ?

- (b) Le solide (S) quitte du sommet de l'immeuble avec une vitesse $V_0 = 3 \text{ m.s}^{-1}$.

- (i) En appliquant le théorème de l'énergie cinétique (TEC), calculer sa vitesse au premier contact avec le sol.

(ii) Que vaut alors, pendant son mouvement de chute, son énergie potentielle de pesanteur ? Justifier votre réponse.

Solution

$$\text{Solide (S) : } \begin{cases} \text{masse : } m = 10\text{kg} \\ \text{hauteur : } h = 13\text{m} \\ g = 9,8\text{N.kg}^{-1} \end{cases}$$

(a) Chute libre : C'est le mouvement de chute d'un objet soumis à la seule action de son poids.

(b) Vitesse initiale en O : $V_0 = 3\text{m.s}^{-1}$

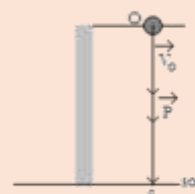
(i) Calculons la vitesse V_s au sol :

$$\text{TEC : } \Delta E_C = \sum W(\vec{F}_{\text{ext}}) \Leftarrow E_{C_s} - E_{C_o} = W(\vec{P})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2}mV_s^2 - \frac{1}{2}mV_o^2 = mgh$$

$$\Rightarrow V_s = \sqrt{V_o^2 + 2gh}$$

$$\underline{\text{AN : }} V_s = 16,24 \text{ m.s}^{-1}.$$



(ii) Valeur de l'énergie potentielle E_p lors de la descente du solide (S).

Étant donné que le solide est en chute libre, alors, il y a transformation intégrale de l'énergie cinétique E_C en énergie potentielle de pesanteur E_p . Soit donc :

$$E_p = E_C = \frac{1}{2}mV_o^2$$

$$\underline{\text{AN : }} E_p = 45 \text{ J.}$$

3.2. Applications du théorème : Notion de choc

- Un système est dit **isolé**, lorsqu'il n'est soumis à aucune force extérieure.
- Un système est dit **pseudo-isolé**, lorsqu'il est soumis à des forces extérieures dont la somme vectorielle est nulle.
- Un système isolé ou pseudo-isolé, conserve sa quantité de mouvement : $\vec{P} = \text{cste}$ (5.6)
- On appelle **choc**, la collision brusque (ou impact brusque) entre deux systèmes (solides).

3.2.1. Choc mou

- En général, un choc est dit mou, lorsqu'après le choc, les deux solides restent collés.
- On pourrait, dans une certaine mesure, assister à une conservation de l'énergie cinétique.

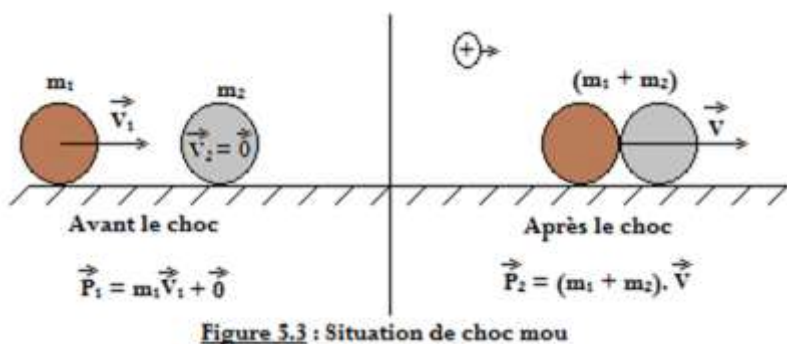


Figure 5.3 : Situation de choc mou

- En appliquant la conservation de la quantité de mouvement, on a :

- Avant le choc : $\vec{P}_1 = m_1 \vec{V}_1 + \vec{0}$

- Après le choc : $\vec{P}_2 = (m_1 + m_2) \vec{V}$

- Conservation : $\vec{P}_1 = \vec{P}_2 \Leftrightarrow m_1 \vec{V}_1 = (m_1 + m_2) \vec{V} \Rightarrow \vec{V} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{V}_1$

- Algébrisation : $V = \frac{m_1}{m_1 + m_2} V_1$ (5.7)

- S'il y a conservation d'énergie cinétique, on aura : $V = V_1 \sqrt{\frac{m_1}{m_1 + m_2}}$ (5.8)

3.2.2. Choc élastique, choc parfaitement élastique

- En général, un choc est dit élastique, lorsqu'après le choc, les deux solides prennent des directions privilégiées.
- Si en plus de la conservation des quantités de mouvement il y a conservation de l'énergie cinétique, alors, le **choc est dit parfaitement élastique**. On a alors :

$$\begin{cases} \vec{P} = \text{cste} \\ E_C = \text{cste} \end{cases} \quad (5.9)$$

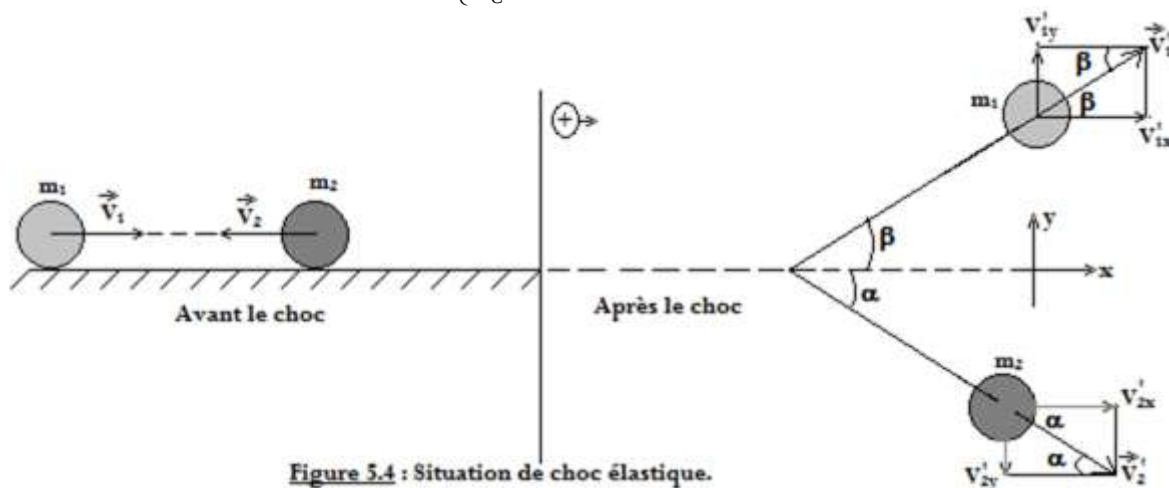


Figure 5.4 : Situation de choc élastique.

- Les lois utilisées :

■ Quantité de mouvement

- Avant le choc : $\vec{P}_1 = m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2$

- Après le choc : $\vec{P}_2 = m_1 \vec{V}_1' + m_2 \vec{V}_2'$

- Conservation : $\vec{P}_1 = \vec{P}_2 \Leftrightarrow m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2 = m_1 \vec{V}_1' + m_2 \vec{V}_2'$ (*)

- Algébrisation :
$$\begin{cases} m_1 V_1 - m_2 V_2 = m_1 V_1' \cos \beta + m_2 V_2' \cos \alpha \\ 0 = m_1 V_1' \sin \beta - m_2 V_2' \sin \alpha \end{cases} \Rightarrow$$

■ Énergie cinétique

- Avant le choc : $E_{C_1} = \frac{1}{2} m_1 V_1^2 + \frac{1}{2} m_2 V_2^2$

- Après le choc : $E_{C_2} = \frac{1}{2} m_1 V_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 V_2'^2$

- Conservation : $E_{C_1} = E_{C_2} \Leftrightarrow m_1 (V_1^2 - V_1'^2) = m_2 (V_2'^2 - V_2^2)$

**Exemple**

On néglige dans cet exercice la résistance de l'air et on prendra $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

- a) Quelles sont les quantités de mouvement et l'énergie cinétique d'un wagon de 1 tonne qui circule à une vitesse de 144 km/h ?
- b) Ce wagon rattrape et se colle sans rien casser sur sa trajectoire, un autre wagon de même masse circulant à une vitesse de 72 km/h. Quelle est la vitesse du train formé par ces deux wagons ?

Solution

On donne : $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

(a) Calculons :

- ♦ La quantité de mouvement P si $V = 144 \text{ km.h}^{-1} = 40 \text{ m.s}^{-1}$ et $m = 1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$.

$$P = mV = 40.000 \text{ kg.m.s}^{-1}$$

- ♦ L'énergie cinétique E_c

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 = 800.000 \text{ J.}$$

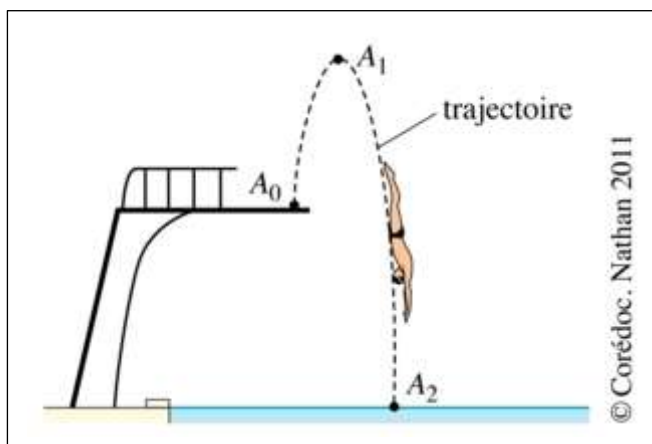
(b) Le choc ici est mou. On aura donc comme vitesse V de l'ensemble formé par les deux wagons de vitesses respectives $V_1 = 40 \text{ m.s}^{-1}$ et $V_2 = 20 \text{ m.s}^{-1} = 75 \text{ km.h}^{-1}$ (En appliquant la conservation des quantités de choc) :

- Quantité de mouvement avant le choc : $P = m_1V_1 + m_2V_2$
- Quantité de mouvement après le choc : $P' = (m_1 + m_2)V$.
- Conservation : $P = P'$ et $m_1 = m_2 \Rightarrow 2V = V_1 + V_2$
- Soit donc : $V = (V_1 + V_2) / 2 = 30 \text{ m.s}^{-1} = 108 \text{ km.h}^{-1}$.

4. Jeu bilingue

Expression française	Expression anglaise
Énergie cinétique	Kinetic energy
Vitesse	Velocity
Quantité de mouvement	Momentum

Sentence: The kinetic energy is the energy that has one system because of its velocity.



**EXERCICES DE LA LEÇON 5 : ÉNERGIE CINÉTIQUE****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS**

- Définir : énergie cinétique ; point matériel ; système isolé ; système pseudo-isolé.
- Énoncer le théorème de l'énergie cinétique.
- Vrai ou faux
 - En réalité, il existe des systèmes purement isolés.
 - Lorsque, au cours d'un choc mou, il y a conservation de l'énergie cinétique, le choc est dit parfaitement élastique.
 - Si l'on double la vitesse d'un mobile, alors, son énergie cinétique est aussi doublée.
 - Un mobile de masse 1 kg, roulant à vitesse d'un mètre par seconde, a une énergie cinétique de 1 J.
 - La vitesse angulaire ω et le nombre de tours par seconde sont reliés par la relation $N = 2\pi\omega$.
 - La vitesse linéaire V , le rayon de courbure R et la vitesse angulaire ω sont reliés par : $V = R\omega$.
- Choisir la bonne réponse
 - L'énergie cinétique est aussi le travail d'une (ou de plusieurs) force(s)
 - Vrai ;
 - Faux ;
 - Aucune réponse
 - Le carré de la vitesse est :
 - Son double
 - Sa moitié
 - La même valeur multipliée par elle-même.
 - L'énergie cinétique d'un mobile de masse 1 kg, parcourant une distance de 1 m en 1 s, est :
 - 1 J ;
 - 0,5 J ;
 - 2 J ;
 - Aucune réponse.
 - Si l'on double la masse d'un mobile,
 - Son énergie cinétique n'est pas modifiée ;
 - Son énergie cinétique est diminuée de moitié ;
 - Son énergie cinétique est aussi doublée.
 - Un disque de moment d'inertie égal à 0,001 kg.m², tournant autour d'un axe fixe à la vitesse de 20 tours toutes les 4 secondes, a une énergie cinétique égale à :
 - $5 \cdot 10^{-2}$ J ;
 - $5 \cdot 10^{-1}$ J ;
 - $5 \cdot 10^0$ J.
 - Deux solides de masse m_1 et $m_2 = 3m_1$, animés de la même vitesse, ont des énergies cinétiques E_{C1} et E_{C2} telles que :
 - $E_{C1} = 3 E_{C2}$;
 - $E_{C2} = 3E_{C1}$;
 - $E_{C2} = E_{C1}$.
- Compléter les phrases ci-dessous par le mot (ou expression) manquant(e) :
 - L'énergie que possède un corps à cause de sa vitesse est appelée.....
 - Le choc pour lequel l'énergie cinétique se conserve est dit.....
 - Si un corps a pour expression d'énergie cinétique $E_k = \frac{1}{2} J_{\Delta} \omega^2$, alors ce corps est en.....au tour de son de révolution.
 - Pour des mouvements combinés, ...et rotation, l'énergie cinétique totale du système est obtenue en utilisant le.....et son expression est.....

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR – FAIRE

- Usain Bolt détient le record du monde du 100 m avec un temps de 9,56 s.
 - Calculer la vitesse d'Usain Bolt lors de son 100 m.
 - Convertir cette vitesse en km.h⁻¹.
 - Sachant que la masse de Usain Bolt est de 86,0 kg, déterminer alors son énergie cinétique atteinte lors de son 100 m.
- Le 26 mars, la SNCF a présenté officiellement la rame du record du monde à la presse. La TGV de masse 268 tonnes possédait alors une énergie cinétique de $2,70 \cdot 10^9$ J.
 - Déterminer alors la vitesse atteinte par le TGV lors de ce record du monde.
 - Convertir cette vitesse en km.h⁻¹.
- Une roue à une masse de 4 tonnes supposée répartie sur une circonférence de 2m. Elle est mise en rotation grâce à un moteur tournant à une vitesse de 300tr/min en régime normal. Un travail supplémentaire de 1000 J est imposé à la machine sur l'axe duquel est adaptée la roue. Déterminer la nouvelle vitesse de rotation de l'ensemble. Le moment d'inertie de l'ensemble est sensiblement égal à celui du volant seul et vaut $J_{\Delta} = 4 \cdot 10^3$ kg.m².
- Un fusil de masse $M = 300$ g, libère une balle de masse $m = 10$ g. Celle-ci acquiert une vitesse $V_1 = 500$ m.s⁻¹.
 - Calculer la vitesse V de recul du fusil après le tir.
 - Sur sa trajectoire, la balle heurte un corps (C) élastique constituant un pare-balle immobile. Après le choc, le corps (C) s'écarte de 100 cm de profondeur à la vitesse 20 cm.s⁻¹.
Déterminer la vitesse $\vec{v}_1$ de la balle après le choc, si l'on suppose la masse du corps (C) égale à 15 kg.
 - Peut-on dire que le choc entre la balle et le corps (C) est parfaitement élastique ? Justifier votre réponse.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES**Situation 1**

Une baleine de masse m , de longueur $L = 3$ m, nage dans une mer de masse volumique 1025 kg.m⁻³, en battant 50 fois par seconde sa queue.

Déterminer l'énergie cinétique de cette baleine.

Situation 2

Une petite mangue de 50 g, tombe du haut d'un manguier haut de 2,3 m, à la vitesse de 20 m.s⁻¹. On admet que la mangue brise au contact du sol lorsque sa vitesse est de 21,1 m.s⁻¹.

Montrer que la mangue peut briser au contact du sol.

Situation 3

Traduire en anglais : Un corps possède de l'énergie lorsqu'il est capable de fournir un travail au milieu extérieur.



Leçon 6

CONSERVATION DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE

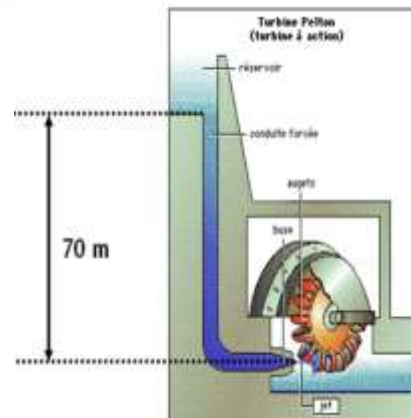


ACTIVITÉS

Activité

On place une turbine sous le niveau d'un réservoir d'eau afin de transformer l'**énergie potentielle** de l'eau en **énergie de mouvement** capable de faire tourner la turbine qui produira l'électricité.

Comment expliquer ce mécanisme ?

Objectifs

- ➔ Définir et exprimer l'énergie potentielle d'un système
- ➔ Définir et exprimer l'énergie mécanique d'un système
- ➔ Énoncer et appliquer la loi de conservation de l'énergie mécanique

1. Définition et notation de l'énergie mécanique1.1. Définitions

- Le TEC suggère la possibilité de communiquer de l'énergie cinétique à un solide. Ce dernier est alors en mouvement ; il existe une autre forme d'énergie qui est liée à la **position** d'un système ou à sa **déformation**. Cette énergie, utilisée à un instant favorable, est une énergie en "**puissance**" appelée **énergie potentielle**.
- L'**énergie mécanique** E_M ou E se subdivise en deux types d'énergies à savoir :
 - L'**énergie cinétique** notée E_C qui est liée à la vitesse d'un corps au cours de son déplacement dans un repère d'espace ;
 - L'**énergie potentielle** notée E_P qui est liée à la variation relative des positions du système dans son mouvement dans un repère d'espace.

1.2. Symbole et unité

- L'énergie mécanique est notée E ou E_M . Elle est obtenue en faisant la somme de l'énergie cinétique et des énergies potentielles :

$$E = E_C + \Sigma E_P \quad (6.1)$$
- Étant donné que l'énergie mécanique est la somme des énergies exprimées en Joules, on en déduit alors que, l'énergie mécanique s'exprime en Joules.

2. Notion d'énergie potentielle2.1. Définition et présentation

- L'**énergie potentielle** notée E_P qui est liée à la variation relative des positions du système dans son mouvement dans un repère d'espace.



- L'**énergie potentielle** est aussi l'énergie que possède un système du fait des positions relatives de ses parties en interaction.
- L'énergie potentielle s'exprime aussi en Joule.

2.2. Les types d'énergie potentielle

2.2.1. Énergie potentielle de pesanteur E_{pp}

- L'**énergie potentielle de pesanteur** est l'énergie que possède un système, lorsqu'une de ses parties est la Terre.
- Cette énergie n'est alors rien d'autre que le travail du poids d'un corps.
- Expression de l'énergie potentielle de pesanteur
Considérons pour cela, la figure ci-dessous :

- Sur la figure 6.1, pour rouler la bille de masse m vers le haut de la pente, il faut travailler contre le poids de la bille.

- L'énergie potentielle accumulée est alors égale au travail qu'il faut fournir pour amener la bille d'une position de référence d'altitude $Z_{réf}$ à un autre niveau d'altitude Z_i ($i = 1, 2, 3, \dots$), dans un champ de pesanteur supposé uniforme.

$$\text{On a alors : } \Delta E_{pp} = -\Delta W(\vec{P}) \Leftrightarrow E_{pp-1} - \underbrace{E_{pp-réf}}_0 = W(\vec{P}_1) - W(\vec{P}_{réf})$$

$$\Rightarrow E_{pp-1} = m \times g \times (Z_1 - Z_{réf})$$

De même,

$$E_{pp-2} = m \times g \times (Z_2 - Z_{réf})$$

$$\begin{cases} m & \text{en kg} \\ g & \text{en N/kg} \\ Z & \text{en m} \end{cases}$$

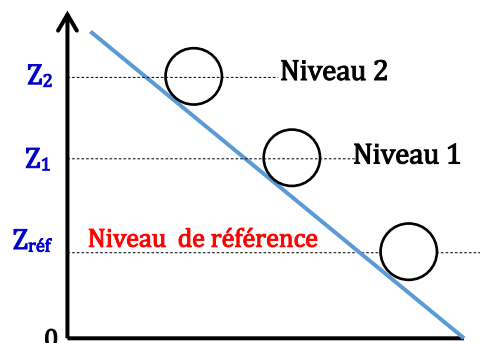


Figure 6.1

Remarque

- ✍ L'énergie potentielle est une grandeur scalaire algébrique.
- ✍ L'énergie potentielle est définie à une constante additive près qui dépend du choix de l'origine de l'axe vertical :

$$\text{On écrit : } E_{pp} = m \times g \times Z + \text{constante} \quad (\text{où } Z \text{ est la cote ou l'altitude}) \quad (6.2)$$

$$\text{En effet, } E_{pp} = mg(Z - Z_{réf}) = mgZ - mgZ_{réf} \Rightarrow E_{pp} = mgZ + \text{cste avec } \text{cste} = -mgZ_{réf}. \quad (6.3)$$

- ✍ L'énergie est **nulle** au niveau pris comme état de référence.
- ✍ L'énergie potentielle est **positive** au-dessus du niveau de référence et **négative** dans le cas contraire.

$$\text{Quel que soit le niveau de référence choisi, } \Delta E_p = \text{constante} \quad (6.4)$$

✍ Conséquence : la variation de l' E_{pp} est indépendante de la référence choisie :

$$\begin{cases} E_{pA} = mgz_A \\ E_{pB} = mgz_B \end{cases} \Rightarrow E_{pA} - E_{pB} = mg(z_A - z_B) = \Delta E_{pp} \quad (6.5)$$

Exemple

Une flèche, de masse $m = 100\text{g}$, est lancée verticalement vers le haut avec une vitesse $v = 25\text{m/s}$. On néglige les frottements de l'air.

- Quelle est l'énergie cinétique initiale de la flèche ?
- Comparer littéralement les variations d'énergies cinétique et potentielle de la flèche entre son point de lancement et le sommet de sa trajectoire.
- En déduire l'altitude maximale atteinte par la flèche.

Solution

Considérons la figure 3.2 ci-dessous et supposons que la flèche est en sens inverse i.e. de B vers A

- D'après la formule 2.1 du chapitre précédent et en AN, $E_c = 31,25 \text{ J}$.

- b) Comparaison : $\Delta E_C = E_{CA} - E_{CB} = mgh$ or $E_{PA} = 0 \text{ J} \Rightarrow \Delta E_C = - E_{CB}$ (*)
- $\Delta E_P = E_{PB} - E_{PA} = mg(X_B - X_A) = mgh \Rightarrow \Delta E_P = - \Delta E_C = E_C$. (**)
- c) En exploitant (*) et (**), déterminons h. $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$.
- $$\Delta E_P = mgh = E_C \Rightarrow h = \frac{E_C}{mg} = 31.9 \text{ m}$$

2.2.2. Énergies potentielles élastiques E_{pe}

2.2.2.1. Énergie potentielle élastique due à la déformation d'un ressort

♦ Définition

L'**élasticité** est la propriété d'un corps qui peut se déformer sous l'effort et reprendre sa forme initiale lorsque l'effort de déformation est supprimé.

- ♦ Déformation de compression ou de détente d'un ressort

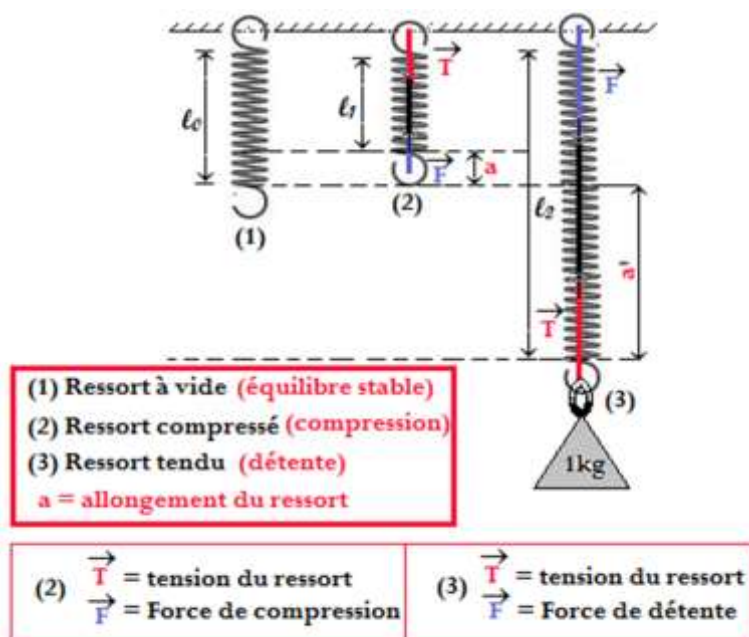


Figure 6.2 : Ressort allongé - comprimé verticalement

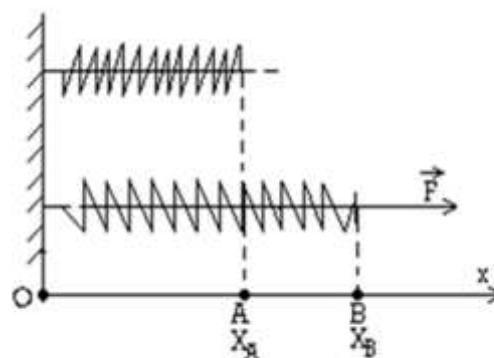


Figure 6.3 : Ressort allongé horizontalement

L'**énergie potentielle** élastique notée E_{pe} , est une énergie de déformation i.e. celle liée à l'**élasticité**.

- En considérant les situations (1) et (2) de la figure 6.2, l'énergie potentielle élastique est donnée par :

$$E_{pe} = \frac{1}{2} k (\Delta \ell)^2 = \frac{1}{2} k (\ell_0 - \ell_1)^2 = \frac{1}{2} k a^2 \quad (\text{Compression - raccourcissement}) \quad (6.6)$$

- En considérant les situations (1) et (3) de la figure 6.2 (il en est de même avec la figure 6.3), l'énergie potentielle élastique est donnée par :

$$E_{pe} = \frac{1}{2} k (\Delta \ell)^2 = \frac{1}{2} k (\ell_2 - \ell_0)^2 = \frac{1}{2} k a'^2 \quad (\text{Détente - élongation - allongement}) \quad (6.7)$$

- En combinant les systèmes (1), (2) et (3) de la figure 6.2, on trouve :

$$\ell_1 + \ell_2 = 2\ell_0 \quad (6.8)$$

Unités : **k** (constante de raideur du ressort) en N.m^{-1} ; ℓ_i ($i = 0, 1, 2$) et (**a**, **a'**) en mètres (m).

Exemple

Le Marsupilami est un animal de bande dessinée créé par Franquin. Ses capacités physiques sont remarquables, en particulier grâce à sa queue qui possède une force importante : le Marsupilami peut notamment sauter en enroulant sa queue comme un ressort entre lui et le sol.



On note $\ell_0 = 2\text{ m}$, la longueur à vide du ressort équivalent à la queue du Marsupilami. Lorsqu'il est complètement comprimé, la longueur minimale du ressort est $\ell_m = 50\text{ cm}$. On supposera que la Marsupilami pèse 50 kg , et que sa queue quitte le sol, lorsque le ressort mesure ℓ_0 .

- Déterminer la constante de raideur de la queue du Marsupilami s'il est capable de sauter jusqu'à une hauteur $h = 10\text{ m}$.
- Quelle est la vitesse du Marsupilami lorsque sa queue quitte le sol ?

Solution

Données : $\ell_0 = 2\text{ m}$; $\ell_m = 50\text{ cm}$; $m = 50\text{ kg}$; $h = 10\text{ m}$; $g = 9,8\text{ N.kg}^{-1}$: phénomène de raccourcissement

(a) Déterminons la constante de raideur k_M du Marsupilami.

Nous avons vu que : $E_{pe} = W(\vec{P}) \Leftrightarrow \frac{1}{2} k_M (\ell_0 - \ell_m)^2 = mgh$ (égalité à justifier plus bas)

$$\Rightarrow k_M = \frac{2mgh}{(\ell_0 - \ell_m)^2} \quad \underline{\text{AN}} : k_M = 4,4 \cdot 10^3 \text{ N.m}^{-1} = 4,4 \text{ kN.m}^{-1}.$$

(b) Déterminons la vitesse V du Marsupilami au moment où sa queue quitte le sol.

Nous exploitons pour cela, le TEC : $\Delta E_C = W(\vec{P})_{\ell_0}^h = \Delta E_{pp} \Leftrightarrow \frac{1}{2} mV^2 = mg(h - \ell_0)$

$$\Rightarrow V = \sqrt{2g(h - \ell_0)} \quad \underline{\text{AN}} : V = 12,52 \text{ m.s}^{-1} \approx 13 \text{ m.s}^{-1}.$$

2.2.2.2. Énergie potentielle de torsion

Un fil élastique de constante de torsion C (N.m.rad^{-1}) ayant subi une torsion d'angle θ [en radians] (figure 6.4), possède de l'énergie potentielle élastique dont l'expression est :

$$E_{pe} = \frac{1}{2} C \theta^2 \quad (6.9)$$

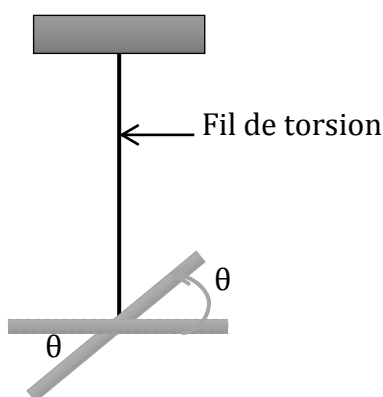


Figure 6.4 : Torsion d'un fil

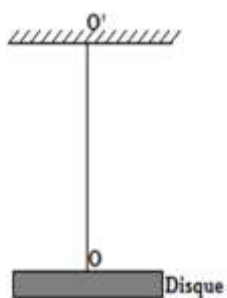
Remarque

- La formule (6.9) est aussi applicable au ressort spiral.
- Les énergies potentielles sont toujours des grandeurs physiques.
- L'énergie potentielle d'un système est égale à la somme algébrique de toutes les énergies potentielles dudit système :

$$E_P = E_{pp} + E_{pe} + \dots \quad (6.10)$$

Exemple

Soit le système ci-dessous :



Un disque homogène de masse $m = 1,8\text{ kg}$ et de rayon $R = 10\text{ cm}$, est suspendu horizontalement par un fil de torsion de constante de torsion $C = 0,5\text{ N.m.rad}^{-1}$, dont l'une des extrémités au centre O du disque et l'autre est encastrée en O' . À partir de sa position d'équilibre, on tourne le disque autour de OO' d'un angle $\theta_m = \pi\text{ rad}$ et on le maintient dans cette position.

Calculer dans cette position, l'énergie potentielle du système {fil - disque}.

**Solution**

Données : $R = 0,1 \text{ m}$; $m = 1,8 \text{ kg}$; $C = 0,5 \text{ N.m.rad}^{-1}$; $\theta_m = \pi \text{ rad} \cong 180^\circ$.

Calculons l'énergie potentielle E_{Pe} .

$$E_p = E_{Pe} = (C \times \theta_m^2)/2$$

$$\Rightarrow E_{Pe} = (C \times \theta_m^2)/2 = 2,47 \text{ J.}$$

2.2.3. Puits et barrière d'énergie potentielle (univ.)**3. L'énergie mécanique**

Nous avons défini au paragraphe 1.2 que l'énergie mécanique est la somme des énergies cinétique et potentielle.

3.1. Transformation mutuelle des énergies

- Lorsqu'un ressort comprime horizontalement un solide et le lâche sans vitesse initiale, l'énergie potentielle élastique du ressort se transforme en énergie cinétique : $E_{Pe} = E_C$ (6.11)
- Lorsqu'un ressort comprime verticalement un solide et la lâche sans vitesse initiale, l'énergie potentielle élastique du ressort se transforme d'abord en énergie cinétique, qui à son tour, se transforme en énergie potentielle de pesanteur avant de retomber : $E_{Pe} = E_C = E_{Pp}$ (6.12)
- Lorsqu'un objet tombe en chute libre du haut d'un édifice de hauteur h , l'énergie potentielle de pesanteur se transforme en énergie cinétique : $E_{Pp} = E_C$ (6.13)

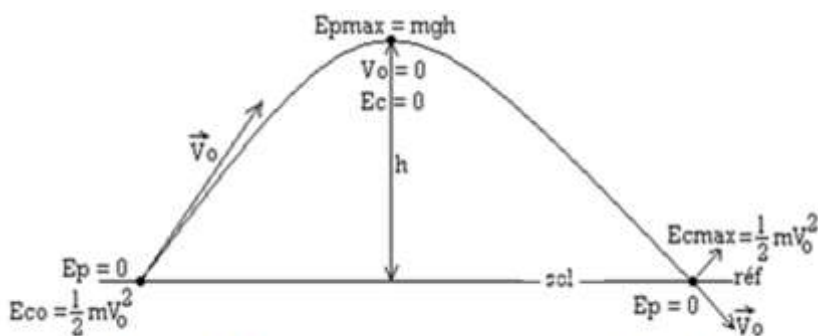


Figure 6.6 : Transformation mutuelle E_C en E_{Pp}

Conclusion

Une **perte** en énergie cinétique correspond à un **gain** en énergie potentielle et réciproquement. Raison pour laquelle on dit que les énergies potentielle et cinétique se transforment mutuellement selon l'équation : $E_C \rightleftharpoons E_{Pp}$

- Lorsqu'un système n'est soumis qu'à l'action des forces de frottement au cours de son mouvement, l'énergie cinétique de ce dernier se transforme en chaleur : $E_C = Q$ (6.14)
- Dans les barrages hydroélectriques, l'énergie potentielle de pesanteur (chute d'eau), se transforme en énergie électrique : $E_{Pp} = W_{\text{électrique}}$ (6.15)

Ces différentes transformations mutuelles d'énergie, justifient l'affirmation suivante :

« *L'énergie ne se perd pas, l'énergie ne se crée pas, elle transforme tout simplement d'une forme à l'autre* »

3.2. Systèmes conservatifs

- Un système est dit conservatif, lorsqu'au cours du temps, son énergie mécanique ne change pas. On dit aussi que ce système est soumis à des forces conservatives.



Preuve :
$$\begin{cases} E_1 = E_{C_1} + E_{P_1} \\ E_2 = E_{C_2} + E_{P_2} \end{cases} \xrightarrow{\text{conservation}} E_2 - E_1 = \Delta E = 0 \Leftrightarrow \Delta E = -\sum \Delta E_p \quad (6.16)$$

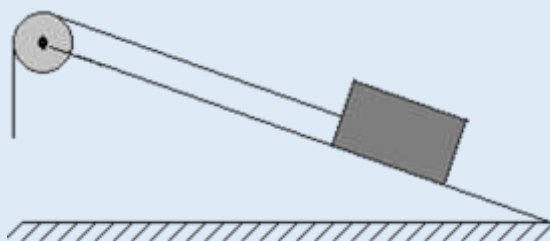
Principe de conservation de l'énergie mécanique : « L'énergie mécanique E d'un système isolé ou pseudo-isolé, en l'absence de frottements intérieurs à l'échelle macroscopique, se conserve : $\forall t, E = E_C + \sum E_P = \text{cste} \Rightarrow \Delta E = \Delta E_C + \sum \Delta E_P = 0$ il en découle alors que : $\Delta E = -\Delta E_P$ »

Remarque

Si la formule 6.16 est vérifiée pour tout instant t , alors le système est dit **conservatif**.

Exemple

On tire à l'aide d'un treuil un bloc de granite de masse $m = 50\text{ kg}$, posé sur un plan incliné de 30° par rapport à l'horizontal. L'intensité de la force de traction exercée par le treuil est $F = 300\text{ N}$.



- Représenter et faire le bilan des forces qui s'exercent sur le bloc.
- Lorsque le solide se déplace sur une distance de 70 cm , calculer le travail de chacune des forces identifiées.
- Déterminer la variation des énergies cinétique, potentielle et mécanique sur ce parcours.
- Calculer la puissance de la force motrice, lorsque le déplacement de 70 cm s'effectue en 3 min .

Solution

Données : $m = 50\text{ kg}$; $F = 300\text{ N}$; $\alpha = 30^\circ$;

- (a) Bilan des forces appliquées sur le bloc :
$$\begin{cases} \vec{P} = \vec{P}_x + \vec{P}_y : \text{poids du bloc} \\ \vec{F} : \text{force de traction} \\ \vec{R} : \text{réaction du plan incliné} \end{cases}$$
- (b) Calcul des travaux de chaque force pour un déplacement $d = 70\text{ cm} = 0,7\text{ m}$.
- $W(\vec{P}) = W(\vec{P}_x) = -m \times g \times d \times \sin \alpha = -171,5\text{ J}$
 - $W(\vec{F}) = F \cdot d = 210\text{ J}$
 - $W(\vec{R}) = 0\text{ J}$
- (c) Déterminons ΔE_C ; ΔE_{PP} ; ΔE sur $d = 0,7\text{ m}$.
- $\Delta E_C = W(P) + W(F) + W(R) = 38,5\text{ J}$.
 - $\Delta E_{PP} = W(P) = 171,5\text{ J}$.
 - $\Delta E = \Delta E_C + \Delta E_{PP} = 210\text{ J}$.
- (d) Calculons la puissance P si $t = 3\text{ min} = 180\text{ s}$.

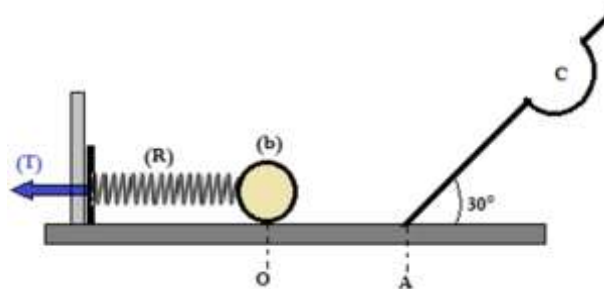
Par définition,
$$P = \frac{W(\vec{F})}{t} = 1,17\text{ J}.$$

3.3. Systèmes non conservatifs

- Un système est dit non conservatif, lorsque son énergie mécanique change au cours du temps.
- Si l'on tient compte des **forces de frottement**, il n'y aura plus conservation de l' E_M . La variation correspondra dès lors à la chaleur dégagée : c'est l'énergie calorifique : $\Delta E_M = Q = W(\vec{f})$ (**système non conservatif**) (6.17)

Exemple

On considère la figure ci-dessous.



Un jeu consiste à introduire une bille (b) dans une cavité C, comme l'indique la figure ci-dessus. Le principe du jeu est simple : le ressort (R) est comprimé par un joueur par l'intermédiaire d'une tirette (T) de masse négligeable.

La bille (b) de masse $m = 250 \text{ g}$, assimilable à un point matériel, est appliquée contre le ressort comprimé. Le joueur tire sur la tirette qui maintient le ressort, puis observe le mouvement de la bille ; il gagne le jeu si la bille vient à se loger dans la cavité C. le ressort est à spires non jointives et de masse négligeable. Sachant que la raideur du ressort est $k = 40 \text{ N.m}^{-1}$, le déplacement $AC = 1 \text{ m}$. Le joueur comprime le ressort de $x = 10 \text{ cm}$. Les forces de frottement sont négligées dans tout l'exercice.

- (1) Exprimer, puis calculer, l'énergie emmagasinée par le ressort
- (2) Sachant qu'au moment où le joueur lâche la tirette, toute l'énergie potentielle est transformée en énergie cinétique, qui permet alors à la bille de décoller, exprimer, puis calculer la valeur V_0 de la vitesse initiale de la bille.
- (3) Représenter les forces qui s'exercent sur la bille lorsqu'elle passe sur les tronçons OA et AC.
- (4) Déterminer la vitesse de la bille en A.
- (5) En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, calculer la distance AC' parcourue par la bille sur le trajet AC avant de s'arrêter. En comparant AC et AC' , dire si le joueur gagne le jeu.
- (6) Sinon, déterminer le raccourcissement maximale x_{max} qu'il faudrait imposer au ressort pour gagner ce jeu en supposant que la vitesse de la bille est nulle, lorsqu'elle atteint C.

Solution

Données : $m = 0,25 \text{ kg}$; $k = 40 \text{ N.m}^{-1}$; $AC = 1 \text{ m}$; $x = 0,1 \text{ m}$.

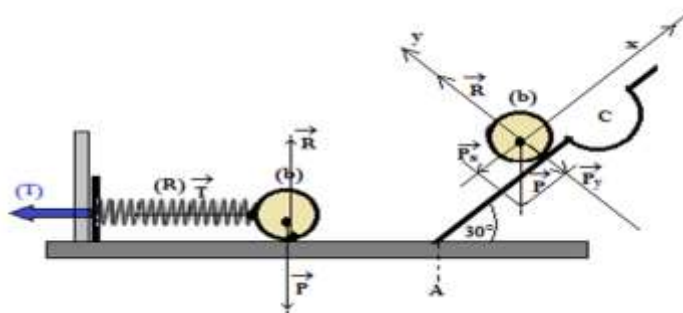
- (1) Calculons E_{pe} .

$$\text{Par définition, } E_{pe} = \frac{1}{2} kx^2 = 0,2 \text{ J}$$

- (2) Calculons V_0 .

$$\text{On a : } E_C = E_{pe} \Rightarrow V_0 = \sqrt{\frac{2E_{pe}}{m}} = 1,26 \text{ m.s}^{-1}.$$

- (3) Figure illustrative.





(4) Déterminons la vitesse de la bille en A.

$$\text{TEC : } E_{CA} - E_{CO} = 0 \Rightarrow V_A = V_0 = 1,26 \text{ m.s}^{-1}.$$

(5) Calculons la distance AC'.

$$\text{TEC : } E_{CC'} - E_{CA} = -mgAC'\sin 30^\circ \text{ or } E_{CC'} = 0 \text{ J et } \sin 30^\circ = 0,5 ; E_{CA} = (mV_A^2) / 2 \\ \Rightarrow AC' = V_A^2 / g = 0,162 \text{ m.}$$

$AC' < AC \Rightarrow$ le solide n'atteint pas le point C. Donc le joueur perd son jeu.

(6) Calculons le raccourcissement maximale $x_{\max}$ permettant au joueur d'atteindre C.

$$\text{On a : } E_{Pe} = E_{PP} \Leftrightarrow (kx_{\max}^2)/2 = mgAC\sin 30^\circ$$

$$\Rightarrow x_{\max} = \sqrt{\frac{m \times g \times AC}{k}} = 0,25 \text{ m.}$$

4. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Énergie potentielle	Potential energy
Énergie mécanique	Mechanical energy
Puits de potentiel	Well (or hole) potential
Barrière de potentiel	Potential barrier

Sentence:

The sum of the kinetic and potential energies in a system is called the total **mechanical energy**. An **ideal mechanical system** is a closed system in which no friction or other non-conservative force acts.

Phrase :

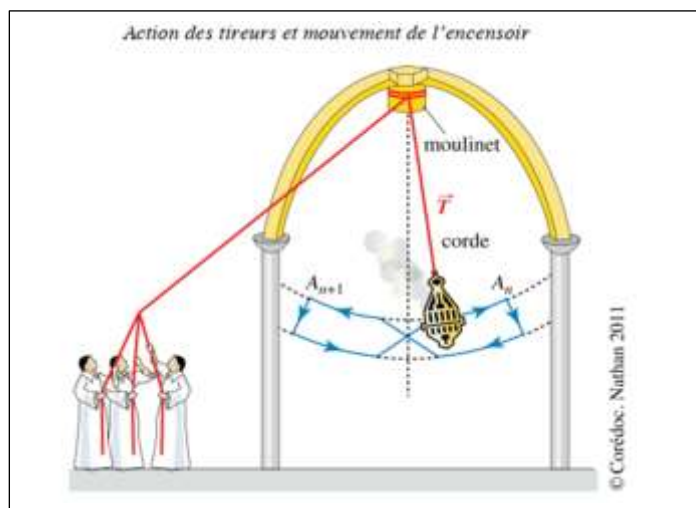
La somme des énergies cinétique et potentielle dans un système est appelée **énergie mécanique totale** du système. Un système mécanique idéal est un système dans lequel il n'y existe ni force de frottement ni de forces non conservatives.

Sentence:

When a system is acted upon by a non-conservative force, such as friction, it is called a **non-ideal mechanical system**. The **total energy** of a non-ideal system is given by this formula:

$$E_T = PE + KE + Q \quad (6.18)$$

Where E_T represents the total energy, PE is potential energy, KE is kinetic energy, and Q is the internal energy. All quantities are expressed in joules.



**EXERCICES DE LA LEÇON 6 : CONSERVATION DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS**

- Définir : énergie cinétique ; énergie potentielle ; élasticité.
- Énoncer le principe de conservation de l'énergie mécanique.
- Expliquer par un exemple, l'affirmation suivante : « l'énergie ne se crée pas, l'énergie ne se perd pas, elle se transforme tout simplement d'une forme à l'autre ».
- Vrai ou faux
 - Tout corps élastique possède une énergie mécanique.
 - Tout corps, même au repos possède de l'énergie.
 - Lors de la chute libre, l'énergie potentielle élastique d'un corps se transforme en énergie cinétique.
 - Un système idéal est un système qui conserve son énergie mécanique.
 - Lorsqu'un système est non idéal, la variation de l'énergie mécanique est égale à l'énergie interne (chaleur) due aux frottements.
 - Pour un système conservatif, la variation de l'énergie cinétique est nulle.
 - La transformation mutuelle des énergies stipule que toutes les énergies sont égales.
 - Un poisson dans l'eau de mer, possède une énergie potentielle de pesanteur négative par rapport au fond de la mer et positive par rapport à la surface supérieure de la mer.
 - Les électrons, par rapport au centre du noyau d'un atome, possèdent une énergie potentielle.
 - L'énergie mécanique s'exprime en kilogramme.
- Choisir la bonne réponse
 - L'énergie potentielle de pesanteur a pour expression :
 - $E_{PP} = \pm mgh$
 - $E_{PP} = \frac{1}{2} mgh$
 - $E_{PP} = mgZ + \text{cste.}$
 - L'expression de l'énergie mécanique E d'un solide de masse m , situé à une altitude h , est :
 - $E = mgh$;
 - $E = - mgh$;
 - $E = \frac{1}{2} mV^2$
- Un système est dit conservatif, lorsque :
 - $\Delta E = \Delta E_p$;
 - $\Delta E + \Delta E_p = 0$;
 - $E_M = \text{cste.}$
- Un cylindre homogène de diamètre $d = 6,0$ cm et de hauteur $h = 15$ cm a un poids $P = 11,0 \cdot 10^3$ N. On prend comme niveau de référence, la surface horizontale sur laquelle il repose. L'énergie potentielle du cylindre :
 - Lorsqu'il est couché sur le plan est :
 - 0,33 kJ ;
 - 0,66 kJ ;

(c) 1,20 kJ.

5.4.2. Lorsqu'il est debout :

- 0 kJ ;
- 0,495 kJ ;
- 1,65 kJ.

5.5. Pour un système non conservatif, la variation de l'énergie mécanique est :

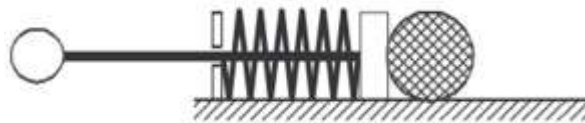
- Nulle ;
- Égale à la quantité de chaleur dégagée par la force motrice ;
- À la somme algébrique des travaux de toutes les forces.

5.6. La distance de freinage d'un véhicule dépend :

- De l'état de la route
- De la vitesse du véhicule
- De l'état de la route et de la vitesse du véhicule.

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

- Soit le système ci-dessous formé par un ressort de Flipper (raideur 50 N.m^{-1}) comprimé de 10 cm et par une bille de masse 150 g. Calculer la vitesse de la bille, en supposant le mouvement horizontal.



- Un cycliste de masse $M = 80$ kg, aborde à la vitesse de 30 km.h^{-1} , une descente de pente 8% et de longueur 300 m.

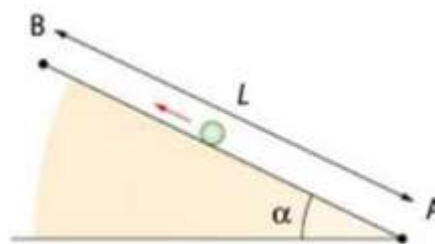
Quelle vitesse atteint-il en bas de la descente s'il ne freine pas ?

Le niveau de référence sera pris en bas de la pente.

Prendre $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$

**3. Fête foraine**

Un jeu de fête foraine consiste à envoyer le plus loin possible un objet de masse m sur un plan incliné.



Données : $\alpha = 20^\circ$; $L = AB = 5,0 \text{ m}$; $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$.

- Donner les expressions littérales des altitudes en A et B, Z_A et Z_B (on précisera l'origine des amplitudes choisies) en fonction de L et Z .
 - On suppose que l'objet s'arrête au point B. Écrire les expressions littérales de l'énergie mécanique

de l'objet en A et en B en fonction de m , L , g , α et V_A (vitesse de l'objet au point A).

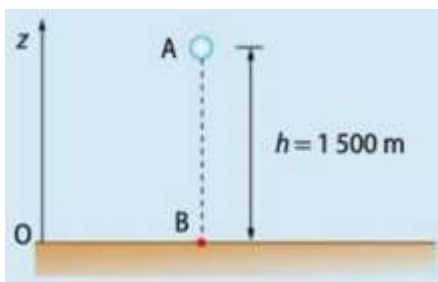
3.2. On suppose que le mouvement de l'objet se fait sans frottements.

3.2.1. Donner l'expression littérale de la vitesse minimale à laquelle il faut lancer cet objet depuis A pour qu'il atteigne le point B en fonction de g , L et α .

3.2.2. Calculer cette vitesse en m.s^{-1} et en km.h^{-1} .

4. Grêlon

Un grêlon de masse $m = 13,0 \text{ g}$ chute depuis la position A, sans vitesse initiale. Au point O, $E_{\text{pp}} = 0 \text{ J}$.



4.1. Calculer l'énergie mécanique de ce grêlon au début de sa chute au point A.

4.2. On suppose que le grêlon n'est soumis à aucun frottement.

4.2.1. Quelle est la valeur de son énergie mécanique au moment où il touche le sol en B ?

4.2.2. Dédire de la question précédente, la vitesse (en km.h^{-1}) atteinte par le grêlon en B. Commenter ce résultat.

4.3. En réalité, le grêlon touche le sol avec une vitesse $V = 160 \text{ km.h}^{-1}$. Comment expliquer la différence avec le calcul précédent ?

5. Le pendule simple

Considérons le pendule du professeur Tournesol des albums de Tintin. On l'incline d'un angle α_A par rapport à la verticale et on le lance à la vitesse $V_A = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$. Il arrive en B avec une vitesse nulle.

Données :

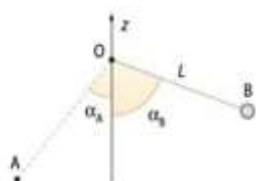
Longueur du pendule : $L = 20 \text{ cm}$.

$\alpha_A = 30^\circ$;

$g = 9,81 \text{ kg.N}^{-1}$.

Les frottements sont négligeables.

Au point O, $E_{\text{pp}}(O) = 0 \text{ J}$.



5.1. (a) Déterminer l'expression des altitudes en A et B, Z_A et Z_B , en fonction de L respectivement α_A et α_B .

(b) En déduire les expressions des énergies potentielles de pesanteur en A et B.

5.2. (a) Donner les expressions des énergies mécaniques du pendule en A et B.

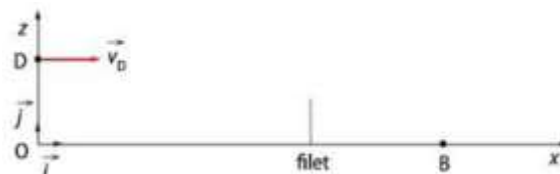
(b) En déduire l'expression de l'angle maximum α_B atteint par le pendule. Calculer sa valeur.

6. Service de tennis

On étudie le service au tennis d'un joueur placé en point O. Ce joueur souhaite que la balle frappe le sol en B. Pour cela, il la lance verticalement et la frappe avec sa raquette en un point D situé sur la verticale de O à la hauteur $H = 2,20 \text{ m}$. La balle part alors de D avec une

vitesse de valeur $V_D = 126 \text{ km.h}^{-1}$, horizontale comme le montre le schéma ci-dessous.

La balle de masse $m = 50,00 \text{ g}$, sera considérée comme ponctuelle et on considérera que l'action de l'air sur la balle est négligeable.



L'origine O de l'axe (Oz) verticale est prise telle que $E_{\text{pp}}(B) = 0 \text{ J}$. Prendre $g = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$.

6.1. Donner l'expression littérale de l'énergie potentielle de pesanteur de la balle en D, $E_{\text{pp}}(D)$. Calculer sa valeur.

6.2. Quelle est l'expression de l'énergie cinétique de la balle lorsqu'elle part de D ? Lorsqu'elle arrive en B ? Indiquer les unités dans le système international.

6.3. Écrire les expressions de l'énergie mécanique de la balle en D, et de la balle en B.

6.4. Quelle est la relation entre $E_M(D)$ et $E_M(B)$?

6.5. Dédire de la question 6.4, l'expression de la vitesse V_B de la balle lorsqu'elle frappe le sol. Calculer sa valeur.

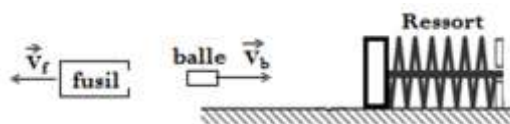
Extrait : Bac, Nov. 2009, Amérique du Sud

7. Parcours d'une balle de fusil dans milieu élastique

On tire une balle de fusil de masse $50,0 \text{ g}$ à l'aide d'un fusil de masse 60 kg .

7.1. Après le tir, déterminer la vitesse V_b de la balle de fusil si la vitesse de recul du fusil est de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$.

7.2. À 100 m de son parcours, la balle de fusil rencontre la surface rectangulaire (de côté $15 \text{ cm} \times 13,50 \text{ cm}$) d'un ressort horizontal au repos, de longueur à vide $\ell_0 = 1 \text{ m}$.



7.2.1. La déformation longitudinale δ du ressort après contact avec la balle est de 40 cm . Déterminer le raccourcissement ℓ du ressort.

7.2.2. En déduire la déformation unitaire du ressort ϵ .

7.3. Déterminer la contrainte σ du ressort si la constante d'Young est de 100 Pa .

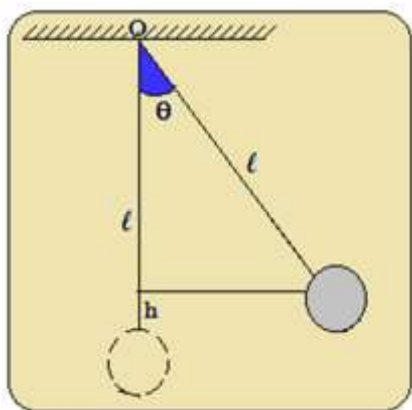
7.4. Calculer l'intensité de la force motrice de la balle avant la compression du ressort (on supposera que la vitesse de contact de la balle avec le rectangle est nulle).

7.5. Déterminer (par deux méthodes différentes) la vitesse de recul du ressort.

Données : $k = 25 \text{ N.m}^{-1}$.

8. Énergie potentielle et pendule simple

On considère le pendule simple de longueur $l = 50 \text{ cm}$, sur lequel est accrochée, sur l'extrémité libre, une bille de masse $m = 50 \text{ kg}$.



Dans cette figure, h représente l'altitude.

- (7) Exprimer l'altitude h du centre de masse G de la bille en fonction de l et θ .
- (8) En déduire l'expression de l'énergie potentielle en fonction de m , g , l et θ .
- (9) Faire un application numérique et tracer point par point, le graphique donnant l'énergie potentielle en fonction de θ , en calculant numériquement les valeurs de l'énergie potentielle pour dix valeurs de θ choisis entre $-\pi$ et π radian.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Étude expérimentale 1

« Une tartine tombe toujours du côté beurré et un chat retombe toujours sur ses pattes ; que se passe-t-il si on beurre le dos d'un chat ? !! ! »



Pour vérifier cette contradiction, nous étudions la chute d'un chat de **5,0 kg** d'un arbre, sans vitesse initiale.

L'enregistrement, toutes les **150 ms**, de la position de son centre de gravité est donné ci-dessous (**1cm** sur le schéma correspond **0,50 m** en réalité).

0 1 2 3 4 5 6

(Prendre cette représentation de manière verticale)

La référence de l'énergie potentielle de pesanteur est au niveau du sol (passant par la position 6).

1. Rappeler l'expression de l'énergie cinétique E_c en explicitant chaque terme avec son unité.
2. Rappeler l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur du chat E_{pp} en explicitant chaque terme et son unité.
3. Déterminer les valeurs V_2 et V_5 des vitesses du chat aux points 2 et 5.
4. En déduire les énergies cinétiques du chat en ces positions.
5. Déterminer les énergies potentielles de pesanteur du chat en ces deux positions.
6. En déduire les énergies mécaniques du chat en ces deux positions et conclure.

7. Expliquer ce qui s'est passé lors de la chute d'un point de vue énergétique.

Situation 2 : Étude expérimentale 2

Une plongeuse de 60 kg réalise en saut en tremplin en piscine. On a effectué des mesures qui ont permis de représenter (figure ci-dessous) les évolutions au cours du temps de l'énergie cinétique du centre de gravité de la plongeuse, de l'énergie potentielle et de l'énergie mécanique.

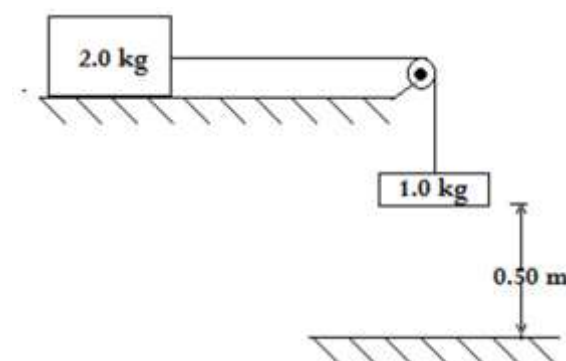
La référence de l'énergie potentielle de pesanteur a été prise au niveau de la surface de l'eau.



1. Attribuer à chaque courbe, en justifiant, l'énergie dont elle représente les variations.
2. Quel type de chute a effectué la plongeuse ?
3. À partir des courbes, déterminer :
 - 3.1. À quelle hauteur H est le plongeur par rapport à la surface de l'eau.
 - 3.2. La vitesse V_{eau} de la plongeuse (en km.h^{-1}) au moment où son centre de gravité est au niveau de la surface de l'eau.

Situation 3 : Combined system

In the diagram below, a 1.0-kilogram mass falls a vertical distance of 0.50 meter, causing a 2.0-kilogram mass to slide the same distance along a tabletop.



Choose the correct answer.

What is the total work done by the following mass?

- | | |
|-----------|------------|
| (1) 1.5 J | (3) 240 J |
| (2) 4.9 J | (4) 480 J. |



Leçon 7

NOTION DE QUANTITÉ DE CHALEUR



ACTIVITÉS

Activité

Pour préparer un thé vert à la menthe, on souhaite faire bouillir un volume V d'eau dans une théière en fonte.

Le gaz de ville, principalement constitué de méthane, est le combustible utilisé. L'énergie libérée par la combustion du gaz sert à chauffer l'eau et la théière.

- Quel nom-t-on à l'énergie libérée ?
- Quel mode de transfert d'énergie a-t-on mis en évidence ici ?



Objectifs

- Expliquer chaque mode de transfert d'énergie
- Montrer que la chaleur est une forme d'énergie
- Mesurer les quantités de chaleur échangées
- Énoncer et appliquer le principe des échanges de chaleur.
- Déterminer expérimentalement les capacités thermiques massiques de solides et de liquides.

1. Généralité

- Les **échangeurs** de chaleur sont des dispositifs qui assurent l'échange de chaleur entre deux fluides à des températures différentes sans qu'ils soient mélangés.
- En physique, un corps possède de l'énergie s'il est capable de fournir un travail au milieu extérieur.
- On appelle **travail**, le mode de transfert d'énergie qui s'effectue macroscopiquement de manière ordonnée.
- Lorsqu'un corps fournit du travail au milieu extérieur, son énergie **diminue** et dans le cas contraire, elle **augmente**.

2. Les formes d'énergie et leur(s) source(s)a) Énergie mécanique E_M

Il existe trois formes d'énergie mécanique :

- ♦ **L'énergie potentielle de pesanteur E_{PP}** : C'est l'énergie que possède un corps soumis à la seule action de son poids.

Exemple

Chute libre d'un corps.

- ♦ **L'énergie potentielle élastique E_{Pe}** : C'est l'énergie que possède un corps capable de se déformer.

Exemple

Le ressort ; un arc tendu ; un fil de torsion ; etc.



- ♦ **L'énergie cinétique E_c** : C'est l'énergie que possède un corps à cause de sa vitesse dans son mouvement.

Exemple

Voiture défonçant un mur lors d'un accident ; choc élastique ou mou.

NB : L'énergie mécanique E_M d'un système, est la somme algébrique des énergies potentielle et cinétiques :

$$E_M = E_{pp} + E_{pe} + E_c \quad (7.1)$$

b) L'énergie électrique

C'est l'énergie produit par un générateur (pile, alternateur, dynamo ou génératrice, accumulateur,...). Cette énergie permet de faire fonctionner des équipements (appareils électriques) tels que des lampes à incandescence, des moteurs électriques, etc.

c) Énergie calorifique ou thermique

C'est la transformation partielle de la chaleur en travail. Cas du moteur thermique à combustion interne.

d) Énergie rayonnante

C'est par exemple l'énergie fournie par le soleil.

e) Énergie chimique

C'est l'énergie produite lors des transformations chimiques.

Exemple

Les combustibles dans les réactions de combustion vive (exothermique).
Combustible + comburant → Produit + **chaleur**.

Remarque

Un **comburant** est un corps qui provoque la combustion d'un autre corps.

f) Énergie nucléaire

C'est l'énergie produite au cours des réactions nucléaires i.e. celles qui affectent les noyaux des atomes.

Remarque

Les modes de transfert d'énergie sont :

- ✍ La chaleur : C'est le mode de transfert d'énergie qui s'effectue microscopiquement par chocs et de manière désordonnée.
- ✍ La conduction et convection thermiques
- ✍ Le rayonnement : C'est le mode de transfert microscopique dû à la réception ou l'émission des rayons lumineux. Il s'effectue microscopiquement de manière désordonnée.
- ✍ Le travail : C'est le mode de transfert d'énergie qui s'effectue macroscopiquement de manière ordonnée. Il peut être mécanique ou électrique.

3. La notion de chaleur

3.1. Les sources de chaleur

Les sources de chaleur sont nombreuses et variées. Nous pouvons citer :

- Les **combustions vives** (réactions chimiques)

Exemple

- Combustion du bois ou du charbon de bois
- Combustion du pétrole et dérivés : pétrole lampant, butane, essence, kérosène, gasoil, etc.

- Le **courant électrique** : L'effet calorifique transforme l'énergie électrique en chaleur.

Exemple

ALUCAM (Édéa). Température au bord des cuves d'électrolyse **1000°C** pour produire de l'aluminium à partir de l'alumine ce qui nécessite des courants électriques très intenses.

- Le **rayonnement solaire**...



3.2. Les modes de transfert de chaleur

(a) Mise en évidence de la chaleur

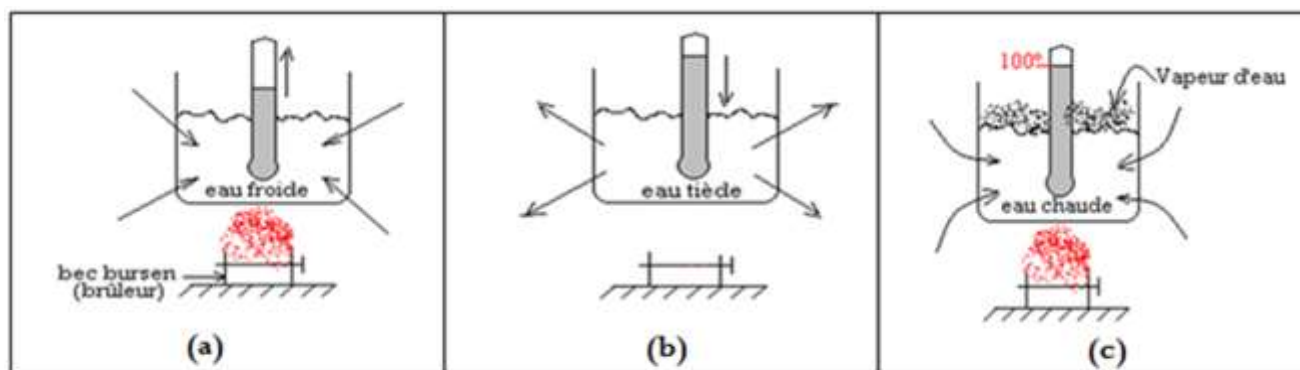


Figure 7.1 : Les états de l'eau

• Expérience 1

- On chauffe de l'eau placée dans un bocal à l'aide d'un **bec bunsen**. Comme le montre la figure 7.1 (a) ci-dessus.
- L'eau s'échauffe car la température augmente dans le thermomètre.

Conclusion 1

L'eau s'échauffant, reçoit de la chaleur du milieu extérieur (**feu**).

- On éteint le brûleur. Figure 7.1 (b).
- L'eau se refroidit car la température diminue dans le thermomètre.

Conclusion 2

L'eau en se refroidissant cède de la chaleur au milieu extérieur.

• Expérience 2

Chauffons l'eau jusqu'à ébullition (**100°C**). Elle se vaporise et sa température reste **constante** jusqu'à la fin de l'ébullition. Figure 7.1 (c).

Conclusion 3

Lorsque l'eau change d'état physique (**liquide à gaz**), sa température reste constante. On parle de transformation isotherme.

- Conclusion (récapitulatif)

Un corps qui reçoit ou cède de la chaleur subit :

- ♦ Soit une variation de température sans changement d'état (a) et (b),
- ♦ Soit un changement d'état sans variation de température (c).

(b) Chaleur et travail

- ♦ Un cycliste sur une pente désire garder **constante** sa vitesse. Il est nécessaire pour lui de **freiner** ce qui crée des **frottements** au niveau des pneus et donc apparition de la **chaleur** :
Freinage (**travail**) → frottements (**chaleur**).
- ♦ Fonctionnement d'un moteur à explosion à 4 temps :
Combustion au 3^e temps (**chaleur**) → rotation de l'arbre moteur au 4^e temps (**travail**).

- Récapitulatif 1

- ♦ Chaleur et travail se transforment mutuellement.
- ♦ La transformation totale du travail en chaleur est possible mais celle de la chaleur en travail est **impossible** d'où la **notion de rendement dans les machines**.
- ♦ Lorsqu'un système fournit du travail au milieu extérieur, son énergie diminue et dans le cas contraire, son énergie augmente.
- ♦ Travail et chaleur se transforment mutuellement.

- Récapitulatif 2

Chaleur et travail sont deux **modes de transfert** d'énergie entre un système et son milieu extérieur.

(c) Les transferts de chaleur

- Propagation par conduction

Lorsque deux corps sont en contact, la chaleur se propage du corps de température la plus élevée (**corps chaud**) vers celui de plus basse température (**corps froid**). Ceci jusqu'à ce que leur température soit égale : C'est **l'équilibre thermique**.

NB

Le temps mis pour atteindre l'équilibre thermique dépend de la nature des corps en contact :

- **Rapidité** : les bons conducteurs thermiques (cas des métaux)
- **Lenteur** : isolants ou mauvais conducteurs thermiques (cas des matières plastiques, bois sec, laine, etc.).

- Propagation par convection

La **convection** est le mouvement pris par un fluide dû aux différences de températures entre les différentes parties de ce fluide. Les parties chaudes (**masse volumique basse**) montent au-dessus et les parties froides (**masse volumique élevée**) descendent. Ceci crée dans le fluide le phénomène de **courant de convection**. Figure 7.2.

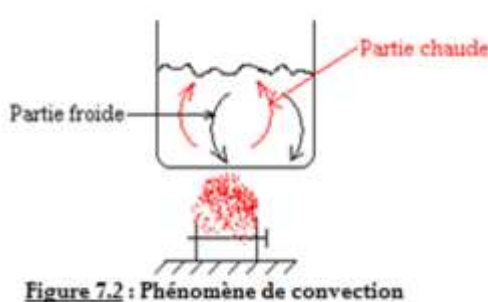
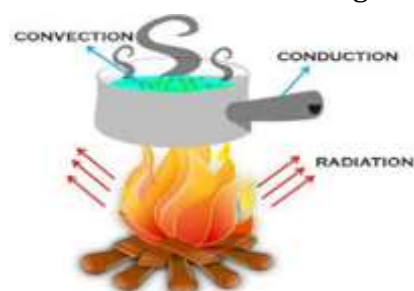
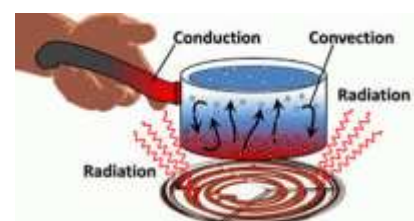


Figure 7.2 : Phénomène de convection



• Propagation par rayonnement

Exemple *chaleur..du..soleil* $\xrightarrow{\text{transfert..à..travers..le..cosmos}}$ *vide..interplanétaire* $\rightarrow$ *Terre*

Le transfert de chaleur par rayonnement ne fait pas intervenir l'agitation des particules.

4. Mesurage des quantités de chaleur

4.1. La calorimétrie

La calorimétrie est la partie de la **thermodynamique**⁽¹⁾ qui a pour objet, la mesure de la quantité de chaleur. Ce sont par exemple les quantités de chaleur nécessaires pour augmenter la température d'un corps, pour changer son état, ou encore les quantités de chaleur cédées par un corps qui refroidit (changement d'état physique des corps).

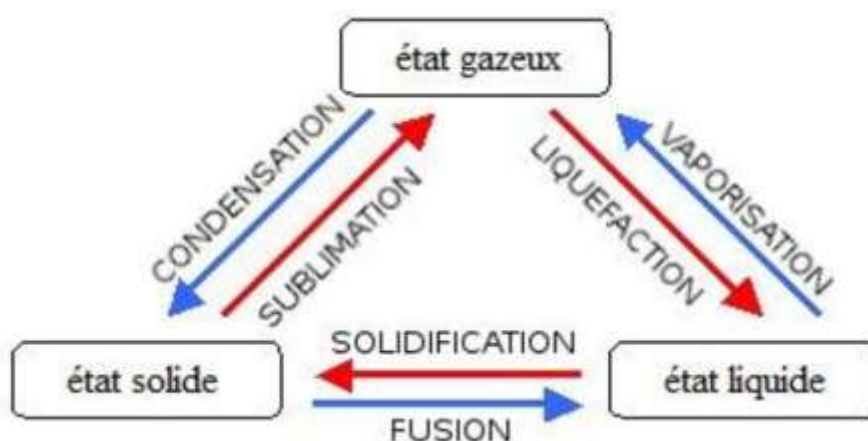


Figure 7.3 : Changement d'état physique de l'eau

4.2. Les types de calorimètres

- Le **calorimètre** est un appareil destiné à mesurer les quantités de chaleur (énergie calorifique, du latin calo = chaleur).
- Le calorimètre constitue un **système thermodynamique isolé**, ce qui implique qu'il n'y a pas d'échange de **matière** et d'**énergie (travail ou chaleur)** avec le milieu extérieur : c'est un **milieu adiabatique**. Cela ne signifie cependant pas qu'il n'y a pas des transferts de chaleur entre les différentes parties de l'ensemble calorimétrique (composés objets de l'étude, accessoires et paroi du calorimètre...)
- Comme calorimètre, on peut citer :
 - Le **calorimètre de réaction** (figure 7.4)
 - Le **calorimètre de Rumford**⁽²⁾ ;
 - Le **calorimètre de Lavoisier**⁽³⁾ (figure 7.5)
 - Le **calorimètre de Trewarson**⁽⁴⁾
 - Le **calorimètre de Berthelot** (figure 7.6)
 - Le **calorimètre de Dewar-d' Arsonval** (figure 7.7)



Figure 7.4 : Calorimètre de réaction



Figure 7.5 : Calorimètre à glace d'Antoine Lavoisier et Pierre Laplace en 1783

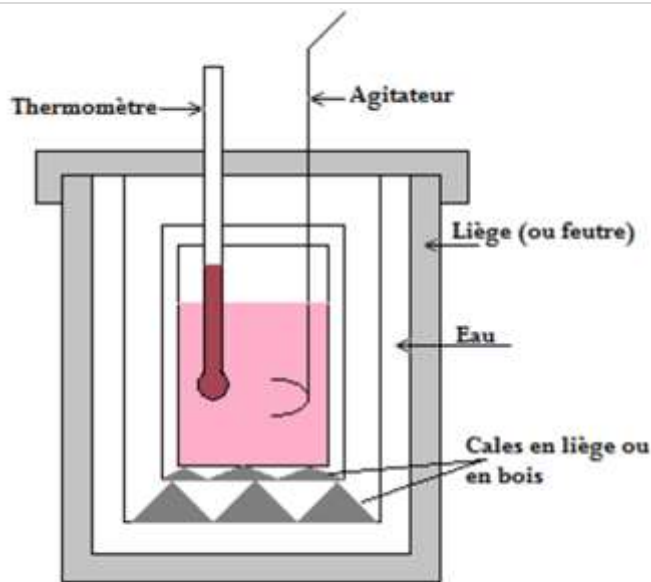


Figure 7.6 : Calorimètre de Berthelot

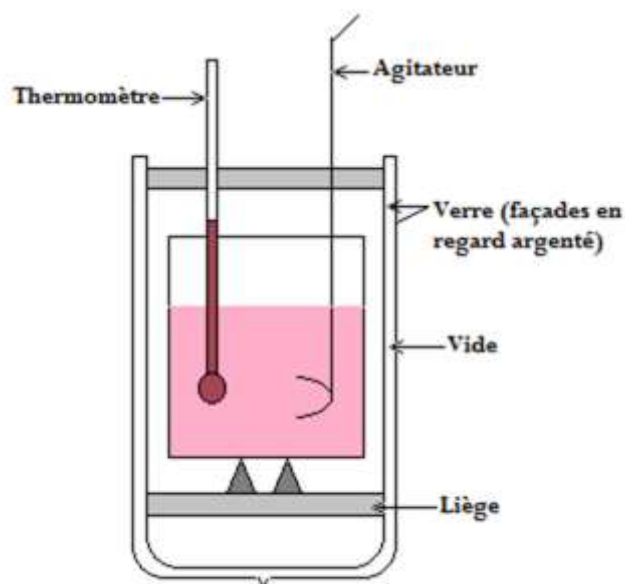


Figure 7.7 : Calorimètre de Dewar-d'Arsonval

4.3. Principe des échanges de chaleur

- On note Q , la quantité de chaleur reçue ou cédée et s'exprime en joules (J).
- Notons cependant que :
 - Si $Q > 0$, le système reçoit la chaleur du milieu extérieur
 - Si $Q < 0$, le système cède de la chaleur au milieu extérieur
 - Si $Q = 0$, il n'y a pas d'échange de chaleur.
- Énoncé du principe :

« Lorsque plusieurs corps sont en contact dans une enceinte adiabatique, la somme algébrique des quantités de chaleur échangées par ces corps pour atteindre l'équilibre thermique, est nulle :

$$\sum_{i=1}^n Q_i = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0 \quad (7.2)$$

»

Remarque

On utilise parfois comme unité d'énergie, la **calorie** (cal) : $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$.

5. Définition de la chaleur massique d'un corps

5.1. Notion de capacité calorifique

- La **chaleur massique** C (ou **capacité thermique massique**) d'un corps, représente la quantité de chaleur à fournir à 1 kg de ce corps pour élever sa température à 1°C (ou 1 K). Elle s'exprime en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ou $\text{J.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$.
- La **capacité calorifique** K , est liée à la chaleur massique C d'un corps de masse m par la relation :

$$K = m \times C \quad (7.3)$$

Unités : m (kg) ; C (J/kg/K ou $\text{J/kg/}^\circ\text{C}$) ; K (J.K^{-1} ou $\text{J.}^\circ\text{C}^{-1}$)

5.2. Valeur en eau du calorimètre

L'**équivalent en eau** (ou **valeur en eau**) d'un système de masse m et de capacité thermique C , est la masse d'eau μ échangeant la même quantité de chaleur avec l'extérieur quand il subit la même variation de température :

$$\mu = \frac{m \times C}{C_e} = \frac{K}{C_e} \quad (7.4)$$



Unités : m (kg) ; C (J/kg/K ou J/kg/°C) ; K (J/K ou J/°C) ; C_e (chaleur massique de l'eau) = 4190 J/kg/K.

Remarque

Dans certains manuels, C_e = 4180 J/kg/°C.

5.3. Chaleurs latentes de changement d'état

5.3.1. Chaleur latente de fusion L_f

- La **fusion** est le passage de l'eau de l'état solide à l'état liquide (fig. 7.3). Au cours de ce passage, il y a échange de chaleur.
- Chaleur latente de fusion L_f** : C'est la quantité de chaleur à fournir à 1kg du corps pris à sa température de fusion pour l'amener entièrement à l'état liquide à la même température et sous la même pression :

$$Q = m \cdot L_f \quad \text{où} \quad \begin{cases} - L_f \text{ en } J / kg \\ - m \text{ en } kg \\ - Q \text{ en } J \end{cases} \quad (7.5)$$

5.3.2. Chaleur latente de vaporisation L_v

- La **vaporisation** est le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux (fig. 7.3). Au cours ce passage, on assiste à un échange de chaleur.
- Chaleur latente de vaporisation L_v** : C'est la quantité de chaleur à fournir à 1kg d'un corps liquide pris à sa température de vaporisation sous une pression donnée pour l'amener entièrement à l'état vapeur à la même température et sous la même pression :

$$Q = m \cdot L_v \quad \text{où} \quad \begin{cases} - L_v \text{ en } J / kg \\ - m \text{ en } kg \\ - Q \text{ en } J \end{cases} \quad (7.6)$$

6. Expression de la quantité de chaleur échangée

Variation de température sans changement d'état :

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \theta_f : \text{température finale} \\ \theta_i : \text{température initiale} \end{cases} \quad \text{en } (^\circ\text{C}) \text{ ou en } (K) \quad (7.7)$$

$$Q = m \times C \times \Delta\theta = m \times C \times (\theta_f - \theta_i) \quad (7.8)$$

- En posant **K = m · C** (en J/°C ou J/K) la **capacité thermique** ou **calorifique** du corps, la relation (7.8) devient dans ce cas :

$$Q = K \times \Delta\theta \quad (7.9)$$

- Le calorimètre intervenant dans les échanges de chaleur ou thermiques, on tient donc compte de sa capacité calorifique que l'on note **K_c** et qui vaut :

$$K_c = \mu \times C_e \quad \text{où} \quad \begin{cases} \rightarrow \mu : \text{valeur en eau du calorimètre et ses accessoires (g)} \\ \rightarrow C_e : \text{chaleur massique de l'eau} = 4190 \text{ J/kg/K} \end{cases} \quad (7.9)$$

Exemple 1

Un calorimètre est constitué d'un vase en aluminium de masse 60 g, d'un agitateur en aluminium de masse 10 g et d'un thermomètre de capacité calorifique 20 J.°C⁻¹.



Sachant que la chaleur massique de l'aluminium vaut $900 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$:

- Déterminer la capacité calorifique du calorimètre
- En déduire sa valeur en eau.

Solution

Données : vase : $m_V = 60 \text{ g}$; agitateur : $m_a = 10 \text{ g}$; thermomètre : $K_{th} = 20 \text{ J.}^\circ\text{C}^{-1}$; $C_{Al} = 900 \text{ J/kg.K}$.

- Déterminons la capacité calorifique K_{cal} du calorimètre

Par définition, $K_{cal} = K_{Vase} + K_{agitateur} + K_{th} = m_V \times C_{Al} + m_a \times C_{Al} + K_{th}$ (car le vase et l'agitateur sont en aluminium), on a alors :

$$K_{cal} = (m_V + m_a) \times C_{Al} + K_{th}$$

AN : $K_{cal} = 83 \text{ J.K}^{-1}$.

- Déduisons-en la valeur en eau μ du calorimètre

On sait par définition que : $K_{cal} = \mu \times C_e \Rightarrow \mu = \frac{K_{cal}}{C_e}$

AN : $\mu = 0,02 \text{ kg} = 20 \text{ g}$.

Exemple 2

Quels volumes d'eau respectivement à 20°C et à 75°C faut-il mélanger pour obtenir dans une baignoire 100 litres d'eau à 37°C ?

Solution

Données :

- Eau 1 : $m_1 = \rho V_1$; $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$; $Q_1 = m_1 C_e \Delta\theta = \rho \times V_1 \times C_e \times (\theta_f - \theta_1)$ (*)
- Eau 2 : $m_2 = \rho V_2$; $\theta_2 = 75^\circ\text{C}$; $Q_2 = m_2 C_e \Delta\theta = \rho \times V_2 \times C_e \times (\theta_f - \theta_2)$ (2*)
- Eau finale : $V = V_1 + V_2 = 100 \text{ L}$ (3*) ; $\theta_f = 37^\circ\text{C}$.

Déterminons les volumes V_1 et V_2 .

En utilisant le principe des échanges de chaleur, on aura :

$$Q_1 + Q_2 = 0 \Rightarrow V_1 \times (\theta_f - \theta_1) = V_2 \times (\theta_2 - \theta_f)$$

$$\text{Soit } 17V_1 = 38V_2 \Rightarrow V_1 = 2,24 \times V_2$$

(4*)

(4*) Dans (3*), $3,24 \times V_2 = 100 \Rightarrow V_2 = 30,86 \text{ L}$ et $V_1 = 69,14 \text{ L}$.

Corps	c ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Corps	c ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
eau	$4,1855.10^3$	Aluminium	$0,92.10^3$
glace	$2,1.10^3$	Fer	$0,75.10^3$
eau vapeur	$1,9.10^3$	Air	1.10^3

Tableau 7.1 : Chaleur massique de quelques corps

7. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Chaleur	Heat
Calorimètre	Calorimeter
Capacité calorifique	Calorific capacity
Capacité thermique massique	Specific heat capacity

Sentence: When several bodies are in contact in an adiabatic enclosure, the algebraic sum of the quantities of heat exchanged by these bodies to reach thermal equilibrium, is null.

- (1) **Thermodynamique** : Discipline de la physique qui étudie l'énergie physique et les changements d'état de la matière.
- (2) **Rumford : Benjamin Thompson**, Comte de Rumford, physicien américain, fut le premier physicien à déterminer la puissance calorifique des combustibles.
- (3) Le calorimètre de Lavoisier Antoine est aussi appelé **calorimètre à glace de Lavoisier – Laplace**.
- (4) Le calorimètre de Trewarson est aussi appelé **Fire Propagation Apparatus (FPA)**

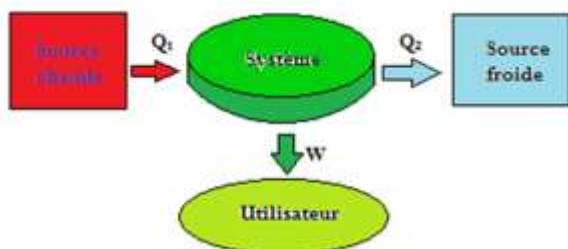


Exercices de la leçon 7 : NOTION DE QUANTITÉ DE CHALEUR

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES RESSOURCES

- Définir : chaleur ; chaleur latente ; calorimétrie ; thermodynamique ; travail.
- Énoncer le principe des échanges de chaleur.
- Expliquer en quelques mots, les phénomènes de conduction et de convection.
- Expliquer, par un phénomène, la transformation mutuelle du travail en chaleur et de la chaleur en travail.
- Énumérer les sources de chaleur.
- Énumérer les modes de transfert d'énergie.
- Énumérer quelques exemples d'enceintes adiabatiques.
- Comment peut-on réaliser un transfert d'énergie par chaleur ?
- Vrai ou faux
1. La chaleur ne peut se propager que lorsqu'il y a contact entre des corps.
2. La quantité de chaleur est une grandeur algébrique.
3. Le thermomètre est une enceinte adiabatique.
4. Lorsqu'un corps cède de la chaleur au milieu extérieur, son énergie augmente.
5. Le thermomètre de Lavoisier est aussi appelé thermomètre FPA.
6. Le thermomètre de Lavoisier est l'un des plus anciens thermomètres de l'histoire des calorimètres.
7. Le thermos est un exemple de calorimètre.
8. Le bouloir est une enceinte adiabatique.
9. Une poêle placée au feu, est le siège des phénomènes de conduction et de convection.
10. Tout objet, placé au feu est le siège d'un phénomène de conduction.
11. Le fer chauffé, est le siège du phénomène de conduction.
12. Le bois chauffé est le siège du phénomène de convection.
10. Choisir la bonne réponse
- 10.1. Sur le schéma suivant, les flèches indiquent les sens effectifs des transferts d'énergie par chaleur et travail. Pour le système étudié, en considérant les quantités d'énergie algébriquement reçues, on peut affirmer que :



- $Q_1 < 0, Q_2 > 0$ et $W > 0$
- $Q_1 > 0, Q_2 < 0$ et $W < 0$
- $Q_1 > 0, Q_2 < 0$ et $W > 0$

10.2. La capacité thermique massique de l'eau est : $C_{\text{eau}} = 4,182 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. Pour que la température de 100 mL d'eau passe de 20 à 21 °C, il faut fournir une quantité d'énergie de :

- 41,82 kJ.
- 418,2 J.
- 8,782 kJ.

10.3. Un corps quitte de 27° C à 243,03 K. Ce corps est :

- Chaud
- Froid
- Tiède

10.4. Un corps chaud a une température

- Nulle
- Inférieure à zéro
- Supérieure à zéro

10.5. En chimie, la chaleur latente molaire L_M est donnée par la relation : $Q = n \times L_M$ où n est le nombre de moles et Q la quantité de chaleur échangée. Dans ce cas, L_M s'exprime en :

- mol.J^{-1} ;
- mol.J ;
- J.mol^{-1} .

10.6. On fait 0,8 kg chauffer le fer de masse atomique 55,8 g.mol^{-1} dans un calorimètre de quantité de chaleur égale à 275,31 J. La chaleur latente molaire du fer sera alors égale à :

- 19,2 mol.J^{-1} ;
- 19,2 mol.J ;
- 19,2 J.mol^{-1} .

10.7. La relation entre la valeur en eau μ , la capacité thermique K et la chaleur massique C d'un corps est :

- $K = \mu / C$;
- $C = \mu \times K$
- $K = C \times \mu$.

10.8. La variation de température $\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$ est aussi :

- Dilatation linéaire
- Incertitude absolue
- Incertitude relative.

10.9. La relation entre la quantité de chaleur Q , la capacité calorifique K et la variation de température $\Delta\theta$ est donnée par :

- $K = \Delta\theta \times Q$.
- $\Delta\theta = K \times Q$.
- $Q = K \times \Delta\theta$.

10.10. Un corps qui reçoit de la chaleur du milieu extérieur, voit sa température :

- Augmenter
- Diminuer
- Rester constante.

Conseil

Avant d'appliquer la relation $\Sigma Q = 0$, faire le bilan complet de tous les corps qui participent aux échanges de chaleur, et noter pour chacun d'eux, la température initiale et la température finale, i.e. la température lorsque l'équilibre thermique est atteint.

On prendra comme chaleur massique de l'eau :

$$C_{\text{eau}} = 4190 \text{ J/kg.K.}$$

**EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIRS**

- Calculer la quantité de chaleur (en J, kJ, kWh) nécessaire pour élever la température de 300 L d'eau de 20 à 100°C.
Rappel : 1 kWh → 3600 kJ.
 - Un calorimètre contient une masse $m_1 = 250$ g d'eau. La température initiale de l'ensemble est $\theta_1 = 18^\circ\text{C}$. On ajoute une masse $m_2 = 300$ g d'eau à la température $\theta_2 = 80^\circ\text{C}$.
 - Quelle serait la température θ_e d'équilibre thermique de l'ensemble si la capacité thermique du calorimètre et des accessoires était négligeable ?
 - On mesure en fait une température d'équilibre thermique $\theta_e = 50^\circ\text{C}$. Déterminer la capacité thermique K du calorimètre et de ses accessoires.
- Données : masse volumique de l'eau $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$.
- On sort un bloc de plomb de masse $m_1 = 280$ g d'une étuve à la température $\theta_1 = 98^\circ\text{C}$. On le plonge dans un calorimètre de capacité thermique $K = 209 \text{ J.K}^{-1}$ contenant une masse $m_2 = 350$ g d'eau. L'ensemble est à la température initiale $\theta_2 = 16^\circ\text{C}$. On mesure la température d'équilibre thermique et on trouve $\theta_e = 17,7^\circ\text{C}$.
Déterminer la chaleur massique C_{Pb} du plomb.
 - Détermination de la valeur en eau et de la chaleur massique.**
 - Un calorimètre contient 200 g d'eau à la température de 25,3 °C. On y verse 300 g d'eau à la température de 17,7 °C. On observe que la température du mélange se stabilise à 20,9°C. Calculer la valeur en eau du calorimètre.
 - Le calorimètre contient maintenant 500 g d'eau à 20,9 °C. On y plonge un bloc de fer de masse 1 kg, ayant été longtemps maintenu dans un congélateur à - 18°C. La température finale s'établit à 14,2°C.
Calculer la chaleur massique du fer.
 - Dans un calorimètre de capacité calorifique $K = 100 \text{ J.K}^{-1}$, contenant 250 g d'eau, on introduit 30 g de chlorure de calcium (CaCl_2). La dissolution dans l'eau de ce composé ionique est très exothermique. Sa chaleur molaire de dissolution, i.e. la quantité de chaleur dégagée au cours de la dissolution d'une mole de chlorure de calcium, est 15 kJ.mol^{-1} .
Déterminer l'élévation de température du calorimètre dans l'expérience précédente. On prendra comme chaleur massique du mélange, celle de l'eau. $M(\text{Ca}) = 40 \text{ g.mol}^{-1}$; $M(\text{Cl}) = 35,5 \text{ g.mol}^{-1}$.
 - Aciérie électrique**
Dans une aciérie électrique, l'acier est obtenu par refus de ferraille.
 - Déterminer en J, puis en kWh, la quantité d'énergie nécessaire pour porter une tonne de ferraille de 15°C à sa température de fusion de 1535 °C.
 - Déterminer la quantité d'énergie nécessaire en J, puis en kWh, pour fondre une tonne de ferraille à cette température.
 - En déduire la quantité d'énergie minimale nécessaire pour produire une tonne d'acier, en kWh.
- Données : $C_{\text{Fe}} = 460 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$; $L_f(\text{Fe}) = 207 \text{ kJ/kg}$.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES**Situation 1 : Exploitation de l'effet Joule**

Un chauffe-eau électrique a une puissance de 2400 W, il est alimenté sous une tension de 220 V et a une capacité de 200 L.

- Calculer en combien de temps cet appareil portera les 200 litres de 15 à 65 °C en supposant qu'il n'y a pas de perte de chaleur.
- Calculer la valeur de la résistance de l'appareil et l'intensité qui le traverse.

Situation 2 : État d'un système

Un morceau de fer de masse $m_1 = 500$ g est sorti d'un congélateur à la température $\theta_1 = -30^\circ\text{C}$. Il est plongé dans un calorimètre, de capacité thermique négligeable, contenant une masse $m_2 = 200$ g d'eau à la température initiale $\theta_2 = 4^\circ\text{C}$.

Déterminer l'état final d'équilibre du système (température finale, masse des différents corps présents dans le calorimètre)

Données

Chaleur massique de l'eau : $C_{\text{eau}} = 4185 \text{ J/kg/K}$.

Chaleur massique de la glace : $C_g = 2090 \text{ J/kg/K}$.

Chaleur massique du fer : $C_{\text{Fe}} = 460 \text{ J/kg/K}$.

Chaleur latente de fusion de la glace : $L_f = 3,34.10^2 \text{ kJ/kg}$.

Situation 3 : Fusion d'un glaçon

Un calorimètre de capacité thermique $k = 150 \text{ J.K}^{-1}$ contient une masse $m_1 = 200$ g d'eau à la température initiale $\theta_1 = 70^\circ\text{C}$. On y place un glaçon de masse $m_2 = 80$ g sortant du congélateur à la température $\theta_2 = -23^\circ\text{C}$.

Déterminer l'état d'équilibre du système (température finale, masse des différents corps présents dans le calorimètre).

Données

Chaleur massique de l'eau : $C_e = 4190 \text{ J/kg/K}$

Chaleur massique de la glace : $C_g = 2090 \text{ J/kg/K}$

Chaleur latente de fusion de la glace : $L_f = 3,34.10^5 \text{ J/kg}$

Situation 4 : Température d'un four

Pour déterminer la température d'un four, on procède comme suit : on y place un morceau de fer de masse 22,3 g et quand il a pris la température du four, on le plonge rapidement dans un calorimètre contenant 450 g d'eau à 15°C. La température de l'eau s'élève jusqu'à 22,5°C.

- Quelle est la température du four si la chaleur massique du fer est $480 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$?
- Dans cette détermination, on a pas tenu compte de la capacité thermique du calorimètre qui vaut en réalité $84 \text{ J.}^\circ\text{C}^{-1}$. Y a-t-il lieu de corriger les résultats ?
- Pour déterminer la chaleur massique d'un liquide, on remplace l'eau du calorimètre par 100 g de ce liquide à la température de 15°C. Le même morceau de fer, préalablement porté à 100°C, est plongé dans le liquide dont la température s'élève à 19,1°C. Quelle est la chaleur massique du liquide ?



EXERCICES DE SYNTHÈSE DU MODULE 2

Exercice 1 : Transformation Travail → Chaleur

Une boule de plomb, de masse 1 kg, tombe en chute libre en un lieu où $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$. Au bout de 18 m, elle est arrêtée par un obstacle.

1. En supposant le travail de la pesanteur entièrement transformé en chaleur, calculer la quantité de chaleur dégagée au cours du choc.
2. Si cette chaleur serait uniquement à échauffer la boule, quelle serait l'élévation de température subie ? On donne : chaleur massique du plomb : 130 J/kg.K .

Exercice 2 : Détermination du volume

On désire obtenir un bain d'eau tiède à 37°C , d'un volume total $V = 250$ litres. Le robinet d'eau chaude délivre de l'eau à 70°C , tandis que le robinet d'eau froide délivre de l'eau à 15°C . Déterminer le volume V_1 d'eau chaude et le volume V_2 d'eau froide qu'il faut mélanger pour cela. Données

Chaleur massique de l'eau : $c_e = 4185 \text{ J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$
Masse volumique de l'eau : $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$.

Exercice 3 : Mouvement de rotation

Dans un repère cartésien dont les axes sont portés par les vecteurs $\vec{i}$ et $\vec{j}$, on a repéré le mouvement d'un solide (S), à la position M, par rapport à l'origine O des axes par :

$$\overrightarrow{OM} \begin{cases} x(t) = 4 \cos \omega t + 1 \\ y(t) = 4 \sin \omega t - 3 \end{cases}$$

1. Montrer que la trajectoire de (S) est un cercle.
2. Déterminer toutes les caractéristiques de ce cercle (rayon et centre)
3. Quel serait le module du vecteur vitesse $\vec{v}$ à l'origine des axes ? On prendra $\omega = 2\pi \text{ rad.s}^{-1}$. On rappelle que la vitesse est la dérivée première de la position.
4. Évaluer, les énergies cinétique, potentielle et mécanique correspondantes. La référence des énergies potentielles est à l'origine du repère. La masse du solide est de 5 kg
5. En déduire, à $t = 3\text{s}$, la puissance instantanée d'une force constante de module 7 N, faisant avec la trajectoire, un angle α .

Exercice 4 : Puissance mécanique

Calculer la puissance mécanique P_m nécessaire pour remonter en 5 minutes, à vitesse constante, une masse $m = 200 \text{ kg}$ d'une hauteur $h = 40 \text{ cm}$. On donne : $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$.

Exercice 5 : Élasticité d'un ressort

Un ressort de raideur $k = 600 \text{ N/m}$ est horizontal et porte à une de ses extrémités un cube de masse $M = 200 \text{ g}$ et d'arrêt $a = 10 \text{ cm}$. Le cube peut glisser sur un plancher horizontal considéré comme niveau de référence des potentiels de pesanteur.

On donne $g = 10 \text{ N/kg}$

1. Le système ressort solide est libre et en équilibre. Représenter les forces appliquées au cube. Calculer l'énergie potentielle de pesanteur du cube, l'énergie potentielle élastique du ressort et en déduire l'énergie mécanique du système.

2. On déplace le cube vers la droite. Le ressort s'allonge alors de 5 cm. Calculer l'énergie potentielle du système à cette position où il est maintenu.

Dans le cas d'un système conservatif, on donne la relation entre la variation de l'énergie cinétique et la variation de l'énergie potentielle.

Exercice 6 : Mode expert

Pour obtenir des œufs à la coque, avec un blanc bien cuit et un jaune parfaitement coulant, l'eau de cuisson doit idéalement être à une température de 65°C .

1. Quelle doit être l'énergie thermique transférée à 2,0 litres d'eau initialement à une température de 20°C pour qu'elle atteigne la température idéale de cuisson ?
2. Toto dispose de 2,0 litres d'eau froide (température ambiante 20°C) et de 5 Litres d'eau juste bouillante, mais il n'a pas d'autre système de chauffage. Il propose de mélanger l'eau froide et l'eau bouillante pour obtenir la bonne température. Est-ce possible ? Si oui, quel volume d'eau bouillante doit-il ajouter à l'eau froide pour atteindre la température idéale ?
3. Les œufs étant cuits à point, Toto souhaite refroidir rapidement l'eau de cuisson. Il ajoute 10 glaçons juste fondants (en cubes de 1,6 cm de côté). Quelle sera la température de l'eau lorsque l'équilibre thermique sera atteint ?
4. Faire la liste des sources d'erreur ou d'approximations de cet exercice.

Données

Densité de la glace : 0,92

Masses molaires atomiques (g.mol^{-1}) : H : 1,0 ; O : 16,0

Chaleur latente (énergie molaire) de fusion de l'eau : $6,01 \text{ kJ.mol}^{-1}$

Capacité thermique massique de l'eau à l'état liquide : $4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$.

Exercice 7 : Transfert d'énergie par l'étain



L'étain (Sn) est un métal employé pour la soudure des métaux. On souhaite déterminer l'énergie massique de fusion de l'étain.

Dans un calorimètre contenant 150 g d'eau à 20,0 °C, on verse 36 g d'étain fondu à la température de 231,9 °C.

L'étain solidifie rapidement. On mélange jusqu'à l'équilibre thermique, qui est atteint pour une température de 70,0 °C.

1. Calculer l'énergie thermique nécessaire pour faire passer l'eau de 20,0 °C à 70,0 °C
2. Calculer de même l'énergie perdue par l'étain solide en passant de 231,9 °C à 70,0 °C.
3. Donner l'expression du principe de conservation de l'énergie dans cette situation. En déduire l'énergie reçue par l'étain au cours de sa solidification.
4. Donner l'expression de l'énergie de changement d'état d'une espèce chimique de masse m .
5. En déduire l'énergie thermique massique L_f de fusion de l'étain.

Données

Chaleur massique de l'eau : $C_e = 4185 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Chaleur massique de l'étain : $C_{\text{Sn}} = 228 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Température de fusion de l'étain : $\theta_f = 231,9 \text{ °C}$.

Exercice 8 : Variation de volume

La variation de volume d'eau lors d'une fusion complète est de 2 m³. Déterminer la valeur du volume d'eau liquide, si le volume de la glace après la fusion est égal aux trois quart du volume d'eau liquide.

Exercice 9 : Énergie mécanique

Une voiture pesant $M = 1200 \text{ kg}$ part au repos et atteint une vitesse de 36 km/h au bout d'une distance $d = 100 \text{ m}$. La voiture est en traction avant (le moteur agit sur les roues avant). Les forces de frottements

équivalent à une force unique $\vec{f}$ de module 1000 N appliquée à l'ensemble des roues non motrices. La réaction du sol sur les roues motrices est notée $\vec{R}_2$ et son projeté sur la direction du déplacement est égal à la force motrice F développé par le moteur. On notera $\vec{R}_1$, la réaction sur les roues non motrices

1. Inventorier toutes les forces appliquées à la voiture.
2. Représenter ces forces ainsi que leurs projetés sur les axes horizontal et vertical.

3. Justifier le sens de $\vec{R}_2$

4. Calculer F en négligeant la résistance de l'air.

5. Calculer la distance d' que la voiture doit encore parcourir pour que sa vitesse atteigne 72 km/h. une barre horizontale est suspendue par son milieu à un fil vertical de constante de torsion $c = 0,05 \text{ Nm/rad}$

5.1. Calculer l'énergie potentielle élastique du fil lorsque la barre est tournée jusqu'à la position $\alpha = 0,2 \text{ rad}$ autour de l'axe (D) confondu au fil.

5.2. La tige abandonnée à cette position tourne et repasse par sa position d'équilibre avec une vitesse

angulaire $\omega_0 = 0,8 \text{ rad/s}$. calculer le moment d'inertie de la tige par rapport à (D).

Exercice 10 : Les changements d'état

Espèce chimique	eau	dichlore	chlorure de cuivre	chlorure de sodium
Formule brute	H_2O	Cl_2	CuCl	NaCl
Structure (à température ambiante)				
Température de fusion ($P = 1 \text{ bar}$)	0 °C	-101 °C	646 °C	801 °C
Température d'ébullition ($P = 1 \text{ bar}$)	100 °C	-34 °C	1290 °C	1413 °C

1. Déterminer l'état (solide/liquide/gaz) des 4 espèces chimiques.
2. On admet que les températures de changement d'état sont une mesure indirecte des valeurs des forces d'interaction entre les molécules ou les ions dans un solide. Plus elles sont élevées, plus les valeurs des forces d'interaction sont grandes.
 - a) Expliquer à l'aide des interactions les différences de températures de fusion entre l'eau et le dichlore.
 - b) Expliquer à l'aide des interactions les différences de températures de fusion et d'ébullition.
 - c) Expliquer à l'aide des interactions pourquoi les températures de fusion sont si importantes pour les solides ioniques.
3. Déterminer la quantité de chaleur à apporter à un glaçon de 33 cm³ pour élever sa température à 280 K.

Exercice 11 : Chauffe-eau solaire

1. Quelle énergie faut-il pour chauffer 100 litres d'eau de 25 à 75 °C ?
2. On utilise pour chauffer cette eau, un capteur plan recevant une puissance lumineuse de 1 kW et qui transforme à 50 % cette énergie en chaleur. Quel est le débit de l'eau (masse d'eau en kg par seconde) dans le capteur, sachant qu'elle y pénètre à 25 °C et en sort à 75 °C.
3. Combien de temps faut-il pour chauffer 100 litres d'eau ?

Exercice 12 : Fondue au vin blanc

Pour faire une fondue, on souhaite chauffer 0,75 L de vin blanc dans un caquelon en fonte.

L'éthanol est le combustible utilisé. L'énergie thermique libérée lors de la combustion d'une masse m d'éthanol sert à chauffer le vin et le caquelon en fonte, ainsi qu'à vaporiser l'éthanol, qui doit être gazeux pour brûler.

Déterminer la masse d'éthanol nécessaire pour porter le vin de 20 °C à 90 °C.

Données

Énergie thermique libérée par la combustion de l'éthanol : - 29,7 kJ/g

Température ébullition éthanol : 78 °C



Leçon 8

LA LUMIÈRE

Activité

On considère le soleil et une lampe de poche. Ces deux objets émettent de la lumière chacun de sa manière. Cependant, ces objets sont différents.



Soleil



Lampe à DEL

Quelle différence majeure existe-t-il entre ces deux sources de lumière ?

ACTIVITÉSObjectifs

- Définir : lumière ; source de lumière ; lumière monochromatique et polychromatique.
- Énumérer les sources de lumière ;
- Énoncer et appliquer la loi de Wien ;
- Expliquer le modèle corpusculaire de la lumière.

1. Les sources de lumière

- La **lumière** (en physique) est une radiation électromagnétique (selon **Michael Faraday**) qui peut produire une sensation visuelle. En d'autres termes, c'est ce qui éclaire et qui rend les objets visibles.
- Une **source de lumière** est un objet qui produit de lumière qu'il émet. Il est aussi appelé **émetteur lumineux**.
- On distingue cependant plusieurs sources de lumière réparties en fonction des rayons émis et aussi de l'état (chaud ou froid) de ces rayons émis.

1.1. Les sources primaires

On appelle **source primaire de lumière**, toute source qui produit elle-même la lumière qu'elle émet. On distingue cependant deux types de sources primaires à savoir :

- Les **sources primaires naturelles** (œuvres de la nature)

Exemple

- Les lucioles
- Les étoiles
- Les flammes issues des combustions

Sources primaires naturelles

Soleil

Vers luisants
(bioluminescence)

- Les sources **primaires artificielles** qui sont des sources créées par l'Homme

Exemple

Sources primaires artificielles



Lampe à incandescence



Lampe à D.E.L.



Lampe halogène


Lampe
fluocompacte

- Les LASER
- Les lampes à néon
- Les lampes à gaz

Remarque

Il existe des sources primaires qui sont à la fois naturelles et artificielles. On peut citer :

- Les chimiluminescences (lumières qui résultent d'une réaction chimique)
- Les fluorescences
- Les phosphorescences
- Les triboluminescences (lumière qui résultent d'une déformation mécanique)

1.2. Les sources secondaires

On appelle **source de lumière secondaire**, toute source qui ne produit pas la lumière qu'elle émet mais diffuse la lumière qu'elle reçoit. On les appelle aussi **objet** (ou **source diffusant(e)**).

On distingue aussi :

- Les **sources secondaires naturelles**

Exemple : La lune

- Les **sources secondaires artificielles**

Exemple : Tout objet éclairé.

1.3. Les sources monochromatiques

- On appelle **source de lumière monochromatique**, toute source qui émet un seul rayon lumineux. C'est le cas par exemple des LASER.
- On appelle **lumière monochromatique**, une lumière dont le spectre ne contient qu'une seule radiation (une seule **longueur d'onde** ou une seule **fréquence**).

Exemple

- Laser hélium – néon (He – Ne)



($\lambda = 632,8 \text{ nm}$ (rouge))

- Lampe à vapeur de sodium (Na)



(Spectre d'émission du Na)

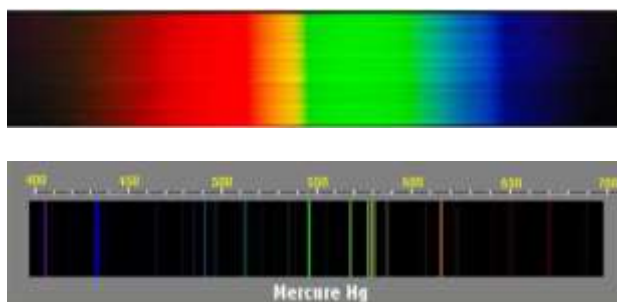
1.4. Les sources polychromatiques

- On appelle **source de lumière polychromatique**, toute source plusieurs rayons lumineux (**faisceau lumineux**). C'est le cas par exemple de toutes les autres sources de lumière en dehors des lasers.

- On appelle **lumière polychromatique**, une lumière constituée d'un ensemble de lumières monochromatiques : son spectre contient plusieurs radiations donc plusieurs couleurs (**plusieurs longueurs d'onde**).

Exemple

- Lampe à incandescence
- Lampe à vapeur de mercure (Hg)



Remarque

- On appelle **rayon lumineux**, la direction de propagation de la lumière. C'est aussi le trajet rectiligne suivi par la lumière.
- Un faisceau lumineux est un ensemble de rayons lumineux.
- Il est possible de rendre une lumière polychromatique en lumière monochromatique. Il suffit pour cela, de placer, devant la source polychromatique, un corps opaque perforé d'un petit trou (orifice), à la sortie de ce corps opaque, le rayon polychromatique devient monochromatique.
- On classe aussi les sources de lumière en **sources chaudes** (soleil, lampe à filament, feu,...) et **sources froides** (laser, lampe à économie d'énergie, tube fluorescent, ...).

1.5. Domaines des ondes électromagnétiques

- Chaque radiation émise par une source peut être caractérisée par sa **longueur d'onde dans le vide**. La longueur d'onde est notée λ (lambda) et s'exprime en mètres (m).

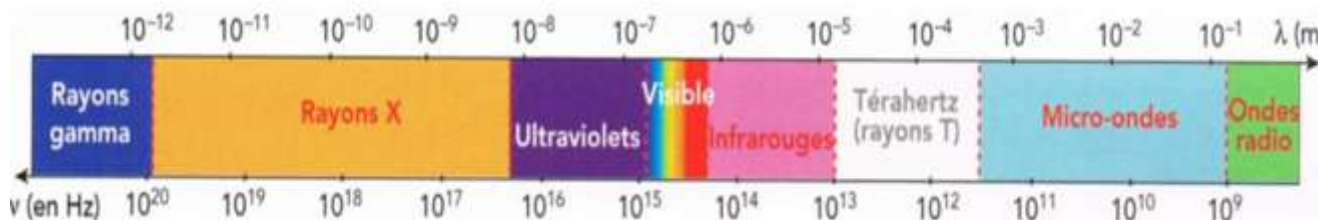
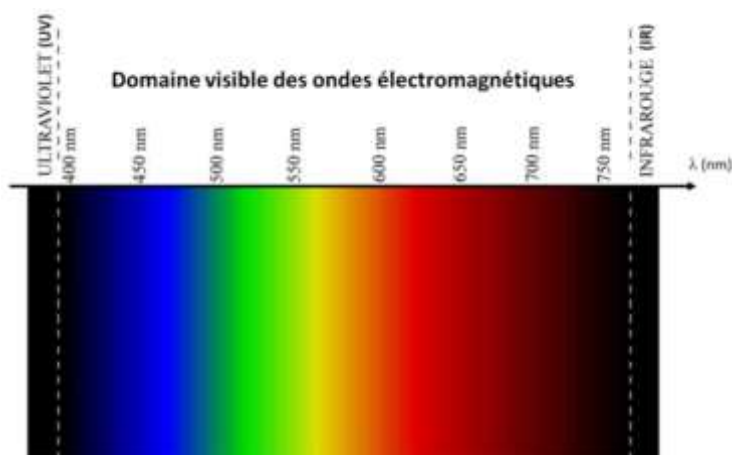


Figure 8.1 : Les domaines des ondes électromagnétiques

- Le domaine visible des ondes électromagnétiques est constitué d'une infinité de lumières colorées, dont les longueurs d'onde vont de **400 nm (violet)** à **800 nm (rouge)**. Il est limité aux faibles longueurs d'onde par l'ultra-violet (UV) et aux grandes longueurs d'onde par l'infra-rouge (IR). On écrit alors :

$$\text{Domaine de lumière visible : } (\text{UV}) \, 400 \, \text{nm} < \lambda < 800 \, \text{nm} \, (\text{IR}) \quad (8.1)$$



- La vitesse de propagation de la lumière (aussi appelée « **célérité**⁽¹⁾ » du latin **celeritas** « **vitesse** ») dans le vide est notée **C** et vaut **300 000 km.s⁻¹ = 3.10⁸ m.s⁻¹**.

1.6. Couleurs des corps chauffés (loi de Wien)

- Un corps chaud émet une lumière dont le spectre⁽²⁾ s'étale quand la température augmente.
- Un corps dense émet un rayonnement électromagnétique qui dépend de sa température et dont le spectre est continu.
- En **1893**, **Wilhelm Wien**, montre expérimentalement que le spectre continu du rayonnement électromagnétique émis par un corps de température **T**, a une intensité maximale pour une longueur d'onde **λ_{max}** qui est donnée par la relation :



Wilhelm Wien 1864-1928

$$\lambda_{\max} = \frac{2,90 \times 10^{-3}}{T} \quad (8.2)$$

- Énoncé de la loi de W. Wien** « La température θ (en degré Celsius) de la surface d'un corps est fonction de la longueur d'onde $\lambda_{\max}$ (en nm) de la radiation émise avec l'intensité maximale :

$$\theta = \frac{2,89 \times 10^6}{\lambda_{\max}} - 273 \quad (8.3)$$

Remarque

- La notation **λ_{max}** ne représente pas une valeur maximale de λ , mais la valeur de λ qui correspond au maximum de l'intensité du rayonnement électromagnétique. C'est la longueur d'onde pour laquelle l'intensité lumineuse diffusée est la plus importante.
- La relation (8.3) est celle aussi utilisée pour évaluer la température de surface des étoiles en étudiant leur profil spectral.
- Une année-lumière représente la distance parcourue par la lumière en un an.

Exemple

Calculer la longueur d'onde correspondant à l'intensité maximale de la lumière émise par le filament d'une lampe à incandescence dont la température est 2500 °C.

Solution

Données : $\theta = 2500$ °C. D'après la loi de W. Wien, on a :

$$\theta = \frac{2,89 \times 10^6}{\lambda_{\max}} - 273 \Rightarrow \lambda_{\max} = \frac{2,89 \times 10^6}{\theta + 273} \quad \text{AN : } \lambda_{\max} = 1042,2 \text{ nm} = 1,04 \mu\text{m}.$$

Cette valeur situe l'intensité maximale de cette lumière dans le domaine des infra-rouges.

2. Interaction lumière-matière

- En appliquant les lois de l'électromagnétisme aux ondes lumineuses, on peut prévoir certaines propriétés des rayonnements lumineux dans le cas du modèle théorique de corps condensé et

chaud imaginé par le physicien **Planck**. Or une partie de ces prévisions est en désaccord complet avec l'expérience.

- Le **modèle ondulatoire** de la lumière est indispensable pour étudier la propagation de la lumière mais est insuffisant pour décrire les échanges d'énergie entre la matière et la lumière.

2.1. Émission et absorption

(a) Spectre d'émission



La décomposition de la lumière blanche à travers un prisme (figure 8.2 et 8.3) montre qu'elle est constituée d'une succession sans discontinuité, de toutes les 7-couleurs de l'arc-en-ciel. C'est un **spectre continu**.

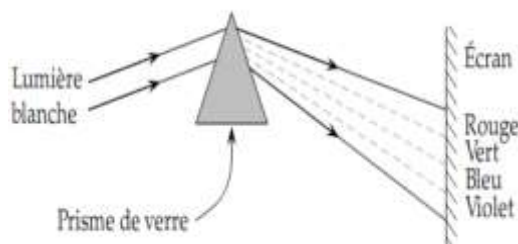


Figure 8.2 : Dispersion de la lumière blanche par un prisme

Observation :



Figure 8.3 : Spectre continu de la lumière blanche

- Lorsqu'on apporte de l'énergie extérieure à la matière, celle-ci peut l'absorber puis la restituer sous forme d'énergie électromagnétique (lumière) par exemple.
- L'analyse de la lumière émise par une lampe à vapeur de mercure montre que le spectre est constitué de **quelques raies fines**, colorées, $\pm$ intense et irrégulièrement espacées sur un fond noir (fig. 8.4) : c'est un **spectre discontinu** appelé **spectre de raie d'émission**.

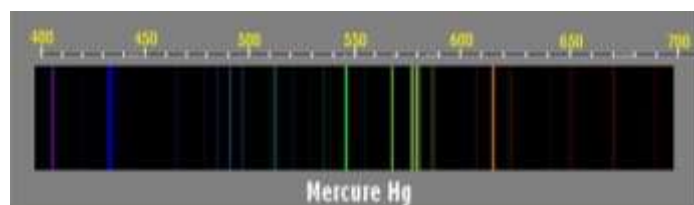


Figure 8.4 : Spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure.

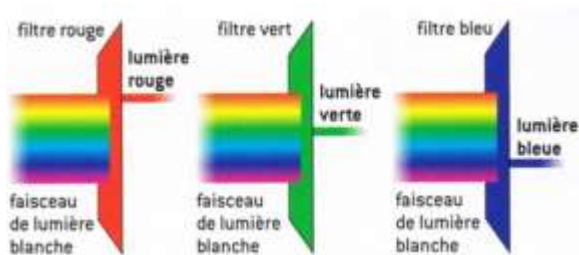


Figure 8.5 : Spectre d'émission d'une lampe à vapeur de Na

- Dans un spectre d'émission, à chaque raie correspond une radiation monochromatique caractérisée par sa longueur d'onde dans le vide.
- La lumière émise par les atomes d'un élément donné est constituée des **radiations monochromatiques** de longueur d'onde bien déterminée. Par exemple, la raie jaune de la lampe à vapeur de sodium a pour longueur d'onde $\lambda \approx 590 \text{ nm}$ (fig.8.5).

Remarque

- Une raie est encore une bande d'énergie.
- On appelle **lumière blanche**, toute lumière dont la décomposition par un système dispersif (prisme, réseau) donne un spectre continu (qui contient toutes les couleurs de l'arc-en-ciel).
- Un **filtre** est un système transparent, qui permet d'obtenir une lumière colorée à partir d'une lumière blanche : il laisse passer la lumière colorée correspondant à sa couleur (en lumière blanche) et absorbe toutes les autres (fig. 8.6).



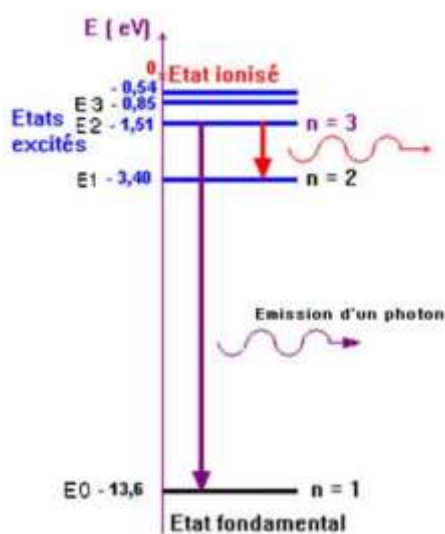
Couleur de la source	Couleur du filtre	Couleur de l'écran
Blanche	Rouge	Rouge
Blanche	Verte	Verte
Blanche	Bleue	Bleue

Figure 8.6 : Couleur observée à travers un filtre

Exemple

Quand un atome se trouve dans un état excité, il va essayer de se rapprocher de son état fondamental, et ce faisant, va émettre un **photon** qui emporte l'énergie correspondant à la transition entre les deux niveaux d'énergie.

Considérons par exemple le cas d'émission ci-dessous :



Le photon émis va donner lieu à une raie sur le spectre d'émission de l'atome.

Au cours d'une transition entre un niveau d'énergie E_m et un autre niveau d'énergie inférieur E_n , l'énergie de l'atome diminue de :

$$|\Delta E| = |E_m - E_n| \quad (8.4)$$

Le photon émis, emporte cette énergie qui vaut :

$$|\Delta E| = |E_m - E_n| = h \times \nu = h \times \frac{c}{\lambda} \quad (8.5)$$

(b) Spectre d'absorption

- Les spectres d'absorption sont constitués de fines raies noires dans un spectre continu. Pour les atomes d'un élément donné, les raies d'absorption correspondent à certaines raies d'émission.
- Par exemple, si on envoie la lumière blanche sur une vapeur de sodium, après la traversée d'un prisme, on constate que le spectre de la lumière blanche n'est plus continu mais qu'elle présente une raie noire (raie manquante) : **la vapeur de sodium a absorbé la raie jaune**.
- On peut alors conclure en disant que toute radiation pouvant être absorbée par un élément peut aussi être émise après excitation.

Remarque

- Lorsqu'un atome possède de l'énergie basse, on dit qu'il est dans son **état fondamental**. Les autres états sont dits **états excités**.
- La lumière est une onde électromagnétique qui transporte de l'énergie.
- Pour émettre de la lumière en permanence, la matière doit recevoir de l'énergie extérieure.
- La loi de Wien ne suffit pas à prévoir la couleur d'un corps chauffé car elle dépend de l'ensemble des intensités des radiations émises.

2.2. Quantification des niveaux d'énergie de la matière

Pour interpréter les propriétés des échanges d'énergie entre matière et lumière, les physiciens ont été amenés à admettre que les énergies échangées ne peuvent pas prendre des valeurs

quelconques. Ainsi les transferts d'énergie entre la matière et la lumière sont **quantifiés**. Ils ne peuvent se faire que par « **paquets** » d'énergie contenant chacun une énergie bien déterminée, que l'on appelle **un quantum** (au pluriel des **quanta**).

Comme l'a postulé **Niels Bohr en 1913**, l'énergie de l'atome ne peut prendre que certaines valeurs.

Considérons le plus simple des atomes, l'atome d'hydrogène (1 seul électron).

Dans son état fondamental, l'électron se trouve sur l'orbite la plus proche du noyau, celle de plus faible énergie. Pour changer d'orbite, on doit fournir à l'électron une énergie égale à la différence d'énergie entre les couches.

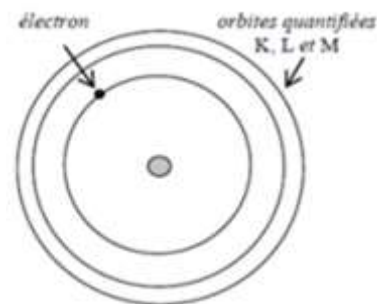


Figure 8.7 : L'atome d'H dans le modèle de Bohr

Énoncé des Postulats de N. Bohr :

P1 : Les électrons gravitent autour du noyau sur certaines orbites privilégiées formant une suite discontinue : à chaque orbite correspond un état appelé **état d'énergie** : **l'énergie est quantifiée**.

P2 : L'électron sur son orbite, ne rayonne pas et son mouvement ne s'amortit pas.

P3 : L'atome émet ou absorbe l'énergie lorsqu'un électron passe d'une orbite privilégiée à une autre : c'est la **transition**. Ce passage se fait naturellement par **saut brusque**.

Nota Bene

Les longueurs d'ondes des raies du spectre d'émission et des raies du spectre d'absorption sont les mêmes car elles correspondent aux différents niveaux d'énergie à l'intérieur de l'atome. C'est pourquoi on dit que ces spectres de raies sont caractéristiques d'un atome donné.

3. Modèle corpusculaire de la lumière : le photon

- Un quantum d'énergie lumineuse est appelé **photon**.
- Un **photon** est un gain d'énergie transporté par une radiation.

3.1. Énergie du photon

- En **1905**, **Albert Einstein** a expliqué que la lumière est composée de corpuscules qu'il a appelé **photons**.
- Les photons transportent de l'énergie E . Cette énergie est donnée par la formule de Planck suivante :

$$\Delta E = h \cdot \nu \quad (8.6)$$

Unités : $h = 6,62 \cdot 10^{-32} \text{ Js}$ = constante de Planck ; ν (en Hz) = fréquence de la radiation ; E (en J)

- L'énergie transportée par un photon est si faible (en J), qu'on utilise une autre unité : l'**électronvolt (eV)**. **$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$**
- Soient C ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), la vitesse de la lumière dans le vide ; λ (m), la longueur d'onde de la radiation et T (s) la période ou durée de la radiation. La relation liant ses grandeurs est :

$$\lambda = C \times T \quad (8.7)$$

$$\text{Or } T = \frac{1}{\nu} \Rightarrow (8.7) \text{ devient : } \lambda = \frac{C}{\nu} \quad (8.8)$$

De même, la relation (8.6) devient alors :

$$\Delta E = h \nu = h \times \frac{C}{\lambda} \quad (8.9)$$

3.2. Relation $E = h\nu$ dans les échanges d'énergie

- Lorsque l'atome cède l'énergie $\Delta E = E_i - E_f$ lors d'une transition d'un niveau supérieur à un niveau inférieur, cette transition s'accompagne de l'émission d'un rayonnement : un photon dont la fréquence ν dépend de la différence d'énergie de la transition. On a :

$$\Delta E = E_f - E_i = -h\nu < 0 \quad (8.10)$$

- L'atome reçoit l'énergie $E_f - E_i$ lors d'une transition d'un niveau inférieur vers un niveau supérieur, cette transition peut être provoquée par l'absorption d'un photon dont la fréquence dépend de la différence d'énergie de la transition. On a :

$$\Delta E = E_f - E_i = +h\nu > 0 \quad (8.11)$$

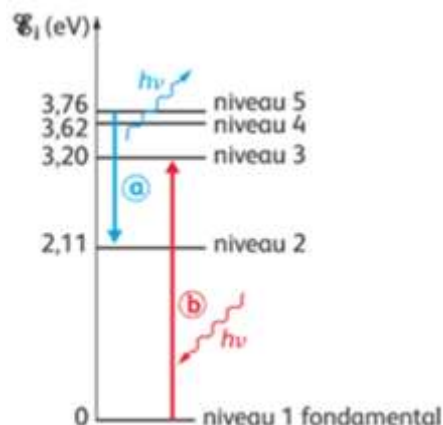


Figure 8.8 : Diagramme des 1^{ers} niveaux d'énergie de l'atome de Na



3.3. Profil spectral d'une source lumineuse

On peut caractériser la couleur d'une source lumineuse par la courbe donnant l'intensité lumineuse pour chaque lumière monochromatique présente dans la lumière qu'elle émet, appelée **profil spectral** de la source ou **courbe de répartition spectrale** (ou en longueur d'onde). Il s'agit d'une représentation visuelle des caractéristiques chromatiques d'une source de lumière. (fig.8.8).

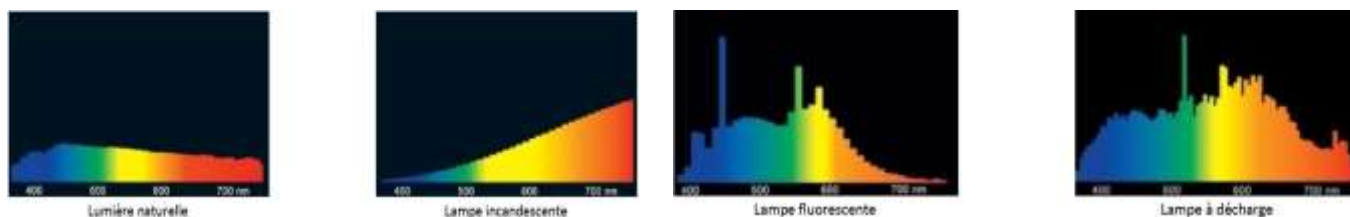


Figure 8.8 : Exemples de profils spectraux.

4. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Lumière	Light
Spectre	Spectrum
Raie	Ray
Profil spectral	Spectrum profile
Matière	Matter; material.
Longueur d'onde	Wavelength

Sentence

The speed of light in a vacuum is the upper limit for the speed of any material body. No object can travel faster than C . The speed of light in a material medium is always less than C . The formula $V = \lambda \times f$ applies to light waves. Therefore, $C = f \times \lambda$, where f is the frequency of light wave and λ is its wavelength in a vacuum.

- Célérité** : Vitesse de la lumière dans le vide; elle fut découverte par les physiciens Michael Faraday et James Clark Maxwell (lors des travaux de M. Faraday sur l'électromagnétisme)
- Spectre** : Newton a utilisé pour la première fois, le terme « spectre » (du latin « apparence » ou apparition ») dans un texte imprimé en 1671 en décrivant ses expériences en optique.



EXERCICES DE LA LEÇON 8 : LA LUMIÈRE

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS

- Définir : année lumière ; lumière ; longueur d'onde ; source de lumière.
- Donner la différence entre un rayon lumineux et un faisceau lumineux.
- Classer les sources de lumière suivantes en source chaude et froide : laser ; soleil ; étoile ; lampe à incandescence.
- Énoncer les postulats de Bohr.
- Énoncer la loi de Wien
- Vrai ou faux
 - La loi de Wien s'applique aussi aux corps froids.
 - Loi de Wien est suffisante pour prévoir la couleur des corps chauffés.
 - La loi de Wien est nécessaire pour prévoir la couleur des corps chauffés.
 - On peut décomposer la lumière blanche à l'aide d'un diamant.
 - La décomposition de la lumière blanche par un prisme permet d'observer les 7-couleurs de l'arc-en-ciel.
 - La valeur de la vitesse de la lumière dans le vide a été découverte par Faraday.
 - Le laser est une source de lumière secondaire naturelle.
 - La lampe à incandescence est une source de lumière polychromatique.
 - Le soleil est une source primaire naturelle monochromatique.
 - Une raie est une énergie.
- Choisir la bonne réponse
 - Lors du processus d'émission d'énergie, l'atome cède :
 - $\Delta E = E_f - E_i$.
 - $\Delta E = E_i - E_f$.
 - $\Delta E = 0$.
 - Dans le nom de Wien, le W signifie :
 - William.
 - Willy.
 - Wilhelm.
 - La célérité vient du mot latin :
 - Celeritas
 - Celerita
 - Vitesse
 - Lorsqu'un atome reçoit l'énergie,
 - $\Delta E = 0$
 - $\Delta E < 0$
 - $\Delta E > 0$
 - La relation entre les grandeurs h , E et v est :
 - $E = h/v$.
 - $E = hv$.
 - $E = v/h$.
 - La constante $h = 6,62 \cdot 10^{-32}$ Js est la constante de :
 - A. Einstein
 - J. C. Maxwell
 - Planck.

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

- En exploitant la loi de Wien, déterminer la température surfacique du soleil. On donne $\lambda_{\max} = 480 \text{ nm}$.
- L'état fondamental de l'atome d'hydrogène est tel que $E_i = -13,6 \text{ eV}$. L'énergie nécessaire pour passer de l'état E_i à l'état E_f est $\Delta E = 10,2 \text{ eV}$.
 - De quelle transition (absorption ou émission) s'agit-elle ? Justifier la réponse.
 - Déterminer la longueur d'onde λ correspondant à cette transition.
 - À quel domaine du visible (UV ou IR) appartient cette radiation ?
- Un atome H émet une radiation lors de la transition du niveau 3 au niveau 2.
 - Calculer la fréquence et la longueur d'onde de cette radiation.
 - Dans quelle partie du spectre se situe cette radiation ?
- [BAC 200] Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène sont donnés par la relation :

$$E_n = -\frac{E_i}{n^2} \quad (E_i = 13,6 \text{ eV}) \quad (n \in \mathbb{N}^*)$$
 - Donner la signification et les unités de chaque grandeur de cette relation.
 - On considère la transition d'un atome d'hydrogène du niveau d'excitation p au niveau d'excitation n ($p > n$).
 - Y a-t-il absorption ou émission de photon ? Justifier.
 - Exprimer l'énergie du photon mis en jeu en fonction de E_i , n et p .
 - Calculer E pour une transition du niveau 4 au niveau 2.
 - Quelle est la longueur d'onde de la radiation ?
 - À quel domaine spectral appartient cette radiation ?
 - On envoie sur des atomes H à l'état fondamental, différents photons d'énergies respectives : 10,2 eV ; 12,1 eV ; 14,6 eV.
Dire en le justifiant, les photons qui peuvent être absorbés.
 - Lorsque les vapeurs de sodium sont excitées dans un tube à décharge, une lumière jaune intense est émise (fig.8.5) ; une analyse spectrométrique permet de séparer ces radiations en un doublet de longueurs d'onde : $\lambda_1 = 589,59 \text{ nm}$ (raie D_1) et $\lambda_2 = 588,99 \text{ nm}$ (raie D_2). Ces raies correspondent à des transitions entre deux niveaux excités très proches notés tous deux 3 p, et le niveau fondamental noté 3 s, d'énergie conventionnellement choisie nulle.
 - Déterminer les énergies, exprimées en joules puis en électronvolts, des deux états 3 p concernés par ces transitions.
 - Inversement, quelles sont les longueurs d'onde des radiations qui pourraient être absorbées par une vapeur de sodium éclairée par une source de lumière blanche à spectre continu ?



6. Lampe à vapeur de sodium

Certaines lampes utilisées pour éclairer les tunnels routiers par exemple, contiennent de la vapeur de sodium. Lorsque la lampe est sous tension, les atomes de sodium sont excités par un faisceau d'électrons, absorbant une partie de leur énergie. L'énergie est restituée sous forme de radiations lumineuses lors du retour atomes dans l'état de plus basse énergie, l'état fondamental. Les lampes à vapeur de sodium émettent surtout de la lumière jaune.

Données : $h = 6,62 \cdot 10^{-32}$ J.s ; $C = 3,00 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ ; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

L'analyse du spectre d'émission d'une lampe à vapeur de sodium révèle la présence des raies de longueur d'onde λ bien définie.



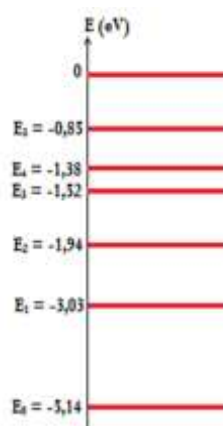
Voici le diagramme simplifié des niveaux d'énergie de l'atome de sodium.

6.1. Indiquer sur le diagramme, l'état fondamental et les états excités.

6.2. On considère la raie jaune du doublet de sodium, de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 589,0$ nm.

(a) Calculer l'énergie ΔE (en eV) du photon correspondant.

(b) Après avoir justifié, indiquer la transition correspondante par une flèche (notée 1) sur le diagramme des niveaux d'énergie.



6.3. L'atome de sodium, considéré maintenant à l'état d'énergie E_1 , reçoit un photon d'énergie $\Delta E' = 1,09$ eV.

(a) Ce photon peut-il interagir avec l'atome de sodium ? Justifier votre réponse.

(b) Représentée la transition correspondante par une flèche (notée 2).

7. Le spectre de la lumière émise par une lampe à vapeur de sodium fait surtout apparaître deux raies jaunes, très voisines, de longueurs d'onde $\lambda_1 = 589,0$ nm et $\lambda_2 = 589,6$ nm.

7.1. Expliquer, quelle modification subit un atome de sodium lorsqu'il émet de la lumière.

7.2. Les transitions associées aux deux raies jaunes du spectre d'émission du sodium, font intervenir toutes les deux, le niveau fondamental de l'atome. En attribuant la valeur 0 à l'énergie du niveau fondamental, calculer en J et en eV les énergies des deux autres niveaux intervenant dans ces transitions.

7.3. Représenter, sans soucis d'échelle, la partie du diagramme des niveaux d'énergie de l'atome de sodium qui intervient dans les transitions

précédentes. Représenter ces transitions sur la figure ainsi que l'émission de rayonnement.

Données : $h = 6,626 \cdot 10^{-32}$ J.s ; $C = 2,998 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ ; $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Expérience 1

Proposer un schéma montrant comment rendre une lumière polychromatique en lumière monochromatique.

Situation 2 : Année - lumière

On donne la distance Terre-Soleil : $D = 150\,000\,000$ km.

Calculer la durée (en secondes puis en minutes) que ferait un rayon lumineux issu du Soleil pour atteindre la surface de la Terre.

Situation 3 : Exploitation des résultats expérimentaux

Les énergies des états de l'atome de mercure sont données ci-dessous : elles sont exprimées en électronvolt (eV) avec $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19}$ J.

Sur une feuille, tracer un axe vertical, gradué en eV, avec l'échelle : 1 cm pour 0,5 eV. Associer à chaque état de l'atome de mercure un « niveau d'énergie » en traçant un segment horizontal.

État	Fondamental	Excité 1	Excité 2	Excité 3	Excité 4
E(eV)	-10,5	-5,78	-5,56	-4,98	-3,74

État	Excité 5	Excité 6	Excité 7	Excité 8	Excité 9
E(eV)	-2,71	-2,51	-1,90	-1,81	-1,60

- À l'aide du spectre de raies d'émission du mercure fourni par le professeur (fig.8.4), montrer que trois raies correspondent aux longueurs d'onde suivantes : $\lambda_1 = 436$ nm ; $\lambda_2 = 546$ nm et $\lambda_3 = 578$ nm.
- Calculer les fréquences ν_1 , ν_2 et ν_3 associées à ces trois raies (fréquence et longueur d'onde sont reliées par la relation : $\lambda = c/\nu$ avec $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s).
- En s'aidant des découvertes de Planck et Einstein, calculer en joule les énergies E_1 , E_2 et E_3 des photons correspondants aux trois rayonnements. Exprimer ensuite ces énergies en électronvolt (eV).
- Découper une flèche de papier dont la longueur représente l'énergie E_1 (en gardant l'échelle : 1 cm pour 0,5 eV). Faire de même pour E_2 et E_3 .
- La longueur de chaque flèche correspond à l'intervalle entre deux niveaux d'énergie : déterminer graphiquement lesquels à partir des niveaux d'énergie représentés précédemment.
- Comment le modèle de l'atome de Bohr permet d'expliquer la présence de raies d'émission dans la lumière émise par un atome de mercure excité ?
- Observer le spectre de raies d'émission du sodium. Comment peut-on justifier le fait qu'une entité chimique possède un spectre de raies d'émission spécifique ?



Leçon 9

LES LENTILLES SPHÉRIQUES MINCES



Activité

On considère l'image ci-contre.

- (a) Dans quel domaine de la physique, peut-on utiliser cet appareil ?
 (b) Donner alors un de ses rôles.



ACTIVITÉS

Objectifs

- Définir et classer les lentilles.
- Présenter différemment, les éléments caractéristiques des lentilles.
- Utiliser les règles de construction et les formules des lentilles pour déterminer les caractéristiques d'une image.
- Définir focométrie et présenter quelques méthodes focométriques.
- Énoncer et appliquer le théorème des vergences.
- Énoncer les conditions d'approximation de Gauss.

1. Définition et classification des lentilles

1.1. Définition

- Une **lentille sphérique** est un milieu transparent et homogène, limité par deux surfaces dont l'une au moins est sphérique.
- Une lentille sphérique résulte de l'association de deux **dioptries**⁽¹⁾ sphériques de même axe de symétrie de révolution : l'**axe optique** (SP) sur la figure 9.1 ci-dessous.

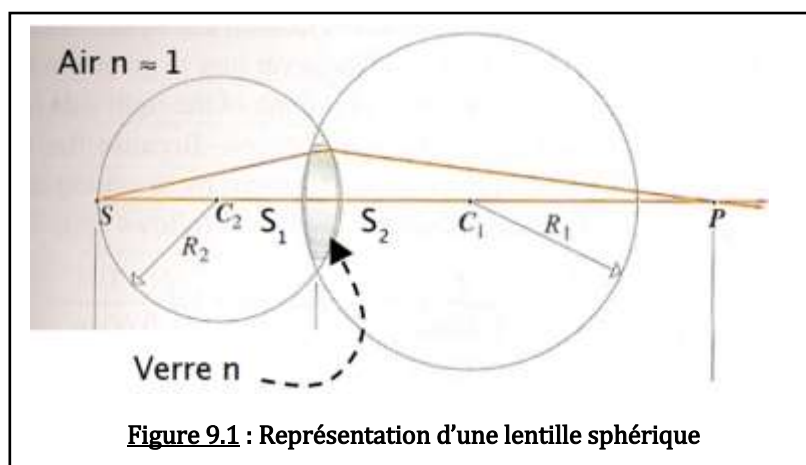


Figure 9.1 : Représentation d'une lentille sphérique

- Soient $e = S_1S_2$, l'épaisseur de la lentille ; $d = C_1C_2$, la distance entre les centres de chaque sphère ; R_1 et R_2 les rayons de courbure des sphères.
 Une **lentille sphérique** est dite mince, lorsque son épaisseur e est négligeable devant es rayons de courbure. On a alors :

$$\begin{cases} e \ll C_1 S_1 \\ e \ll C_2 S_2 \\ e \ll d \end{cases} \quad (9.1)$$

Dans ces conditions, on peut dire que : $S_1 \approx S_2 \approx 0 =$ **centre optique**.

Remarque

Pour un plan, le rayon de courbure est égal à l'infini : $R = \infty$.

1.2. Classification des lentilles

1.2.1. Les lentilles à bords minces (convergentes)

- Une lentille sphérique est dite **convergente**, lorsqu'elle donne d'un faisceau de rayons parallèles ou cylindriques, un **faisceau convergent**.

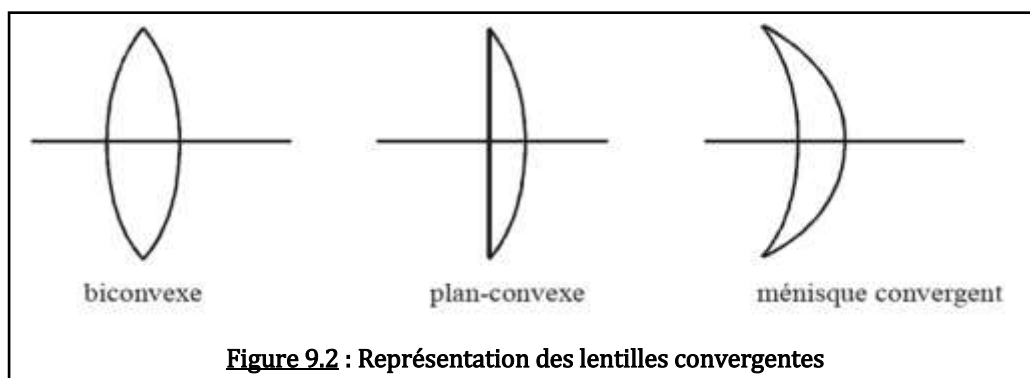


Figure 9.2 : Représentation des lentilles convergentes

- En d'autres termes, est dite **lentille convergente**, toute lentille qui donne d'un rayon incident parallèle, un rayon émergent se rapprochant de l'axe optique.

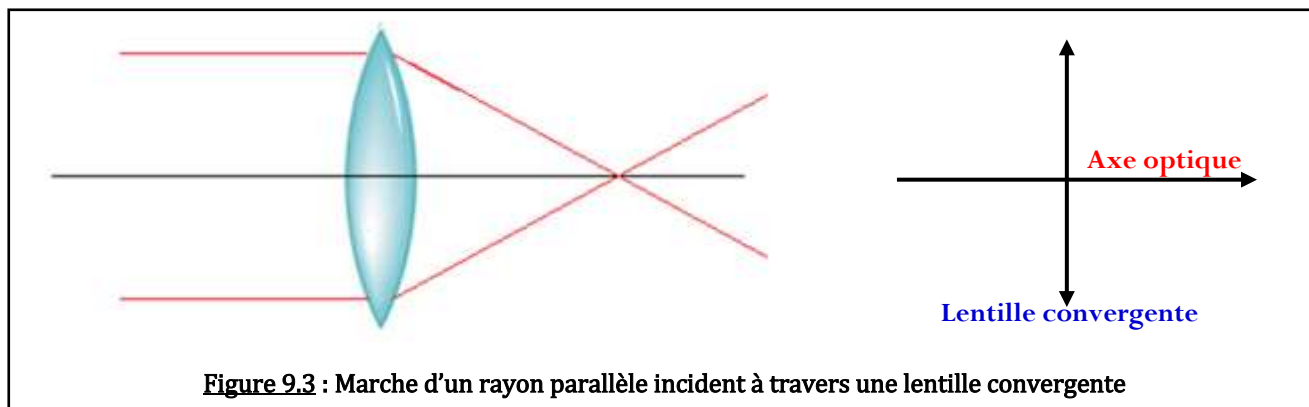


Figure 9.3 : Marche d'un rayon parallèle incident à travers une lentille convergente

1.2.2. Les lentilles à bords épais (divergentes)

- Une lentille sphérique est dite **divergente** lorsqu'elle donne d'un faisceau de rayons cylindriques incident, un **faisceau émergent divergent**.

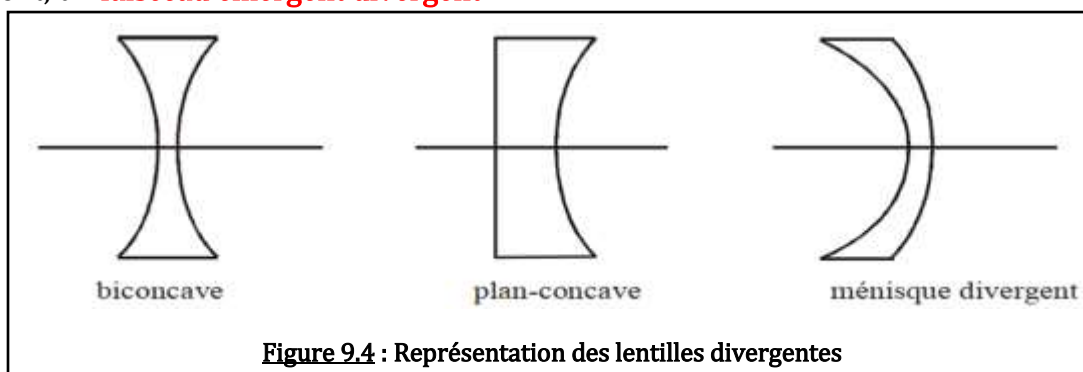


Figure 9.4 : Représentation des lentilles divergentes

- En d'autres termes, une lentille sphérique est dite **divergente**, lorsqu'elle donne d'un rayon incident parallèle, un rayon émergent qui s'éloigne de l'axe optique.

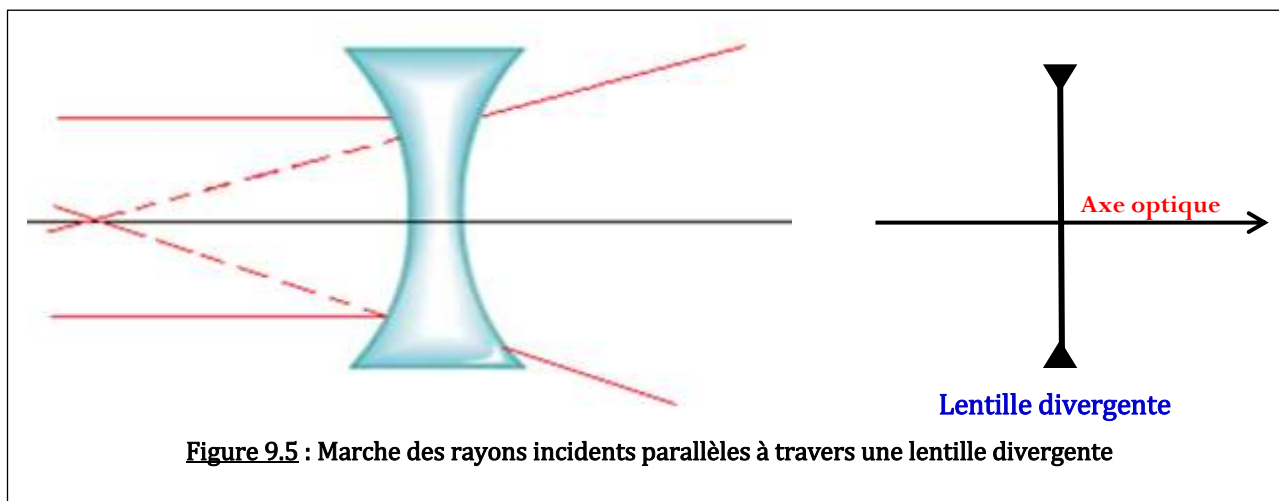


Figure 9.5 : Marche des rayons incidents parallèles à travers une lentille divergente

2. Les éléments caractéristiques d'une lentille

Quel que soit le type de lentille étudié, celui-ci est caractérisé par certains éléments à savoir :

2.1. Le centre optique

C'est le point **O** de l'axe optique à travers lequel, tout rayon incident passant par ce point, n'est pas dévié.

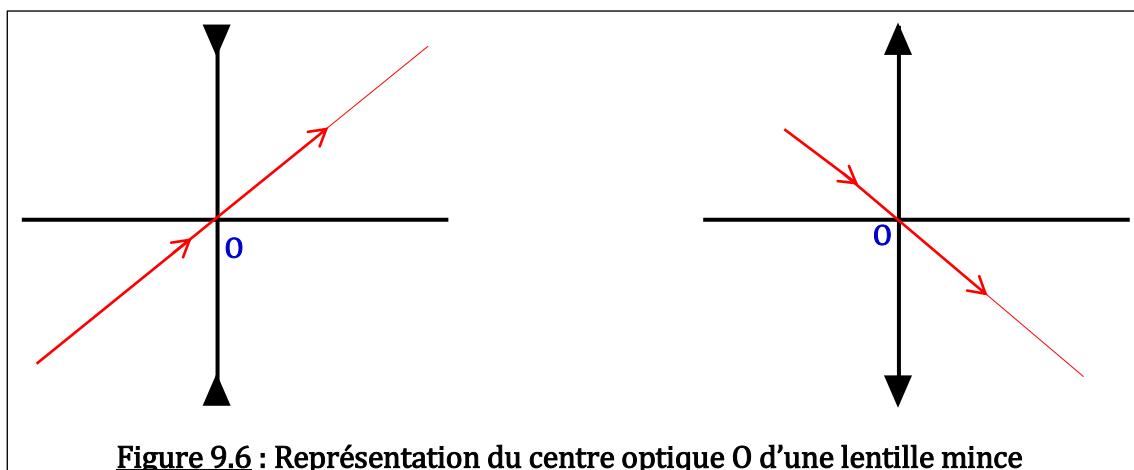


Figure 9.6 : Représentation du centre optique O d'une lentille mince

2.2. Les foyers principaux

(a) Le foyer principal objet

- C'est le point **F** de l'axe principal tel que tout rayon lumineux incident passant par ce point (**lentille convergente**) ou se dirigeant vers ce point (**lentille divergente**), émerge de la lentille parallèlement à l'axe.
- C'est aussi le point objet de l'axe optique dont l'image se trouve à l'infini dans la direction de l'axe optique.

(b) Le foyer principal image

- C'est le point **F'** de l'axe principal tel que tout rayon lumineux incident, parallèle à l'axe principal, émerge de la lentille en passant par ce point (**cas des lentilles convergentes**), soit en semblant provenir de ce point (**cas des lentilles divergentes**).

- C'est aussi l'image d'un point situé à l'infini et émettant des rayons parallèles à l'axe optique.

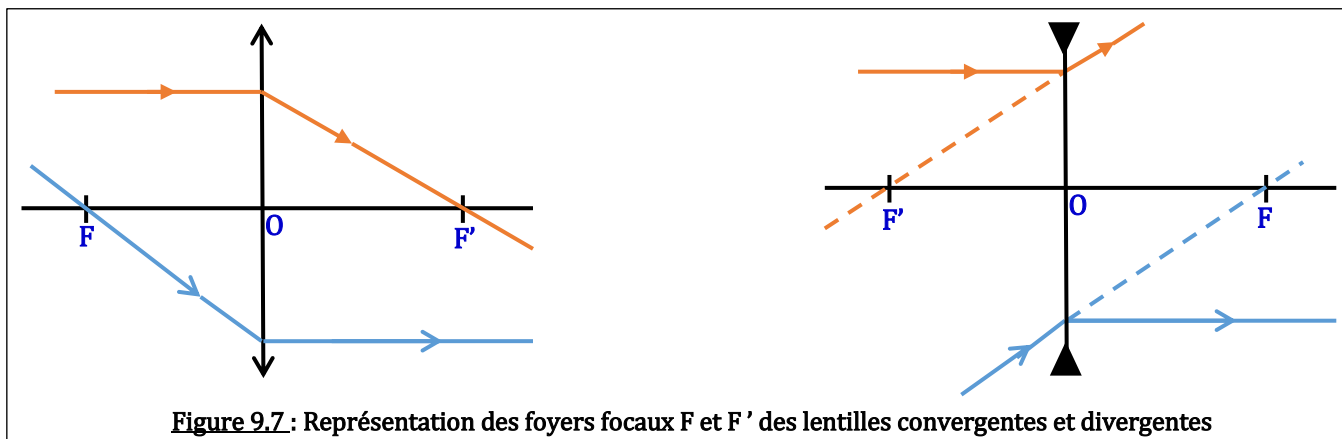


Figure 9.7 : Représentation des foyers focaux F et F' des lentilles convergentes et divergentes

Remarque

- ✍ Les points F et F' sont symétriques par rapport à O .
- ✍ Les foyers principaux image et objet d'une lentille convergente sont **réels** car les rayons lumineux passent effectivement par ces points.
- ✍ Les foyers principaux image et objet d'une lentille divergente sont **virtuels** car les rayons lumineux semblent provenir de ces points.

2.3. Les plans focaux

- Un plan focal est un plan perpendiculaire à l'axe principal et qui contient un foyer principal.
- Si le plan focal passe par F , alors, le plan focal est **objet**.
- Si le plan passe par F' , alors le plan focal est dit **image**.
- Si la lentille est convergente, alors, le plan focal est **réel**.
- Si la lentille est divergente, alors le plan focal est **virtuel**.

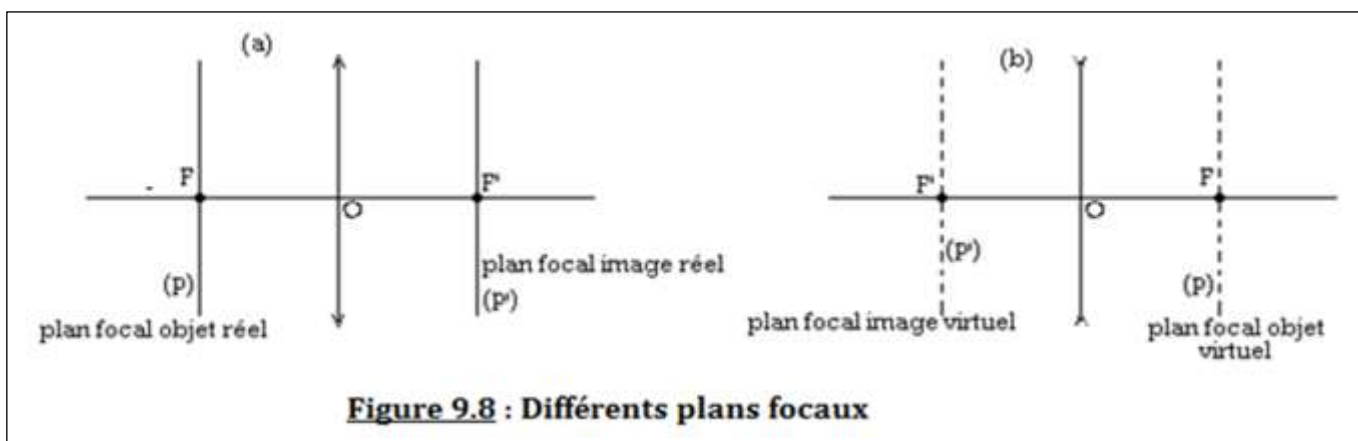


Figure 9.8 : Différents plans focaux

2.4. Axes et foyers secondaires

- On appelle **axe secondaire**, toute droite autre que l'axe principal de la lentille, passant par le centre optique de ladite lentille.
- Le **foyer secondaire** de la lentille, est le point d'intersection entre le plan focal et un axe secondaire.

Sur la figure 9.9 ci-dessous, F_1, F'_1 sont des foyers secondaires pour ces lentilles.

- Un rayon lumineux issu d'un foyer secondaire F_1 , émerge de la lentille parallèlement à l'axe secondaire.
- Un rayon lumineux parallèlement à l'axe secondaire, émerge de la lentille en passant par le foyer secondaire image.

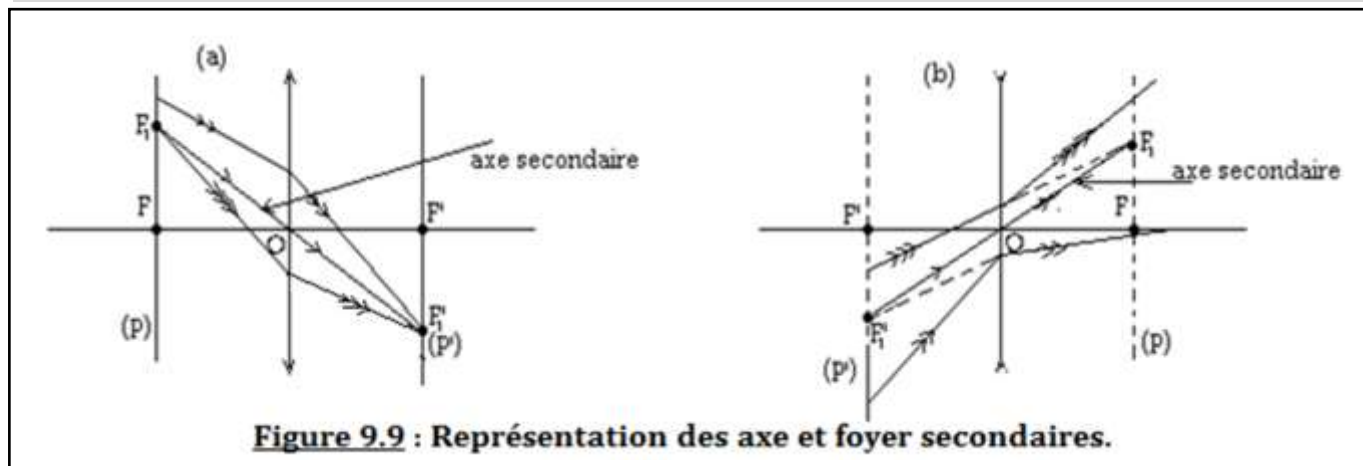


Figure 9.9 : Représentation des axes et foyers secondaires.

2.5. Distance focale et vergence d'une lentille

2.5.1. Distance focale

- La **distance focale f** d'une lentille, est la mesure algébrique du segment $[OF']$.
- La distance focale est généralement notée : $f' = \overline{OF'}$
- On remarque aussi (sur les figures 9.7) que :

$$\overline{OF'} = -\overline{OF} \leftrightarrow f' = -f \quad (9.2)$$

- La relation 9.2 justifie la symétrie de F et F' par rapport à O. La distance focale s'exprime en mètre (m).

2.5.2. Vergence d'une lentille

- L'inverse **C** de la distance focale est appelée **vergence** de la lentille et s'exprime en **dioptries** (δ) :

$$C = \frac{1}{\overline{OF'}} = -\frac{1}{\overline{OF}} \quad (9.3)$$

Conséquence liée à 9.3:

- Si $C < 0 \Rightarrow$ lentille **divergente**
- Si $C > 0 \Rightarrow$ lentille **convergente**

- Pour une lentille mince d'indice de réfraction n, de rayons de courbure R_1 et R_2 (exprimés en mètres), la vergence est donnée par :

$$C = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (9.4)$$

Remarque

- Si l'une des faces de la lentille est un plan, la formule (9.4) deviendra alors :

$$C = \frac{n-1}{R} \quad (9.5)$$

- Si les rayons sont identiques i.e. si $R_1 = R_2 = R$, alors (9.4) deviendra alors :

$$C = \frac{2 \times (n-1)}{R} \quad (9.6)$$

- $R > 0$, si la face est convexe (**qui représente la face bombée d'une lentille**)
- $R < 0$, si la face est concave (**qui représente la face creuse d'une lentille**).

2.5.3. Les techniques focométriques

- La **focométrie** est l'ensemble des techniques qui permettent de déterminer la vergence d'une lentille.

- Certaines de ces techniques sont applicables aux deux types de lentilles (convergente et divergente) d'autres ne le sont qu'aux seules lentilles convergentes.
- Les plus connues sont :
 - La **méthode par neutralisation** (applicable aux deux types de lentilles)
 - La **méthode d'auto collimation** (applicable aux lentilles convergentes)
 - La **méthode de l'objet à l'infini** (applicable aux lentilles convergentes)
 - La **méthode de SILBERMANN** (applicable aux lentilles convergentes)
 - La **méthode de BESSEL** (applicable aux lentilles convergentes)
 - La **méthode de BADAL** (applicable aux deux types de lentilles)
 - La **méthode des points conjugués** (applicable aux deux types de lentilles)

(a) Méthode par neutralisation

- On accole à une lentille L de vergence C, inconnue, une lentille L' de vergence C' de telle sorte que l'ensemble se comporte comme une lame à faces parallèles. On obtient ainsi d'un objet AB, une image virtuelle A'B'.
- On déplace ensuite perpendiculairement à l'axe principal, le système des deux lentilles. On obtient un système de vergence nulle lorsque l'image A'B' reste immobile.
- La vergence C, est alors égale à la - C' : $C = -C'$.

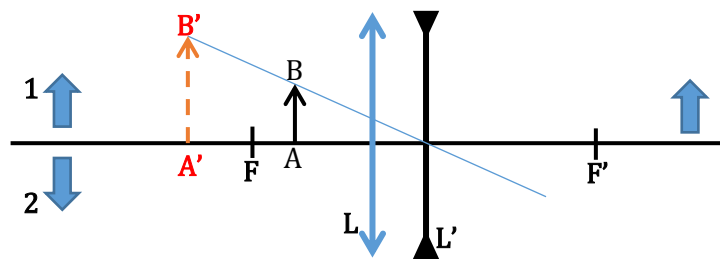


Figure 9.10 : Méthode de neutralisation

(b) Méthode d'auto collimation

- On utilise un miroir M devant lequel on place la lentille L de distance focale f inconnue ; on forme l'image d'un objet AB à travers le système miroir-lentille.
- On déplace l'ensemble {miroir ; lentille} jusqu'à ce que l'image A'B' se forme dans le plan de l'objet.
- On mesure alors la distance lentille objet. Elle correspond à la distance focale f de la lentille L.

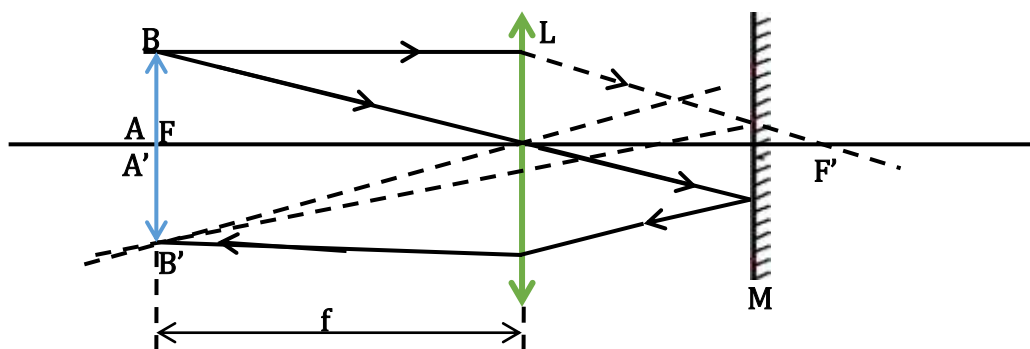


Figure 9.11 : Méthode d'auto collimation

(c) Méthode de l'objet à l'infini

- On utilise une lentille auxiliaire L pour former une image à l'infini d'un objet AB. On interpose entre l'écran et la lentille L₁, une lentille L, de distance focale f inconnue.

- La distance focale f est obtenue en mesurant la distance entre la lentille L et l'écran lorsqu'on forme sur ce dernier, une image nette de l'objet AB .

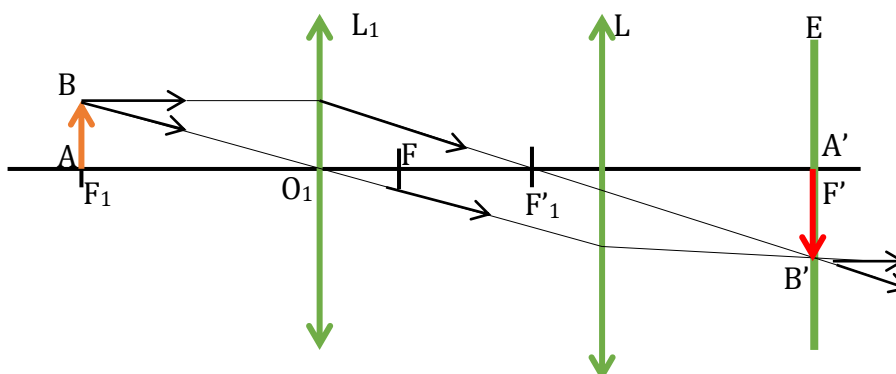


Figure 9.12 : Méthode de l'objet à l'infini

(d) Méthode de Badal

- Cette méthode est bien pratique pour mesurer la focale d'une Barlow ou de la lentille négative d'un doublet. Elle consiste à mesurer le déplacement du plan focal d'une lentille positive quand, sur le trajet de la source de rayons parallèles, on vient introduire la lentille divergente.
- La lentille 1 peut avoir une focale quelconque, compatible avec la longueur du banc, elle n'a pas besoin d'être identique à la lentille 2. La lentille 1, qui peut aussi être un objectif photographique, est située au foyer, en sorte de générer des rayons parallèles ou si l'on préfère des rayons issus d'une source située à l'infini. Une manière pratique de s'assurer qu'elle est bien au foyer, consiste à utiliser la méthode par auto collimation décrite ci-dessus.

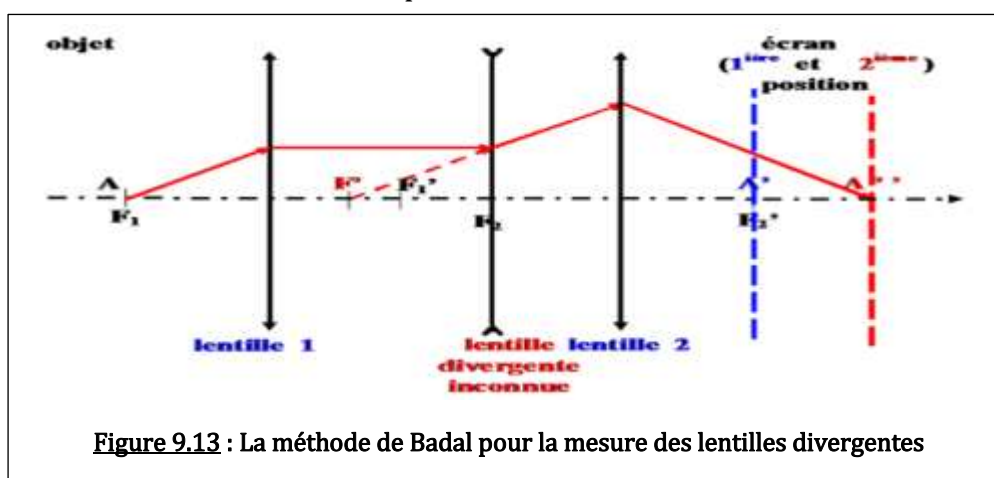


Figure 9.13 : La méthode de Badal pour la mesure des lentilles divergentes

On fait d'abord une première mesure avec la lentille 2 de focale f_2 mais sans la lentille divergente. On note une première position A' sur l'axe optique, foyer de la lentille 2. On introduit ensuite la lentille inconnue. On note alors la position d'un second foyer qui est située en arrière, en A'' . À partir de la différence « d » entre les deux foyers, A' et A'' , on déduit la focale de la lentille divergente par :

$$f_{oc} = -\frac{(f_2)^2}{d} \quad (9.7)$$

Il faut que la focale de la lentille positive 2 soit plus courte en valeur absolue que celle de la lentille divergente. C'est le cas dans un achromat. Si elles sont égales, le faisceau sera parallèle, si elle est plus longue, alors le faisceau sera divergent. Dans ces deux cas, la mesure sera impossible. On gagnera à utiliser une source grossièrement monochromatique, telle une diode LED jaune à 590 nm. On remarquera que la focale f_2 de la lentille convergente est ici au carré,

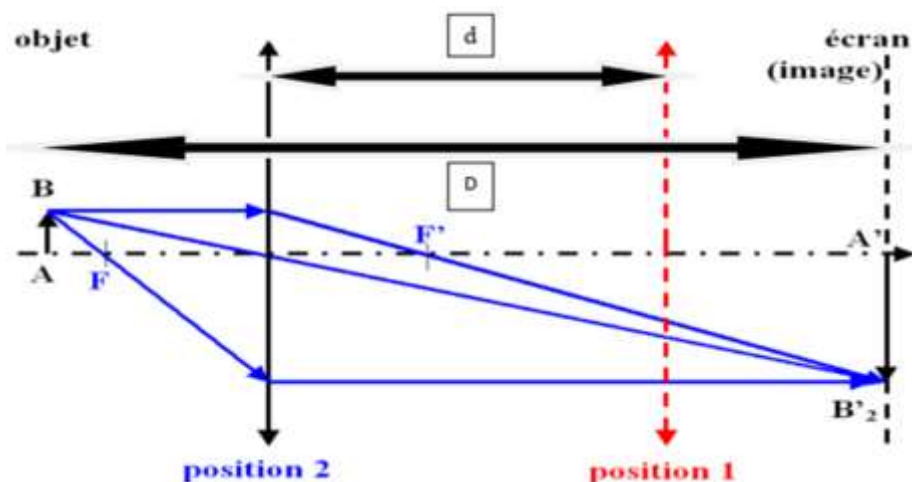
1% d'erreur sur celle-ci entraînera 2% d'erreur sur le résultat. Il est donc utile d'avoir la valeur la plus précise possible, si possible mesurée par la méthode de Bessel.

(e) Méthode de Bessel

- On impose une distance D entre un écran et un objet AB . On cherche les deux positions (1 et 2) de la lentille pour lesquelles on obtient une image $A'B'$ nette sur l'écran.
- Soit d , la distance qui sépare les positions 1 et 2. La distance focale de la lentille utilisée est donnée par la relation :

$$\overline{OF'} = \frac{D^2 - d^2}{4D} \quad (9.8)$$

- Lorsqu'il n'est pas possible d'obtenir les deux positions, on augmente la distance D , et on recommence.



FRIEDRICH WILHELM BESSEL
(1784-1846)

Figure 9.14 : Méthode des deux positions de Bessel

(f) Méthode de Silbermann

- La **méthode de Silbermann**⁽²⁾ est un cas particulier de la méthode de Bessel. On cherche, par tâtonnements, la position de l'écran et de la lentille telle que $d = 0$. La focale est alors égale à $D/4$.

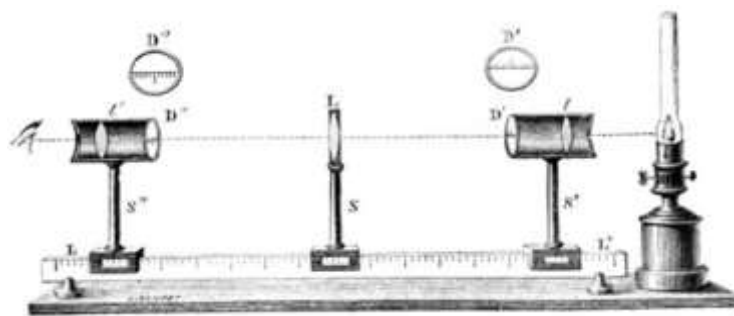


Figure 9.15 : Détection de l'égalité des distances $D'L$ et $D''L$ selon Silbermann

- La méthode de Silbermann consiste à obtenir sur un écran, une image renversée et de même taille que l'objet. La distance objet-image est égale à $4f$.

(1) **Dioptré** : C'est la surface de séparation de deux milieux transparents.

(2) **Johann-Théobald Silbermann** (1806-1865) travailla avec Pouillet et fut préparateur à la faculté des sciences, avant de devenir conservateur des collections du Conservatoire des Arts & Métiers en 1848. On lui doit un focomètre, un pyromètre, un héliostat et d'autres instruments encore.

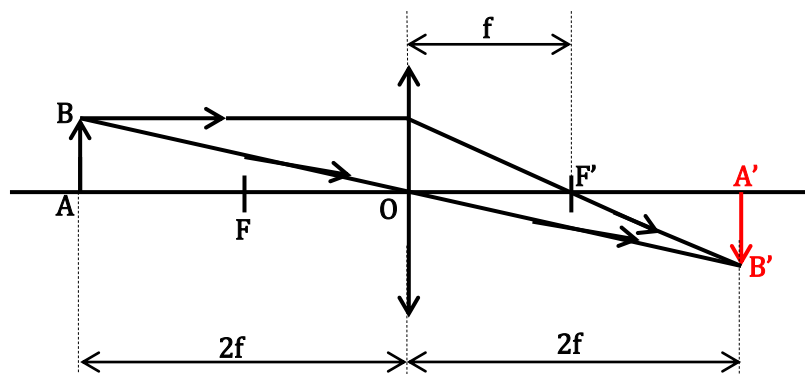


Figure 9.16 : Méthode de Silbermann

3. Marche des rayons lumineux

3.1. Principe de construction

Pour construire l'image d'un objet à travers une lentille, trois rayons sont nécessaires et suffisants :

- Le **rayon incident** (1) passant par B et le centre optique, qui n'est pas dévié.
- Le **rayon incident** (2) parallèle à l'axe optique passant par B qui émerge de la lentille en passant par le foyer image F' .
- Le **rayon incident** (3) passant par B et le foyer objet F qui émerge parallèlement à l'axe optique.

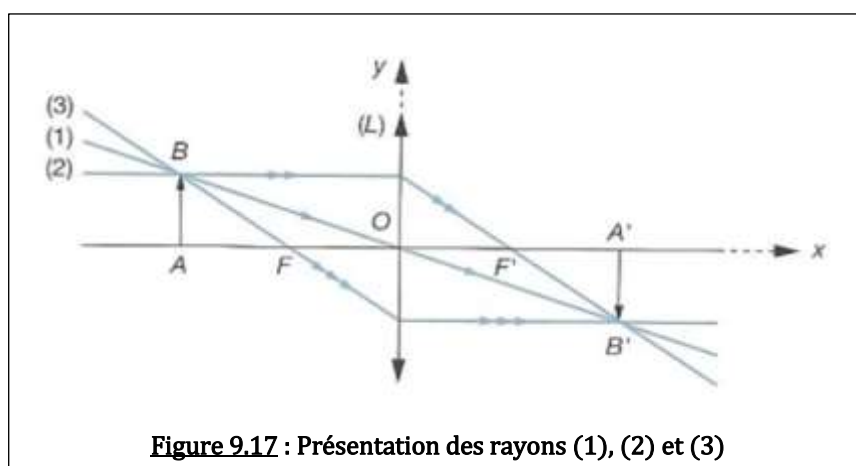


Figure 9.17 : Présentation des rayons (1), (2) et (3)

Remarque

- Les rayons (1) et (2) précédents sont suffisants pour construire l'image d'un objet à travers une lentille.
- Le système étant aplanétique, A' est donc le projeté orthogonal de B' sur l'axe.

3.2. Condition d'obtention d'une image nette (Conditions de Gauss)

- Les lentilles présentent des défauts : aberrations (Dispersion qui s'opèrent entre les divers rayons lumineux émanés d'un même point, lorsqu'ils rencontrent des surfaces courbes qui les réfléchissent ou les réfractent, de sorte qu'ils ne peuvent plus ensuite être concentrés exactement en un même foyer) géométriques, aberrations chromatiques. Pour obtenir des images de bonne qualité (image nette), on doit se placer dans les **conditions de Gauss** :
 - Le faisceau doit traverser la lentille au voisinage du centre optique.
 - Les rayons incidents doivent faire un angle faible avec l'axe principal de la lentille.
- Pour réaliser ces conditions, il faut :
 - Diaphragmer la lentille
 - Observer des objets de petite dimension au voisinage du centre optique.

3.3. Exemples de constructions d'images à travers une lentille

(a) Cas d'une lentille convergente

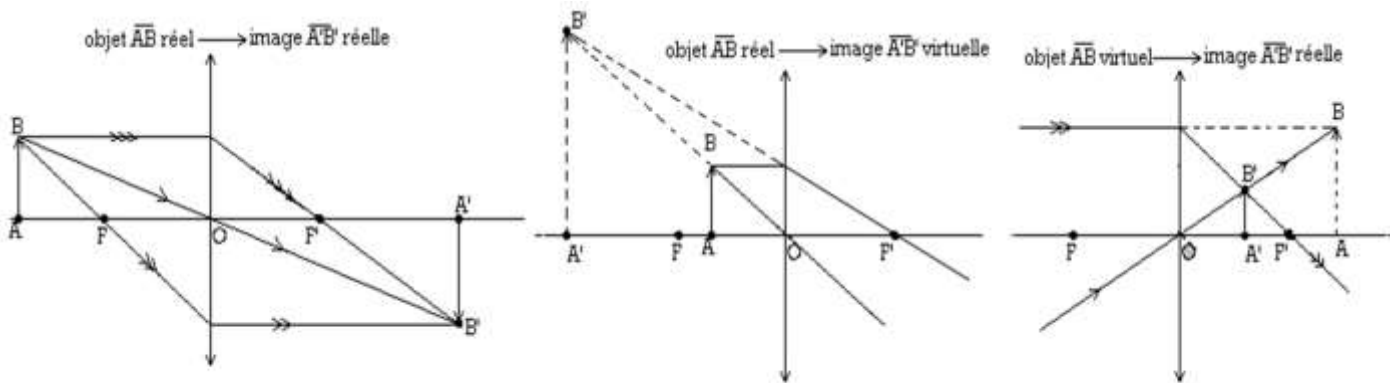


Figure 9.18 : Construction d'image à travers une lentille convergente.

(b) Cas d'une lentille divergente

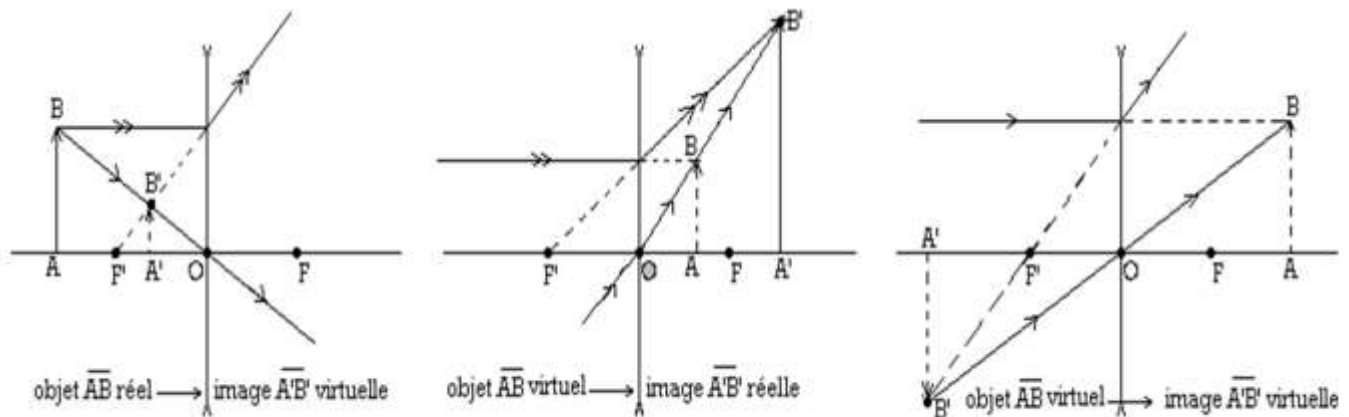


Figure 9.18 : Construction d'image à travers une lentille divergente.

4. Les formules des lentilles (ou formules de Descartes)

4.1. Formule de conjugaison

Elle permet entre autre de déterminer la position $\overline{OA'}$ de l'image $\overline{A'B'}$ par rapport à celle $\overline{OA}$ de l'objet $\overline{AB}$. Elle est donnée par la formule suivante :

$$-\frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OF'}} = C \quad (9.9)$$

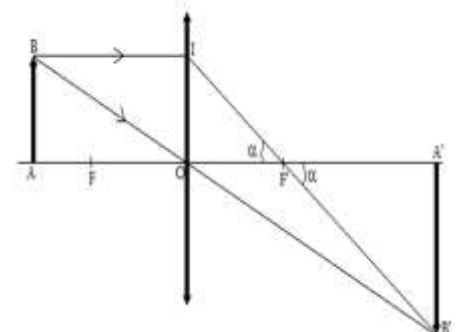
Démonstration

D'après la figure ci-contre, on a :

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{F'A'}} = \frac{\overline{OI}}{\overline{F'O}} \\ \frac{\overline{OB'}}{\overline{OB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \Rightarrow \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}} = \frac{\overline{F'O} + \overline{OA'}}{\overline{F'O}} = 1 + \frac{\overline{OA'}}{\overline{OF'}} \\ \overline{OI} = \overline{AB} \end{cases}$$

D'où, en multipliant la dernière égalité par $\frac{1}{\overline{OA'}}$, on obtient,

$$\frac{1}{\overline{OA'}} \left(\frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = 1 + \frac{\overline{OA'}}{\overline{OF'}} \right) \Rightarrow \frac{1}{\overline{OF'}} = C = \frac{1}{\overline{OA'}} + \frac{1}{\overline{OA}}$$



Conséquences

- ✖ Si $\overline{OA} > 0$, alors l'objet est virtuel et dans le cas contraire (i.e. $\overline{OA} < 0$), il est réel.
- ✖ Si $\overline{OA'} > 0$, alors l'image est dite réelle et dans le cas contraire (i.e. $\overline{OA'} < 0$), elle est virtuelle.

4.2. La formule de grandissement

Elle permet entre autre de déterminer la taille ou la grandeur $\overline{A'B'}$ de l'image $\overline{A'B'}$ par rapport à celle $\overline{AB}$ de l'objet $\overline{AB}$. Elle est donnée par :

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \quad (9.10)$$

Conséquences

- ✖ Si $\gamma < 0$, alors l'image est renversée (objet et image sens contraires) mais de même nature.
- ✖ Si $\gamma > 0$, alors l'image est droite (objet et image même sens) mais de natures différentes.

5. Association des lentilles : Théorème des vergences

- Deux lentilles minces (O_1, f'_1) et (O_2, f'_2) sont dites « accolées » ssi :

$$O_1O_2 \ll |f'_1| \text{ \& } |f'_2| \quad (9.11)$$
- Comme les lentilles sont accolées, par hypothèse : $O_1 \approx O_2 \approx O$.

Considérons l'association de deux lentilles convergente L_1 et L_2 distantes de $d = O_1O_2$. Elles ont pour distances focales respectives $\overline{O_1F'_1}$ et $\overline{O_2F'_2}$. On se propose de construire l'image d'un objet AB à travers ce système de deux lentilles accolées et de déterminer la vergence de la lentille unique correspondante.

Remarque

Pour construire l'image $A'B'$ d'un objet AB donnée par le système de deux lentilles, on construit en premier l'image A_1B_1 de AB à travers la lentille L_1 ; A_1B_1 sera objet pour la lentille L_2 ; son image $A'B'$ est également l'image de AB donnée par le système $\{L_1, L_2\}$.

Données : $\overline{O_1F'_1} = 2\text{cm}$; $\overline{O_1A} = -3\text{cm}$; $\overline{AB} = 2\text{cm}$; $\overline{O_2F'_2} = 4\text{cm}$; $\overline{O_1O_2} = 7\text{cm}$.

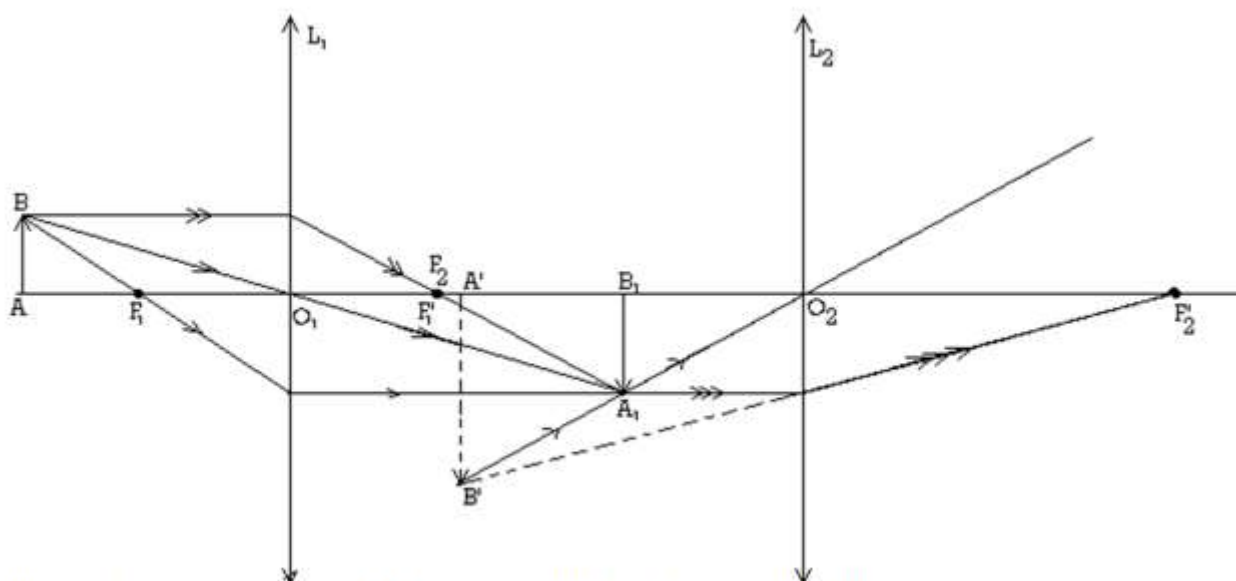


Figure 9.19 : Construction d'image dans un système de 2-lentilles convergentes

- Formule de conjugaison et de grandissement:

$$\text{Lentille } L_1 : -\frac{1}{O_1A} + \frac{1}{O_1A_1} = \frac{1}{O_1F_1} = C_1 \quad (9.12) \quad \gamma_1 = \frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} \quad (9.13)$$

$$\text{Lentille } L_2 : -\frac{1}{O_2A_1} + \frac{1}{O_2A'} = \frac{1}{O_2F_2} = C_2 \quad (9.14) \quad \gamma_2 = \frac{\overline{O_2A'}}{\overline{O_2A_1}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A_1B_1}} \quad (9.15)$$

$$\text{Grandissement total : } \gamma = \gamma_1 \times \gamma_2 = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \quad (9.16)$$

$$\text{Vergence } C \text{ totale : } C = C_1 + C_2. \quad (9.17)$$

- Des lentilles sont dites **accollées**, lorsque leurs axes principaux et leurs centres optiques sont supposés confondus.
- Théorème des vergences** : « Plusieurs lentilles accollées sont équivalentes à une lentille unique de vergence **C** égale à la somme algébrique des vergences de chaque lentille constituant le système :

$$C = \sum_{i=1}^n C_i = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (9.18)$$

6. Applications des lentilles

- On utilise l'association de deux lentilles dans les appareils d'optique de grande qualité pour corriger les problèmes d'aberration chromatique. On réalise un « achromat » (sans couleur). Ceci est illustré sur la figure suivante.

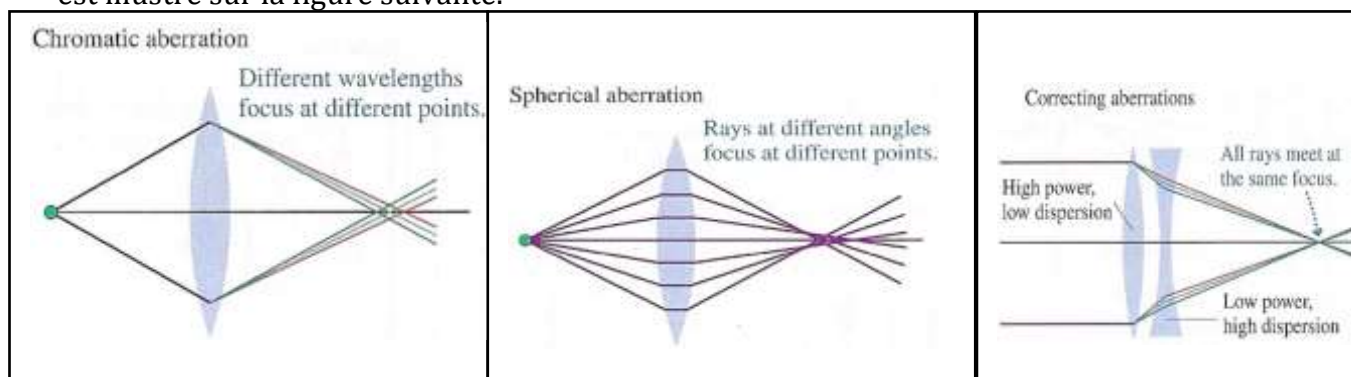


Figure 9.20: Chromatic aberration and spherical aberration prevent simple lenses from forming perfect images.

- Les lentilles sont utilisées dans de très nombreux appareils tels que la loupe, le microscope, la lunette astronomique, l'appareil photographique, le projecteur de diapositive ou de cinéma, les verres correcteurs pour les défauts d'accommodation.

Exemples

- On place à 3 cm derrière une lentille divergente de vergence -20 dioptries, un objet $\overline{AB}$ de hauteur $\overline{AB} = 1$ cm.
 - Donner la nature de l'objet $\overline{AB}$. Justifier votre réponse.
 - Représenter à l'échelle 1 : 1, l'objet $\overline{AB}$ ainsi que son image $\overline{A'B'}$ obtenue à travers cette lentille.
 - Déterminer graphiquement, la nature, la taille et la position de l'image $\overline{A'B'}$.
 - Retrouver les résultats de la question (2.3.) par calculs.
- Une lentille (L_1) mince biconcave possède deux rayons de courbure identique et égaux à R.
 - Représenter la lentille biconcave et préciser sa nature.
 - Déterminer la vergence C_1 de cette lentille si elle est taillée en verre d'indice de réfraction $n = 1,33$ et de rayon de courbure égal à 16,5 cm.



2.3. À gauche de la lentille (L_1) on place une lentille (L_2) divergente de distance focale $\overline{O_2F'_2} = -30\text{cm}$ les deux lentilles sont ainsi distantes de $\overline{O_2O_1} = 80\text{cm}$. À 40 cm derrière (L_1), on place un objet $\overline{AB}$ de hauteur 1 cm, perpendiculairement à l'axe optique, le point A étant situé sur l'axe.

2.3.1. Déterminer les caractéristiques (sens, nature, taille, position) de l'image $\overline{A_1B_1}$ obtenue de l'objet $\overline{AB}$ à travers (L_1).

2.3.2. Quel rôle joue $\overline{A_1B_1}$ pour (L_2) ?

2.3.3. Déterminer les caractéristiques (sens, nature, taille, position) de l'image finale $\overline{A'B'}$ obtenue de $\overline{A_1B_1}$ à travers (L_2).

2.3.4. Représenter sur le même schéma, (L_1), (L_2), $\overline{AB}$, $\overline{A_1B_1}$ et $\overline{A'B'}$.

Échelle : 1 : 1 sur la verticale ; 1cm → 10 cm sur l'horizontale.

3. Un objet situé au double de la distance focale, devant une lentille convergente, occupe une position particulière.

3.1. Montrer quelle est cette particularité en exprimant la position de l'image en fonction de la distance focale.

3.2. En déduire la distance séparant l'objet de l'image en fonction de la distance focale.

3.3. Calculer le grandissement dans cette situation et décrire (sens et nature) l'image.

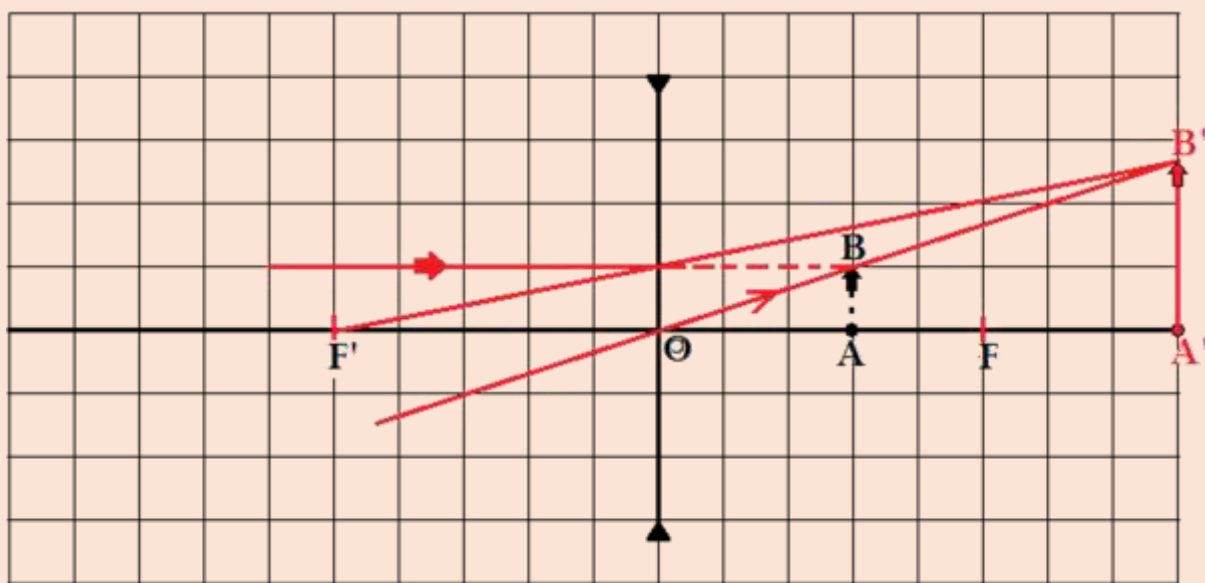
3.4. Comment évoluent la position et la taille de l'image si l'objet s'éloigne de la lentille ? On pourra s'aider d'un schéma.

Solution

1. Données : $\overline{OA} = 3\text{cm}$; $C = -20\delta$; $\overline{AB} = 1\text{cm}$

1.1. Étant donné que $\overline{OA} = 3\text{cm} > 0$, alors, l'objet est **virtuel**.

1.2. Représentons à l'échelle 1 : 1, l'objet AB et son image A'B'.



1.3. Déterminons graphiquement (concernant l'image $\overline{A'B'}$) :

- ♦ La nature : L'image s'est formée derrière la lentille elle est donc **réelle**.
- ♦ La position : $\overline{OA'} = 8\text{cm}$
- ♦ La taille : $\overline{A'B'} \cong 2,7\text{cm}$

1.4. Retrouvons les résultats précédents par calculs.

- Position (formule de conjugaison) :

$$\overline{OA'} = \frac{\overline{OF'} \times \overline{OA}}{\overline{OF'} + \overline{OA}} \quad \underline{\text{AN}} : \overline{OA'} = 7,5\text{cm} \approx 8\text{cm}$$

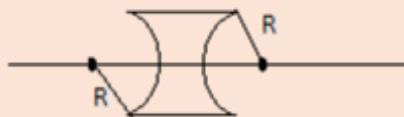
- Taille (formule de grandissement) :

$$\overline{A'B'} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \times \overline{AB} \quad \underline{\text{AN}} : \overline{A'B'} = 2,7\text{cm}$$

- Nature : $\overline{OA'} = 8\text{cm} > 0$, image réelle et droite par rapport à l'objet.

2. Une lentille (L_1) mince biconcave possède deux rayons de courbure identique égaux à R .

2.1. Représentons la lentille biconcave et précisons sa nature :



Nature : Lentille divergente.

2.2. Déterminons la vergence C_1 de cette lentille : $n = 1,33$; $\overline{R} = -16,5\text{ cm} = -16,5 \cdot 10^{-2}\text{ m}$

Par définition, on a : $C_1 = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{2 \times (n-1)}{R}$ car $R_1 = R_2 = R$. AN : $C_1 = -4\delta$

2.3. À gauche de la lentille (L_1) on place une lentille (L_2) divergente de distance focale $\overline{O_2F'_2} = -30\text{cm}$ les deux lentilles sont ainsi distantes de $\overline{O_2O_1} = 80\text{cm}$. À 40 cm derrière (L_1), on place un objet $\overline{AB}$ de hauteur 1 cm, perpendiculairement à l'axe optique, le point A étant situé sur l'axe.

2.3.1. Déterminons les caractéristiques (sens, nature, taille, position) de l'image $\overline{A_1B_1}$ obtenue de l'objet $\overline{AB}$ à travers (L_1) :

- Position : $\overline{O_1A_1} = \frac{\overline{O_1F'_1} \times \overline{O_1A}}{\overline{O_1F'_1} + \overline{O_1A}} = \frac{\overline{O_1A}}{1 + C_1 \times \overline{O_1A}}$ AN : $\overline{O_1A_1} = -67\text{cm}$

- Nature : image virtuelle car $\overline{O_1A_1} < 0$.

- Sens : image renversée par rapport à l'objet.

- Taille : $\overline{A_1B_1} = \frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}} \times \overline{AB}$ AN : $\overline{A_1B_1} = -1,675\text{ cm} \approx -1,7\text{cm}$

2.3.2. $\overline{A_1B_1}$ joue le rôle d'objet pour (L_2).

2.3.3. Déterminons les caractéristiques (sens, nature, taille, position) de l'image finale $\overline{A'B'}$ obtenue de $\overline{A_1B_1}$ à travers (L_2).

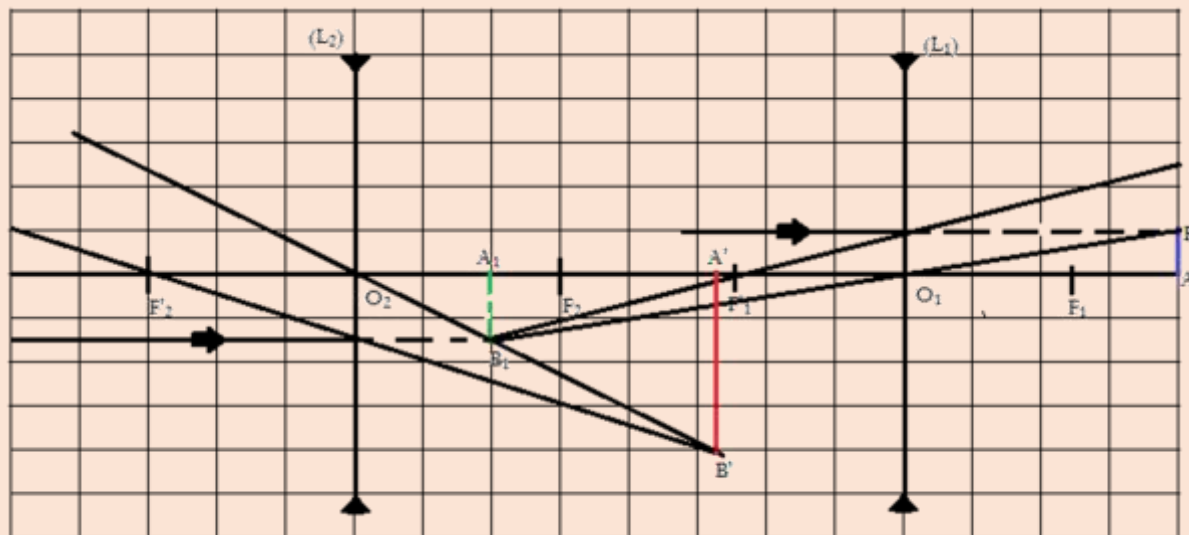
- Sens : image renversée par rapport à l'objet $\overline{AB}$ et de même sens que $\overline{A_1B_1}$.

- Nature : image réelle

- Position : $\overline{O_2A'} = \frac{\overline{O_2F'_2} \times \overline{O_2A_1}}{\overline{O_2F'_2} + \overline{O_2A_1}} = \frac{\overline{O_2F'_2} \times (\overline{O_2O_1} + \overline{O_1A_1})}{\overline{O_2F'_2} + (\overline{O_2O_1} + \overline{O_1A_1})}$ AN : $\overline{O_2A'} \approx 23\text{ cm}$

- Taille : $\overline{A'B'} = \frac{\overline{O_2A'} \times \overline{A_1B_1}}{\overline{O_2A_1}} = \frac{\overline{O_2A'} \times \overline{A_1B_1}}{\overline{O_2O_1} + \overline{O_1A_1}}$ AN : $\overline{A'B'} = -3\text{cm}$

2.3.4. Représentons sur le même schéma, (L_1) , (L_2) , $\overrightarrow{AB}$, $\overrightarrow{A_1B_1}$ et $\overrightarrow{A'B'}$



3. Un objet AB, situé au double de la distance focale, devant une lentille convergente, occupe une position particulière : $\overline{OA} = -\overline{OF'}$ (1)

3.1. Montrons cette particularité en exprimant la position de l'image en fonction de la distance focale :

$$-\frac{1}{OA} + \frac{1}{OA'} = \frac{1}{OF'} \Rightarrow \overline{OA'} = 2\overline{OF'}$$

3.2. En déduire la distance séparant l'objet de l'image en fonction de la distance focale.

$$\text{On a : } \overline{AA'} = \overline{AO} + \overline{OA'} = 4 \times \overline{OF'}$$

3.3. Calculons le grandissement dans cette situation et décrire (sens et nature) de l'image :

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -1$$

Description de l'image :

- Taille : objet et image, même taille.
- Nature : image réelle.
- Sens : $\gamma < 0$, l'objet et l'image sont en sens inverse.

3.4. Si l'objet s'éloigne de la lentille, la distance objet – lentille s'agrandie et $\gamma < 1 \Rightarrow OA' > OA$ où $AB > A'B'$, par conséquent l'objet se rapproche de la lentille et sa taille diminue.

7. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Lentille	Lens.
Lentille sphérique mince	Thin spherical lens.
Écran	Screen
Distance focale	Focal length

Sentence

Vergence's theorem: "Several contiguous lenses are equivalent to a single lens of vergence C equal to algebraic sum of vergences of each lens constituting the system."



EXERCICES DE LA LEÇON 9 : LES LENTILLES SPHÉRIQUES MINCES

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS

- Définir : lentille sphérique ; lentille mince ; vergence ; focométrie ; distance focale.
- Énoncer le théorème des vergences.
- Énoncer les conditions d'approximation de Gauss sur la marche des rayons lumineux. Que se passerait-il si ces conditions ne sont pas respectées ?

- Citer les rayons lumineux permettant de construire l'image d'un objet à travers une lentille.

- Recopier et compléter les phrases suivantes :

5.1. On appelle diamètre d'ouverture d'une lentille, le diamètre du cercle qui.....la lentille.

5.2. On appelle.....d'une lentille mince, la droite qui joint les centres de courbure de ses deux faces.

5.3. Les lentilles à bords.....sont convergentes tandis que celles à bords épais sont.....

5.4. On appelle.....image d'une lentille, le point où converge ou semble converger le faisceau émergent de la lentille.

5.5. La distance focale d'une lentille est.....du segment $[OF']$. Elle s'exprime en.....Son inverse est appelée.....de la lentille et s'exprime en.....

5.6. La formule.....permet de déterminer la position de l'objet de l'image par rapport à une lentille.

- Répondre par vrai ou faux et corriger les affirmations fausses

1. Les lentilles à bords épais sont toutes convergentes.

2. L'image donnée par une lentille convergente d'un objet réel AB s'éloigne si on rapproche la lentille de l'objet.

3. Une lentille divergente peut donner d'un objet réel, une image virtuelle.

4. La méthode de BESSEL est une méthode focométrie.

5. On peut construire l'image d'un objet à travers une lentille, en utilisant seulement deux rayons : le rayon parallèle à l'axe et le rayon passant par le centre optique.

6. Le sens de propagation des rayons lumineux est celui des x croissants.

7. Le centre optique est le seul point optique pour lequel tout rayon incident émerge sans être dévié.

8. Lorsque $\gamma > 0$, l'objet et l'image sont de sens contraires.

9. Lorsque $OA = OA'$, alors $\gamma = 1$.

10. Pour une image égale au double de son objet, le grandissement γ vaut 4.

- Question à choix multiples (QCM)

1. Selon la méthode de BESSEL, la distance focale f' est donnée par :

$$(a) \overline{OF'} = f' = \frac{D^2 - d^2}{4D}$$

$$(b) \overline{OF'} = f' = \frac{d^2 - D^2}{4D}$$

$$(c) \overline{OF'} = f' = \frac{D}{4}$$

- La vergence d'une lentille est d'autant plus grande :

(a) Si la distance focale est d'autant plus petite.

(b) Si la distance focale est d'autant plus grande.

(c) Si elle est égale à la distance focale.

- Le rayon de courbure d'un plan est égal à :

(a) 0 ;

(b) L'infini.

(c) Aucune réponse n'est juste.

- Le grandissement γ d'un objet vaut 4. Dans ce cas :

(a) L'objet est 4 fois plus grand que son image.

(b) L'objet est 4 fois moins grand que son image.

(c) L'objet est égal à son image.

- Le signe de $\overline{OA'}$ nous renseigne sur la nature de :

(a) La lentille;

(b) L'objet ;

(c) L'image.

- Le signe de la vergence C nous renseigne sur la nature de :

(a) L'image ;

(b) L'objet ;

(c) La lentille.

- Le signe de $\overline{OA}$ nous renseigne sur la nature de :

(a) L'image ;

(b) L'objet ;

(c) La lentille.

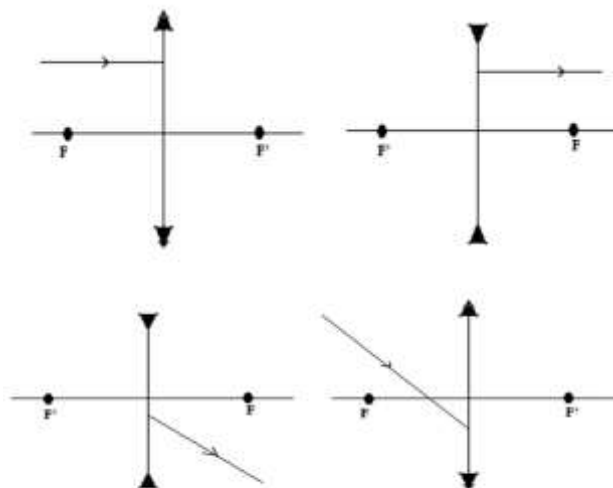
- Pour un système de lentilles accolées, si la vergence totale du système est négative, alors :

(a) Le système est divergent ;

(b) Le système est convergent ;

(c) Ni l'un ni l'autre.

- Reproduire et compléter la marche des rayons incident et émergent dans les cas ci-dessous.



**EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE**

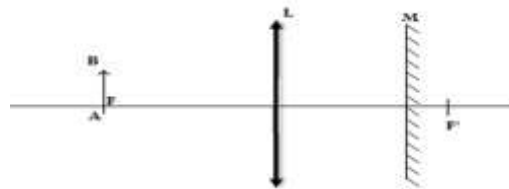
- On place sur un même axe deux lentilles minces L_1 et L_2 à 16 cm l'une de l'autre. La lumière arrive sur L_1 et émerge par L_2 . L_1 est une lentille convergente de distance focale $f_1 = 10$ cm. L_2 est une lentille divergente de distance focale $f_2 = -4$ cm.
À quelle distance de L_1 doit-on placer un petit objet plan perpendiculaire à l'axe pour en obtenir une image à l'infini ?
- Un objet AB est placé devant une lentille convergente de distance focale 8,0 cm. Le point A est situé sur l'axe principal de la lentille, à une distance OA du centre optique O de la lentille telle que $OA = -20$ cm.
 - Après construction de l'image A'B' de l'objet AB, déterminer graphiquement :
 - La position $\overline{OA'}$ de l'image A'B'
 - Le grandissement γ de cette image.
 - Retrouver les résultats précédents par calcul.
- Un timbre-poste est observé à travers une lentille mince de vergence -4δ .
 - Montrer que cette lentille donne toujours d'un objet réel, une image virtuelle.
 - Construire l'image A'B' de l'objet AB.
 - Où situer l'objet par rapport à la lentille pour que l'image qu'elle en donne ait un grandissement de 0,5 ?
- Un ménisque d'indice $n = 1,5$ est assimilable à une lentille dont la première face (1) a pour rayon de courbure $R_1 = 0,10$ m et la seconde face a pour rayon de courbure $R_2 = \frac{2}{3} R_1$.
 - Calculer la vergence C de cette lentille, puis sa distance focale f.
 - Refaire les calculs précédant, en permutant l'ordre des deux faces. Conclure.
- Un système est constitué d'une lentille convergente L_1 associée à une lentille divergente L_2 dont les axes principaux coïncident ; le système ainsi constitué est appelé téléobjectif. Les lentilles L_1 et L_2 ont pour vergences respectives $C_1 = 10\delta$ et $C_2 = -10\delta$. La distance O_1O_2 des centres optiques est 8 cm. Un objet AB de hauteur $h = 0,75$ m, est placé à une distance $d = 200$ m de O_1 sur l'axe principal.
 - Déterminer les caractéristiques de l'image A_1B_1 donnée par la première lentille L_1 .
 - Quel rôle joue A_1B_1 pour la seconde lentille L_2 ?
 - Déterminer les caractéristiques de l'image A'B' donnée par la seconde lentille L_2 .
 Déterminer la position de la lentille convergente unique permettant d'arriver au même résultat. Quelle serait sa distance focale ?
- La vergence d'une lentille convergente L_1 est $C_1 = 8\delta$. On place derrière cette lentille, à 10 cm du centre de celle-ci, un objet AB de 2 cm de hauteur.

- Quelle est la nature de l'objet AB ? Justifier votre réponse.
- Donner toutes les caractéristiques (position, taille, nature, sens) de l'image A'B' de l'objet AB.
- On accole à L_1 , une seconde lentille L_2 de vergence C_2 et le système ainsi formé a une vergence $C = 5\delta$.
 - Énoncer le théorème des vergences.
 - En appliquant ce théorème, déterminer la vergence de la lentille L_2 . Quelle est sa nature ?
 - Que se passerait-il, sur l'image A'B', si on plaçait la lentille L_2 avant la lentille L_1 ? Justifier par construction (sans tenir compte de l'échelle).
 - Même question si on plaçait L_1 avant L_2 .
- Un objet situé au double de la distance focale, devant une lentille, occupe une position particulière.
 - Montrer qu'elle est cette particularité, en calculant la position de l'image.
 - En déduire la distance séparant l'objet de l'image.
 - Calculer le grandissement dans cette situation et décrire l'image.
 - Comment évoluent la position et la taille de l'image, si l'objet s'éloigne de la lentille ? On pourra s'aider d'un schéma.
 - Même question si l'objet se rapproche de la lentille.

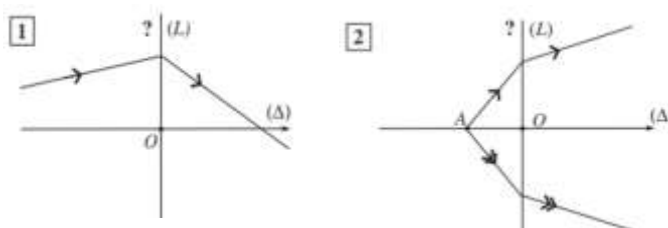
PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES**Situation 1 : Méthode d'auto collimation**

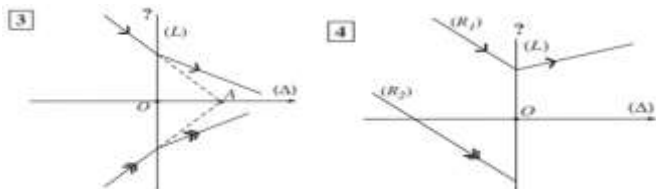
Pour déterminer la vergence d'une lentille L, on utilise la méthode d'auto collimation qui consiste à utiliser un miroir M devant lequel on place la lentille L de distance focale f , inconnue ; on forme l'image d'un objet AB à travers le système miroir-lentille. On déplace l'ensemble lentille-miroir jusqu'à ce que l'image A'B' se forme dans le plan de l'objet. On mesure alors la distance lentille - objet : elle correspond à la distance focale f de la lentille L.

- Construire la marche d'un faisceau lumineux issu d'un point de l'objet lumineux utilisé. Voir figure.
- La distance entre l'image et la lentille L, est de 8 cm. Quelle est la vergence de la lentille L ?

**Situation 2 : Tracer des rayons et caractérisation des lentilles.**

On considère les figures suivantes.





1. Dans les quatre situations représentées ci-dessus, à l'aide d'une série de constructions graphiques qu'il faudra justifier :

- déterminer la position du foyer objet F et du foyer image F' de chaque lentille
- conclure quant à la nature de chaque lentille (et compléter sa représentation graphique).

2. Sur la figure 2, quelle est la nature et la position de l'image A0 de A à travers (L) ?

3. Même question pour la figure 3.

4. Compléter la figure 4 en représentant le rayon émergent provenant du rayon incident (R₂) (sur le schéma (R₂) est parallèle à (R₁))

Situation 3 : Méthode des points conjugués

Soient O le centre optique d'une lentille convergente L, F' son foyer principal image, A et A' respectivement un point objet et son point image situés sur l'axe principal de L. Une étude expérimentale de la variation de la position de A' en fonction de celle de l'objet A, a donné le tableau ci-dessous :

$\overline{OA}$ (cm)	$\overline{OA'}$ (cm)
- 30	+ 150
- 35	+ 87
- 40	+ 67
- 45	+ 56
- 50	+ 50
- 55	+ 46
- 60	+ 43
- 65	+ 40,5
- 70	+ 39

1. Écrire la formule de conjugaison pour cette lentille.
2. Tracer la courbe de la relation $\frac{1}{\overline{OA'}} = f \left(\frac{1}{\overline{OA}} \right)$
3. Donner la nature de cette courbe et son ordonnée à l'origine.
4. En déduire la vergence et la distance focale de cette lentille.

Situation 4 : Méthode de Bessel

Méthode de **BESSEL** : On dispose d'un objet AB dont on veut projeter une image A'B' sur un écran (E), situé à une distance D de l'objet AB. Pour ce faire, on dispose d'une lentille convergente de distance focale f'. Voir figure.

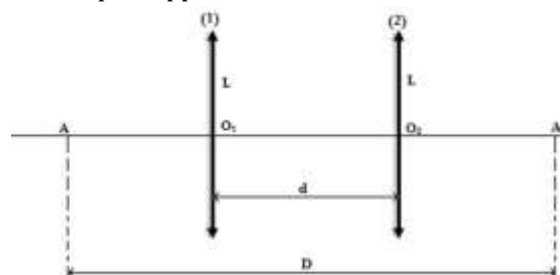
1. Rappeler la définition de la focométrie.
2. Montrer qu'une projection n'est possible que si $D \geq 4f'$.
3. Montrer que si $D > 4f'$, alors, il existe deux positions de la lentille permettant d'obtenir une image nette de l'objet AB sur l'écran (E).

4. Montrer que si ces deux positions sont distantes de d, alors, la distance focale de la lentille est donnée par la relation :

$$f' = \frac{D^2 - d^2}{4D}$$

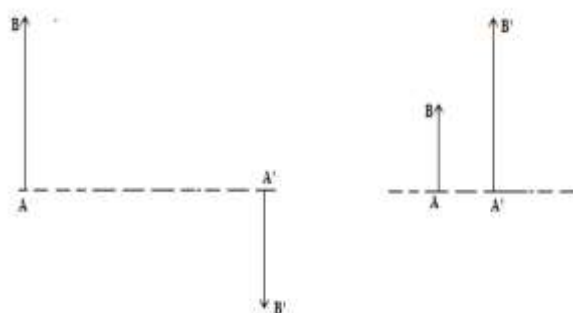
5. On diminue alors D de façon à n'obtenir qu'une seule position permettant de réaliser cette projection.

- (a) Que vaut alors D ?
- (b) Quel nom donne-t-on à cette configuration ?
- (c) Donner un inconvénient et un intérêt de cette méthode par rapport à celle de DESSEL.



Situation 5 : Construction et caractérisation

Déterminer la position, les foyers et la nature des lentilles minces, formant de l'objet AB, l'image A'B' dans les cas de figure ci-dessous, en tenant compte du sens de propagation de la lumière.



Situation 6 : Comparaison de méthodes focométriques

Expliquer, avec schémas à l'appui, la différence entre la méthode de Bessel et la méthode de Silbermann.

Situation 7

Une lentille donne d'un objet situé à l'infini, une image réelle située à 25 cm en arrière de cette lentille.

1. Déterminer sa vergence et sa distance focale.
2. Déterminer ses rayons de courbures identiques, sachant qu'elle est biconvexe d'indice $n = 3/2$.

Situation 8

Une lentille donne d'un objet virtuel situé à 30 cm de son centre, une image virtuelle située à 60 cm du même centre.

1. Dire, en justifiant, de quel type de lentille s'agit-il ? Calculer sa vergence.
2. Calculer son rayon de courbure sachant qu'elle est plan concave d'indice $n = 3/2$.



Leçon 10

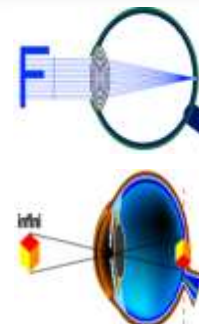
L'ŒIL RÉDUIT



ACTIVITÉS

Activité

L'œil normal, donne naturellement d'un objet lumineux très éloigné, une image nette sur la rétine. Cependant, certaines anomalies de l'œil peuvent déplacer cette image de la rétine et la vision devient floue.



📖 Après avoir cité ces anomalies, expliquer comment chacune d'elle se manifeste.

📖 Qu'appelle-t-on accommodation de l'œil ?

Objectifs

- Connaître au minimum neuf (09) parties d'un œil et en donner leur rôle.
- Décrire l'œil réduit et expliquer le phénomène d'accommodation
- Connaître les solutions de correction aux défauts d'accommodation de l'œil.

1. L'œil réduit, description et définition des points particuliers PP et PR

L'œil a sensiblement la forme d'une **sphère** de **24 mm** de diamètre, complété par l'avant par une **calotte** sphérique de **rayon 8 mm**. L'ensemble est limité par une membrane très résistante appelée **sclérotique** d'environ **0,5mm** d'épaisseur, qui est transparente au niveau de la calotte sphérique et constitue la **cornée**. L'œil est aussi le **récepteur** physiologique le plus perfectionné qui existe. La sclérotique est recouverte en arrière par une membrane : la **choroïde** qui se prolonge vers l'avant pour donner le **muscle ciliaire** dont le rôle est de maintenir le **cristallin**.

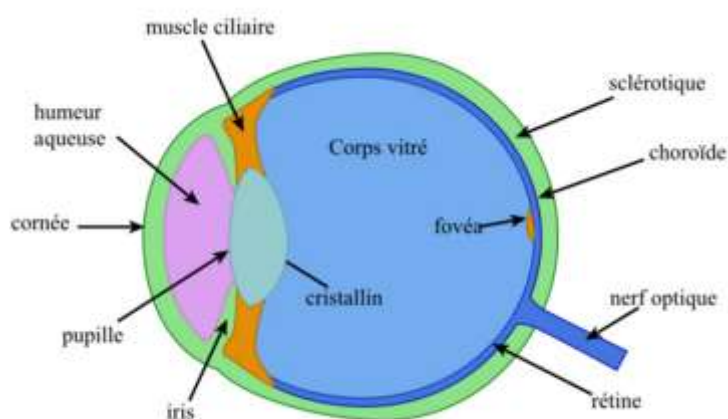


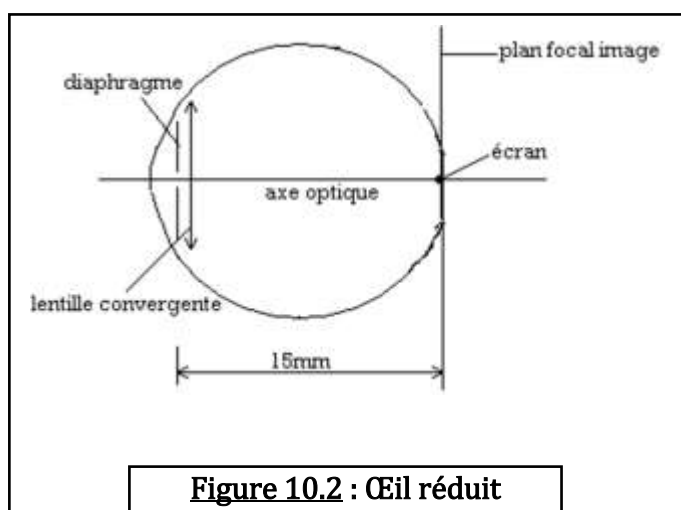
Figure 10.1 : Coupe schématique de l'œil.

L'intérieur de la choroïde est tapissé par une **membrane nerveuse** : la **rétine** qui est constituée de **cellules de deux types différents** : les **cônes** et les **bâtonnets** et dont le rôle est de transformer l'**excitation lumineuse** en **influx nerveux**.

L'intérieur du globe oculaire est divisé en deux parties séparées par le cristallin (**qui est assimilable à une lentille biconvexe d'indice moyen égal à 1,42**) :

- La **cornée** (**cornea**) : c'est la membrane dure et transparente d'indice de réfraction $n = 1,38$. C'est le dioptré d'entrée de l'œil. La cornée, l'iris, le cristallin, définissent la **chambre intérieure de l'œil**, remplie d'un liquide appelé **humeur aqueuse**. L'iris permet à l'œil de **diaphragmer** et définit la **pupille** (**pupil**).
- L'**humeur aqueuse** : c'est un liquide clair d'épaisseur $e = 4 \text{ mm}$ et d'indice de réfraction $n' = 1,33$.
- L'**iris** : c'est l'organe responsable de donner la couleur à l'œil. Son ouverture centrale est la **pupille** par laquelle la lumière entre dans l'œil. Son diamètre est compris entre **2 mm** (**dans la lumière**) et **8 mm** (**dans l'obscurité**). Le système **iris – pupille** joue le rôle d'objectif d'un appareil photo.
- Le **cristallin** : c'est la lentille biconvexe convergente d'indice $n'' = 1,42$. Il est retenu par les **muscles ciliaires**, organes de fonctionnement de l'œil. Il se comporte telle une **pellicule** de photographie.
- L'**humeur vitrée** : c'est une substance gélatineuse (**qui a la texture d'une préparation translucide élastique**) d'indice $n' = 1,33$ et d'épaisseur $e' = 15 \text{ mm}$.
- La **rétine** : c'est une membrane mince au fond de l'œil ; elle est formée de **cellules photosensibles** : c'est l'**écran** de l'œil. Elle joue le rôle de **chambre noire** d'un appareil photographique.
- Le **nerf optique** : c'est l'organe qui transmet les sensations visuelles au cerveau.
- Etc.

1.1. Schéma annoté de l'œil réduit



Nota Bene :

L'œil donne sur la rétine une image renversée d'un objet. Et c'est le cerveau qui la remet à l'endroit.

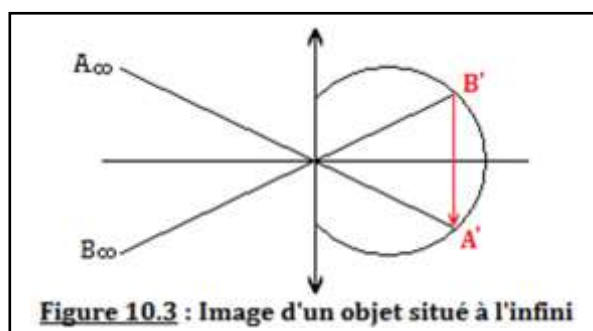
L'œil réduit est un système optique comprenant :

- Un **diaphragme** : l'iris dont l'ouverture est la pupille.
- Une **lentille convergente** (cristallin) ;
- Un **écran** (rétine)

La distance **cristallin-rétine** est fixe et vaut **15 mm** environ.

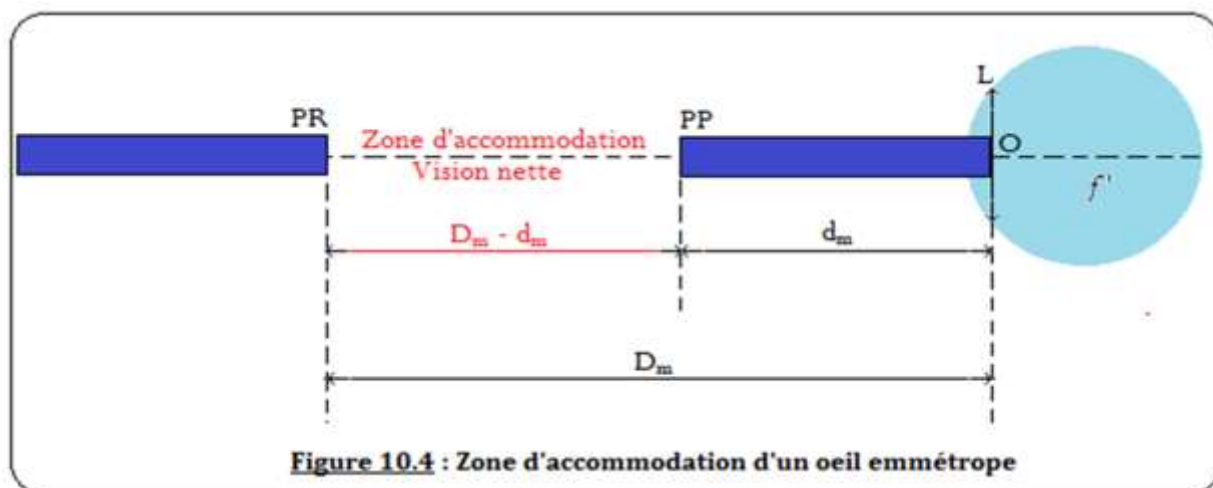
1.2. Points particuliers pour une vision nette

- L'œil normal ou **emmétrope** voit nettement des objets situés à l'infini car leur image se forme sur la rétine.
- L'œil normal voit **flou** des objets rapprochés car l'image ne se forme pas sur la rétine.
- Pour un œil normal, le **foyer image** est donc sur la rétine ou exactement au **centre de la fovéa** (**qui est la partie la plus sensible de la rétine et contient principalement des cônes qui sont des cellules beaucoup plus performantes que les bâtonnets**).



- L'œil peut nettement voir des objets entre deux positions limites :
 - Le **Punctum Remotum (PR)**, qui est le point le plus éloigné que l'œil puisse voir sans accommoder. Il est situé à une distance D_m de l'œil appelée **distance maximale de vision distincte**. Pour un œil normal, $PR = \infty$. En réalité, la position du PR dépend de l'âge du sujet.
 - La position la plus rapprochée ou le **Punctum Proximum (PP)**, qui est le point de l'axe optique le plus rapproché que l'œil voit nettement en accommodant au maximum. Cette distance est notée d_m et est appelée **distance minimale de vision distincte**. Pour un œil emmétrope (**d'un sujet d'environ 30 ans**), $d_m = 25 \text{ cm}$. Le PP s'éloigne lorsque le sujet vieillit.
- L'intervalle I_m compris entre le PP et le PR est appelé **intervalle de vision distincte** et vaut :

$$I_m = D_m - d_m : \text{c'est la zone d'accommodation.} \quad (10.1)$$



Activité 10.1 : Position relative d'une vergence

La distance cristallin-rétine d'un œil est de 15mm. Entre quelles limites varie la vergence du cristallin de cet œil dont les distances minimale et maximale de vision distincte sont respectivement 25 cm et l'infini ?

Solution

→ Si $D_m = \infty$ (position du PR), l'œil est au repos → $\overline{OA'} = 15\text{mm} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ et $\overline{OA} = D_m = \infty$

La vergence sera dans ce cas minimale et aura pour valeur $C_{\min} = \frac{1}{\overline{OA'}} = 66,7\delta$.

→ Dans le cas où $\overline{OA} = d_m = -25\text{cm} = -2,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}$, l'œil accommode au maximum et $\overline{OA'} = 15\text{mm} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. En utilisant la formule (8.4) du chapitre précédent, on obtient

$$C_{\max} = \frac{\overline{OA} - \overline{OA'}}{\overline{OA} \times \overline{OA'}} = 70,7\delta$$

La vergence C du cristallin de cet œil sera tel que $C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$

Activité 10.2 : Représentation de la zone d'accommodation d'un œil.

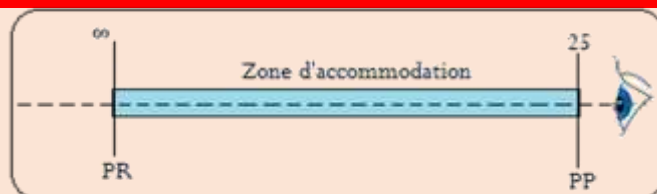
Le PR d'un œil emmétrope est situé à l'infini par rapport au cristallin et le PP est situé à 25 cm du centre du cristallin. Déterminer, puis représenter la zone de vision nette (ou zone d'accommodation).

Solution

$D_m = PR = \infty$; $d_m = 25 \text{ cm}$

On a : $I_m = D_m - d_m = \infty - 25 \cdot 10^{-2} \approx \infty$

Représentation



2. Les défauts d'accommodation de l'œil et leur méthode de correction

2.1. Phénomène d'accommodation

- L'œil normal voit nettement des objets proches. La distance cristallin-rétine étant invariable, ce sont des muscles qui agissent sur le cristallin, sa courbure change, modifiant ainsi sa distance focale. On dit que l'œil accommode.
- La vergence du cristallin peut varier : en se bombant, il devient plus convergent. Cela nous permet (heureusement) de voir nets des objets situés à des distances différentes. C'est ce que l'on appelle le **phénomène d'accommodation**.
- L'**accommodation** est la faculté qu'a le cristallin à modifier sa vergence afin que l'image d'un objet rapproché se forme à la rétine. Elle se fait de manière reflexe par changement de la courbure du cristallin sous l'action des muscles ciliaires.

Nota Bene

Plus l'œil accommode, plus les rayons de courbure du cristallin diminuent et plus la vergence augmente. Donc, l'accommodation, est inversement proportionnelle à la vergence du cristallin.

2.2. Les défauts d'accommodation et leur correction

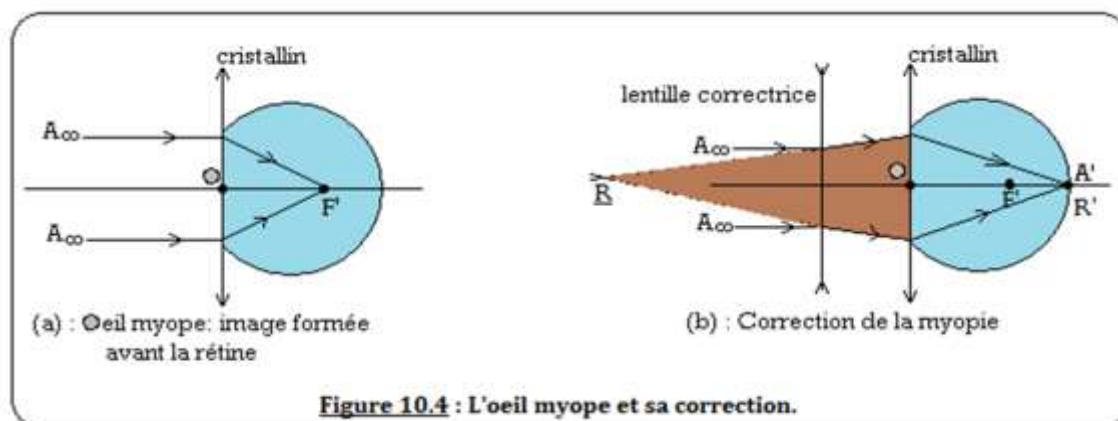
Pour un œil normal (œil emmétrope), le PP est à $d_m = 25 \text{ cm}$ et le PR est à $D_m = \infty$. Lorsque la vision distincte ne correspond plus à ces limites, l'œil présente des **anomalies d'accommodation** appelées **défauts d'accommodation de l'œil**. On peut citer :

2.2.1. La myopie

- Un œil myope est un œil qui donne d'un objet situé à l'infini, une image située devant la rétine (**figure 10.4. a**).
- Les objets éloignés vus par l'œil myope sont flous. Car l'image se forme au foyer image F' .
- Le PP de l'œil myope est plus proche de l'œil que celui d'un œil normal i.e. **$d_m < 25 \text{ cm}$**
- le cristallin est trop convergent. Son PR n'est pas à l'infini, mais à distance finie. C'est aussi l'équivalent d'un œil **trop long** car la distance entre le cristallin et la rétine est trop longue (**$> 15 \text{ mm}$**) par rapport à la distance focale du cristallin.
- Pour corriger cette anomalie, on utilise de lunettes dont les verres sont des lentilles divergentes et dont le rôle est de ramener l'image finale à la rétine (**figure 10.4.b**).
- La distance focale de la lentille correctrice est : $\overline{OF} = -D_m$ (10.2)

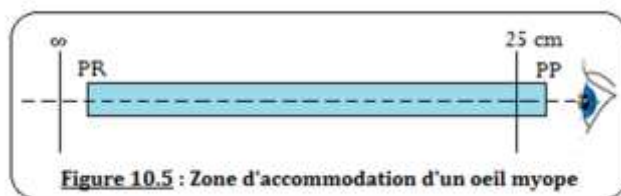
Remarque

La correction peut également se faire par modification chirurgicale de la courbure de la cornée ou par implants dans l'humeur aqueuse ou le cristallin.



- Un œil est dit myope, si son foyer image **F'**, est situé, lorsqu'il est au repos, en avant de la rétine.

- Appelons d la distance entre le verre correcteur et l'œil. La distance focale du verre correcteur sera dans ce cas :
$$\overline{OF'} = -D_m - d \quad (10.3)$$
- Sa zone de vision nette se présente comme suit :

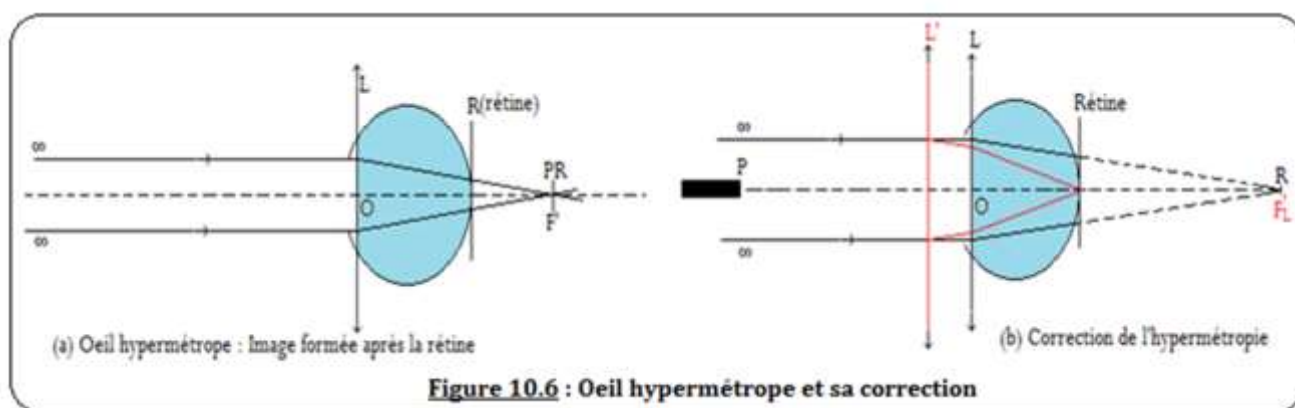


2.2.2. L'hypermétropie

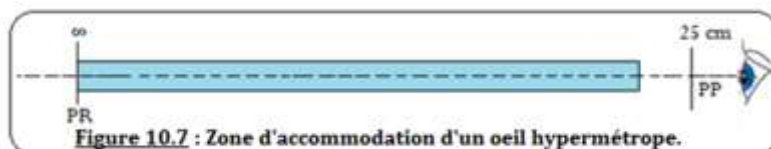
- L'œil hypermétrope est un œil qui donne d'un objet situé à l'infini une image située après la rétine. C'est dire que l'œil hypermétrope est moins convergent qu'un œil normal. Son PR est virtuel et est situé derrière la rétine. (Figure 10.6 a)
- Les objets rapprochés vus par ce genre d'œil sont flous.
- Cette anomalie apparaît très souvent à l'adolescence.
- La distance entre le cristallin et la rétine est trop courte par rapport à la distance focale du cristallin : c'est un **œil trop court**.
- Le PP de l'œil hypermétrope est plus éloigné que celui d'un œil normal et est réel. Soit $d_m > 25\text{cm}$.
- L'œil hypermétrope doit accommoder pour voir à l'infini ce qui provoque une fatigue excessive de l'œil et parfois des maux de tête.
- Les personnes hypermétropes peuvent temporairement corriger leur défaut, en appuyant légèrement autour de l'œil, ce qui a pour effet de bomber la cornée.
- Pour corriger cette anomalie, l'ophtalmologue conseille d'utiliser des lentilles à verres convergents qui ont pour rôle d'augmenter la vergence de la lentille afin de ramener l'image finale sur la rétine. Il faut aussi s'assurer que, sans accommodation, les rayons lumineux venant des points éloignés, semblent passer par le PR i.e. le foyer image de la lentille correctrice sera placé au PR. (Figure 10.6 b).

Remarque

La correction peut également se faire par modification chirurgicale de la courbure de la cornée ou par implants dans l'humeur aqueuse ou le cristallin.



- Un œil est hypermétrope, si lorsqu'il est au repos, son foyer image F' est situé en arrière de la rétine.
- Sa zone de vision nette est la suivante :



2.2.3. La presbytie

- Pour des objets très éloignés, la vision est nette car l'œil n'accommode pas. Mais plus l'objet se rapproche, plus l'accommodation est difficile à réaliser : l'image ne se forme plus alors sur la rétine.
- Elle est due à une fatigue des muscles d'accommodation et à une diminution de l'élasticité du cristallin.
- Ce défaut apparaît avec l'âge et survient dès que la faculté d'accommodation de l'œil diminue.
- Le PR est toujours situé à l'infini, mais le PP est plus éloigné de l'œil que celui d'un œil hypermétrope ou d'un œil normal.
- Ceci explique pourquoi certaines personnes âgées éloignent le texte qu'elles veulent lire. La convergence d'un œil presbyte, n'est pas suffisante pour voir distinctement des objets proches.
- La presbytie se corrige par l'utilisation des verres convergents pour l'observation des objets proches. Cette anomalie attaque aussi bien un œil normal, myope qu'hypermétrope. On parle alors de **presbyte – myope** ou de **presbyte – hypermétrope**.

Remarque

Dans certains cas, la presbytie peut compenser la myopie de sorte que l'individu recouvre sa vue normale.

Son domaine de vision nette est le suivant :

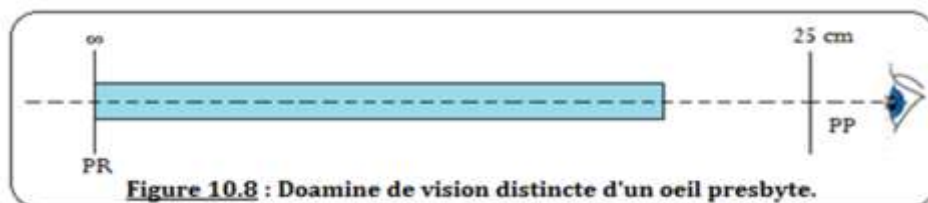


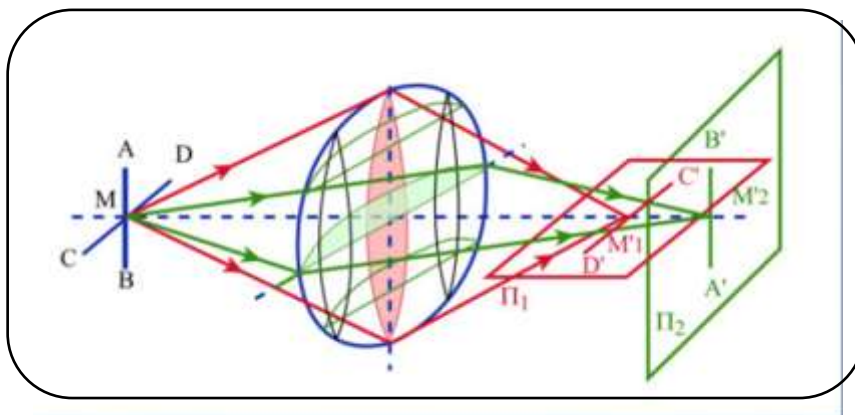
Figure 10.8 : Doamime de vision distincte d'un œil presbyte.

Remarque

Il existe aussi des techniques utilisant le laser ou des implants pour corriger la presbytie.

2.2.4. L'astigmatisme

L'**astigmatisme** est le trouble de la vision associé à la myopie et à l'hypermétropie et faisant partie comme ces dernières, des troubles de la réfraction de l'œil, ou amétropies. Il est dû en général à une anomalie de forme de la cornée, soit congénitale, soit due à une affection cornéenne. Pour corriger cette anomalie, on peut utiliser soit des **verres sphéro-cylindriques astigmat** ou des **lentilles sphéro-toriques**.



En Bref

Au cours de la myopie, l'œil est l'équivalent d'une lentille sphérique trop bombée, trop convergente, qui forme des images devant la rétine. Au cours de l'hypermétropie, l'œil est représenté par une lentille sphérique trop plate, pas assez convergente, qui forme des images derrière la rétine. Dans le cas de l'astigmatisme, l'œil n'est pas sphérique mais plutôt **ellipsoïdal**. Le long d'un axe, par exemple

dans le sens vertical, la surface a un certain rayon de courbure, normal, myope ou hypermétrope, donnant d'un point une image située sur la rétine, ou devant, ou derrière elle. Dans une autre direction de l'espace, par exemple l'horizontale, le rayon de courbure, et donc la situation de l'image du même point, sont différents. Il s'ensuit que l'image globale d'un point n'est pas un point mais une petite tâche.

Le pouvoir séparateur ou acuité visuelle

L'acuité visuelle de l'œil, est le plus petit angle (ou angle limite) ϵ (**epsilon**) sous lequel l'œil peut voir deux point **A** et **B** séparés :

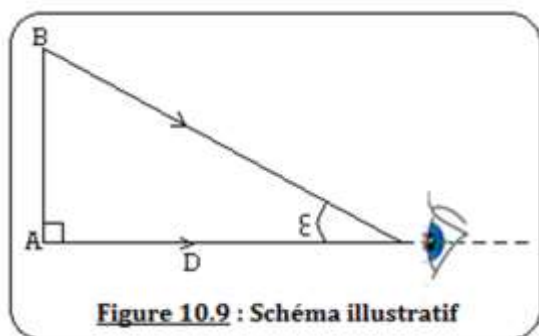


Figure 10.9 : Schéma illustratif

$$\operatorname{tg} \epsilon \cong \epsilon = \frac{AB}{D} \text{ avec } \begin{cases} AB..en..(m) \\ D..en..(m) \\ \epsilon..en..(rad) \end{cases}$$

Pour un œil normal :

$$\epsilon \approx 1 \text{ min angulaire } (1') \approx 3.10^{-4} \text{ rad.}$$

EXERCICES RÉSOLUS

A- Un œil myope a son PR situé à 0,95 m et son PP à 15 cm.

1. Calculer la vergence de la lentille de contact qu'il faut utiliser pour le corriger. En déduire la nature de la lentille correctrice.
2. Quelle sera alors sa distance minimale de vision distincte ?

Solution

Anomalie : myopie $\{D_m = 0,95 \text{ m} ; PP = 15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}\}$

1. Calculons la vergence C de la lentille correctrice.

Pour un œil myope, on sait que : $f' = -D_m = -0,95 \text{ m}$ et $C = \frac{1}{f'}$ ce qui donne $C = -1,05\delta$.

Puisque $C = -1,05\delta < 0$, alors la lentille correctrice est une lentille divergente.

2. Après correction, le PP est à un point A de la lentille correctrice et donne une image A' à 15 cm de l'œil (qui est la position du PP de l'œil non corrigé). Soit O le centre optique de l'œil réduit, on peut écrire, pour une lentille de contact (i.e. distance lentille-cristallin négligeable) :

$$\begin{cases} \overline{OA'} = -0,15 \text{ m} \\ \overline{OF'} = -0,95 \text{ m} \\ \overline{OA} = ? \end{cases} \text{ En appliquant la formule (8.4) du chapitre précédent, on obtient :}$$

$$\overline{OA} = \frac{\overline{OF'} \times \overline{OA'}}{\overline{OF'} - \overline{OA'}} \quad \text{AN : } \overline{OA} = -0,178 \text{ m}$$

La distance minimale de vision distincte de l'œil corrigé est donc $0,178 \text{ m} = 17,8 \text{ cm}$.

B- Un myope devenu presbyte a ses limites de vision distinctes comprises entre 50 cm et 1m.

1. Quelle lentille faut-il placer devant son œil pour qu'il puisse voir nettement à l'infini ?
2. Afin de voir des objets rapprochés, on accole à la lentille précédente, une lentille convergente de façon que le PP soit à 20 cm. Quelle est la distance focale de cette lentille ? La distance œil-lentille est négligée.

**Solution****Anomalie : myopie + presbytie** {50 cm ; 1 m}

1. L'œil étant myope, il faut placer devant l'œil, une lentille divergente, afin que celle-ci donne de l'objet à l'infini, une image virtuelle située à 1m. Sa vergence C sera :

$$C = -\frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OA'}} = -\frac{1}{-\infty} - \frac{1}{1} = -1\delta \quad \text{ou } f' = -D_m = -1\text{m} \rightarrow C = -1\delta.$$

2. Dans cet énoncé, l'objet rapproché sera à -20 cm de l'œil afin d'obtenir une image virtuelle à -50 cm. Ainsi, la distance focale de cette lentille sera :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} \Rightarrow f' = \frac{\overline{OA} \times \overline{OA'}}{\overline{OA} - \overline{OA'}} \quad \text{AN : } f' = 33,33 \text{ cm.}$$

- C- Un œil hypermétrope a son PP situé à 2,10 m de l'œil. Calculer la distance focale de la lentille de contact nécessaire pour ramener ce PP à 25 cm.

Solution

Anomalie : hypermétropie : dans cet énoncé, l'objet sera à -0,25m afin d'obtenir une image virtuelle à -2,10 m après correction. La distance focale de la lentille de contact (lentille convergente) sera :

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} \Rightarrow f' = \frac{\overline{OA} \times \overline{OA'}}{\overline{OA} - \overline{OA'}} \quad \text{AN : } f' = 0,28 \text{ m} = 280 \text{ cm.}$$

D- La distance cristallin-rétine d'un œil normal est constante et égale à 15mm. Calculer sa vergence :

- Lorsque l'œil observe un objet à son PP situé à 25cm.
- Lorsque l'œil observe un objet situé à l'infini.

Solution

Œil normal : $\overline{OA'} = 15\text{mm} = 15 \cdot 10^{-3}\text{m}$

Calculons la vergence de l'œil lorsque :

1. $\overline{OA} = -25\text{cm} = -25 \cdot 10^{-2}\text{m}$

En exploitant la formule 8.4 (formule de conjugaison), on obtient :

$$C = \frac{\overline{OA} - \overline{OA'}}{\overline{OA} \times \overline{OA'}} \quad \text{AN : } C = 70,67 \delta.$$

2. $\overline{OA} = -\infty$

Dans ce cas on aura :

$$C = -\frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{-\infty} + \frac{1000}{15} = 66,67\delta$$

E- Pour l'œil d'un enfant, le PP est situé à 10 cm et le PR à 2m.

- De quelle anomalie souffre-t-il ?
- Donner la nature et la distance focale du verre correcteur.
- Quelle est alors la nouvelle position du PP de l'œil corrigé ?

Solution

Œil : PP = 10 cm ; PR = 2m

1. Étant donné que le PR < ∞, on conclue que l'enfant souffre de la myopie.



- Pour la myopie, les verres correcteurs sont des verres à lentille divergente. Dans ce cas, la distance focale de ces verres est l'opposé du PR soit : $\overline{OF'} = -2m$
- Déterminons alors la nouvelle position du PP de l'œil de l'enfant après correction.
Il s'agit ici de trouver la position de l'objet, lorsque l'image virtuelle se forme à -10 cm et la distance focale est -2m. En exploitant la formule de conjugaison, on aura :

$$\frac{\overline{OA}}{\overline{OF'}} = \frac{\overline{OF'} \times \overline{OA'}}{\overline{OF'} - \overline{OA'}} = -10,53cm$$

Ainsi le PP est à 10,53 cm de l'œil.

F- Pour un œil normal, l'image d'un objet situé à l'infini se forme sur la rétine.

- Si la vergence de l'œil était constante, où se formerait alors l'image d'un objet rapproché ?
- Comment appelle-t-on la capacité d'adaptation qui permet la formation de l'image d'un objet rapproché sur la rétine ?
- Comment varie alors la vergence de l'œil ?

Solution

- Si la vergence est constante, cela traduit que la distance focale f' de l'œil est aussi constante. Si l'objet est rapproché i.e. entre F et O, alors, l'image se formerait derrière la rétine.
- Cette faculté est appelée accommodation.
- La vergence de l'œil augmente lorsque l'objet est rapproché.

G- Le PR de l'œil gauche d'un enfant est situé à 4 m de l'œil ; celui de l'œil droit à 5 m.

- De quel défaut d'accommodation souffre-t-il ?
- Indiquer les vergences des lentilles de contact appropriées.

Solution

PR à gauche : 4m ; PR à droite : 5m

- L'enfant souffre de la myopie.
- Calculons les vergences des lentilles de contact appropriées.

Puisque l'enfant souffre de la myopie, on a :

- À gauche : $f'_{gauche} = -4m$
- À droite : $f'_{droit} = -5m$

Ainsi, et sachant que la vergence est l'inverse de la distance focale, on aura :

$$\text{- À gauche : } C_{gauche} = \frac{1}{f'_{gauche}} = -0,25\delta$$

$$\text{- À droite : } C_{droit} = \frac{1}{f'_{droit}} = -0,20\delta$$

H- Un œil dont le PP est situé à 40 cm, a une distance cristallin-rétine constante et égale à 15mm.

- Quelle est à cette position la distance focale f' du cristallin ? Déduire sa vergence maximale C_{max} .
- Sachant que l'accommodation augmente la vergence de 5δ , quelle est la vergence C_0 de l'œil au repos ?

**Solution**

Œil : Position de l'objet : -40cm ; position de l'image : -15mm = -1,5cm.

1. Calculons à cette position :

- La distance focale f' :

$$f' = \frac{\overline{OA} \times \overline{OA'}}{\overline{OA} - \overline{OA'}} = 14,46\text{mm} = 1,446\text{cm}$$

- La vergence maximale C_{max} :

$$C_{\text{max}} = \frac{1}{f'} = 69,16\delta$$

2. Puisque l'accommodation augmente la vergence, il suffit, pour calculer la vergence au repos (sans accommodation), de soustraire les 5 dioptries de la valeur maximale de la vergence. Soit $C_0 = C_{\text{max}} - 5$ ce qui donne : $C_0 = 64,16\delta$.

Note : La chirurgie et les défauts de l'œil (Extrait du site www.gatinel.com)

Définition du LASIK : c'est un acronyme de Laser in Situ Keratomileusis (kératomileusis par laser in situ). Kerato, mileusis et in situ sont des mots d'origine grecque qui signifient respectivement « cornée », « former », « au sein de ».

Le kératomileusis est une sculpture de la cornée effectuée en son sein. [...] Le LASIK est un procédé chirurgical cornéen qui permet la correction d'un large éventail de myopies, d'hypermétropies [...]. Grâce à la sculpture laser, la cornée adopte ainsi une nouvelle courbure : ce changement en modifie le pouvoir optique de la cornée afin de corriger le défaut optique (erreur réfractive) de l'œil. Sur les schémas suivants, surligner les zones de la cornée à enlever pour traiter :

- La myopie :



- L'hypermétropie :

3. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Myopie	Myopia; short sight; near-sightedness.
Hypermétropie	Long-sighted; far-sighted.
Presbytie	Presbyopia; far-sightedness.
Astigmatisme	Astigmatism.

Sentences

- The **presbyopia** is the loss of the ability to see nearby objects clearly (due to age).
- The **astigmatism** is unequal curvature of the lens of the eye creating a distorted image.
- Short sight** is the condition of the eyes in which objects that are far away cannot be seen clearly.



EXERCICES DE LA LEÇON 10 : L'ŒIL RÉDUIT

PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS

1. Définir : accommodation ; zone d'accommodation ; PP ; PR.
2. Expliquer le phénomène d'accommodation.
3. Schématiser et annoter l'œil réduit.

4. Recopier et compléter les phrases suivantes :

4.1. L'ensemble formé par une lentille....., d'un diaphragme et la partie sensible de la rétine, constitue l'œil.....

4.2. L'œil voit un objet quand son image se forme sur la.....

4.3. L'œil normal peut voir nettement des objets situés entre le.....et le.....

4.4. L'.....est la modification de la vergence du cristallin.

4.5. Un œil myope est trop.....

4.6. Pour corriger la.....il faut porter des lunettes dont les verres sont des lentilles divergentes.

4.7. Un œil.....n'est pas assez convergent.

4.8. Pour corriger l'hypermétropie, il faut porter des lunettes dont les verres sont des lentilles.....

4.9. La convergence de l'œil.....n'est pas suffisante pour voir nettement des objets proches.

4.10. On corrige la presbytie en utilisant des lunettes dont les verres sont des lentilles.....pour observer des objets proches.

5. Questions à choix multiples (QCM)

- 5.1. La différence entre l'œil et un appareil photographique est la fait que :
 - (a) La distance focale de l'œil change tandis que la distance focale de l'appareil photographique est constante.
 - (b) La distance focale de l'œil est constante tandis que la distance focale de l'appareil photographique varie.
- 5.2. Un œil myope est :
 - (a) Trop long.
 - (b) Trop court.
 - (c) Trop bombé.
- 5.3. Un œil hypermétrope est :
 - (a) Trop long.
 - (b) Trop court.
 - (c) Trop bombé.
- 5.4. La presbytie est une anomalie due :
 - (a) À l'âge ;
 - (b) À la taille ;
 - (c) À la force musculaire.
- 5.5. Un œil dont le PP est à 25 cm est un œil :
 - (a) Emmétrope ;
 - (b) Presbytie ;
 - (c) Myope.
- 5.6. Le mot anglais far-sighted correspond :
 - (a) À la myopie ;
 - (b) À la presbytie ;
 - (c) À l'hypermétropie ;

(d) À l'astigmatisme.

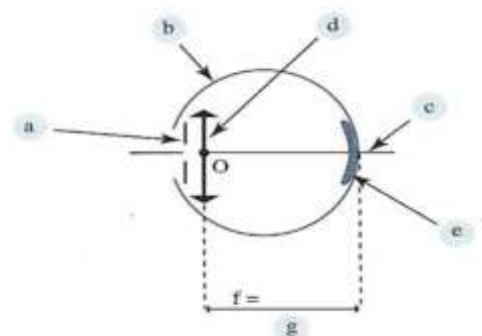
5.7. Un œil dont la distance cristallin – rétine est de 17 mm, souffre de :

- (a) La myopie ;
- (b) La presbytie ;
- (c) L'hypermétropie.

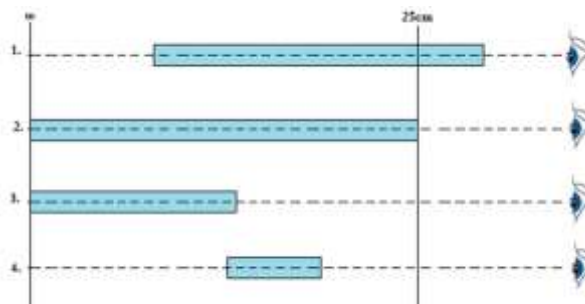
5.8. Un individu qui porte des lentilles divergentes pour corriger son anomalie, souffre de :

- (a) Short-sightedness ;
- (b) La presbytie ;
- (c) Long-sighted.

6. Reproduire et annoter la figure ci-dessous



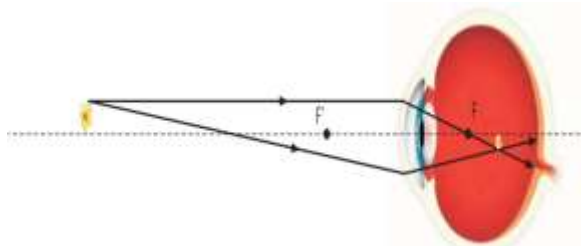
7. Le document ci-dessous représente les limites de vision nette de plusieurs types d'yeux. La zone d'accommodation est fracturée.



- 7.1. Placer sur chacun des schémas, le PP et PR.
- 7.2. Reconnaître sur le schéma : l'œil normal, l'œil myope ; l'œil presbyte ; l'œil presbyte et myope.
- 7.3. Indiquer dans le cas de l'œil myope et l'œil presbyte, la nature de la lentille correctrice nécessaire.
8. En vous servant du cours et de vos connaissances, répondez aux questions suivantes en complétant par l'organe convenable (**Questions pour un champion !**)
 - 8.1. Quels renseignements l'œil renvoie-t-il au cerveau ?
 - 8.2. Qui suis-je ?
 - (a) Je suis à l'œil ce que le diaphragme est à l'appareil photo.....
 - (b) Sans moi, les rayons lumineux ne pouvaient pas converger vers la rétine.....
 - (c) Je capte des images sous forme de rayons lumineux et j'envoie le tout au cerveau sous forme d'impulsions nerveuses.....
 - (d) Je peaufine la vision, car je peux m'adapter à la distance des objets observés.....

- (e) Je suis la porte d'entrée des rayons lumineux.
 (f) Je me contracte au soleil et je me détends à l'ombre.....

9. Observez l'illustration suivante :

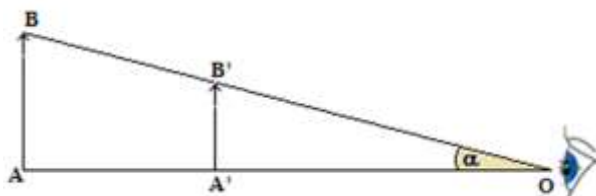


- 9.1. Quel est le problème de vision de cet œil ?
 9.2. Dessinez une lentille correctrice devant cet œil et montrez comment le trajet des rayons principaux est modifié par la présence de cette lentille.

10. Expliquer le phénomène d'accommodation.

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

1. Le palais de congrès observé depuis l'une des collines de Yaoundé a une hauteur de 2 cm à 50 cm de l'œil de l'observateur. Sa hauteur réelle étant de



À quelle distance du palais était l'observateur ?

2. Un œil voit nettement des objets situés entre 1m et $+\infty$.
 2.1. De quel défaut souffre cet œil ?
 2.2. Calculer la vergence du verre qui lui faut pour lire un journal à 25 cm de l'œil.
3. Le punctum remotum (PR) d'un œil normal est situé à l'infini et son punctum proximum (PP) à 25 cm du centre optique de l'œil.
 3.1. Qu'appelle-t-on PP ? PR ?
 3.2. Sachant que la distance entre le cristallin et la rétine est de 15 mm, entre quelle limite varie la vergence d'un œil normal ?
4. Un œil emmétrope observe un objet à travers une loupe de distance focale $f' = 2$ cm. L'œil est placé au foyer principal de la loupe supposée être une lentille convergente. Calculer, lorsque la loupe est mise au point pour une vision à l'infini, la distance qui sépare l'objet de l'œil.
5. Quelles sont les trois parties essentielles de l'œil, utilisées en physique pour matérialiser l'œil ?
6. Quelle méthode efficace existe-t-il pour différencier l'hypermétropie de la presbytie ?

7. Deux individus A et B de distances minimales de vision distincte respectives $d_A = 30$ cm et $d_B = 45$ cm se disputent sur l'anomalie de chacun.

- 7.1. Qu'appelle-t-on anomalie de l'œil ?
 7.2. L'individu A dit à l'individu B qu'il souffre de la myopie alors que l'individu B dit à l'individu A qu'il souffre de l'hypermétropie.
 (a) Ont-ils raison, l'un de l'autre, de la maladie de chacun ?
 (b) Sinon, quelle anomalie souffre chacun d'entre eux ? Justifier vos réponses.
 (c) En déduire alors le plus âgé. Pourquoi lui ?

8. Le PP et le PR d'un œil sont respectivement situés à 20 cm et 80 cm de l'œil.

- 8.1. De quoi souffre cet œil ? Quelle est la nature des verres correcteurs ?
 8.2. Déterminer alors la vergence du verre correcteur si la distance entre le centre du verre correcteur à l'œil est de 10mm.
 8.3. Quelle est alors la nouvelle position de son PP ainsi corrigé ?

9. Une personne hypermétrope a son PP situé à 1m.

- 9.1. Quelle est la vergence maximale $C_{\max}$ de l'œil de cette personne ?
 9.2. Quel type de lentille doit-on associer à cet œil pour ramener le PP à 25 cm ? Préciser sa vergence.

10. Le rôle d'une lentille correctrice est de donner d'un objet une image située dans le domaine de vision distincte de l'œil déficient. Cette image, donnée par la lentille, joue alors le rôle d'objet pour cet œil.

- 10.1. Un œil myope a son punctum remotum situé à 1 m et son punctum proximum situé à 10 cm. Pour corriger sa vue, on place sur l'œil, une lentille de contact de -1 dioptrie. Entre quelles limites l'œil voit nettement un objet ?

- 10.2. Le punctum proximum d'un œil presbyte est rejeté à 50 cm. Quelle lentille faut-il placer devant cet œil pour que le presbyte puisse lire un journal à 25 cm de son œil ?

11. Un myope devenu presbyte, a une vision telle que sa distance maximale de vision distincte est de 100cm, la distance minimale de vision distincte étant de 40 cm.

- 11.1. En négligeant la distance entre la lentille et l'œil, quel type de lentille L faut-il utiliser pour permettre à cet œil de voir nettement à l'infini sans accommoder ?

- 11.2. Donner la distance focale de cette lentille.

- 11.3. Pour obtenir une vision rapprochée, on accole à la partie inférieure de la lentille L, une petite lentille L_1 . Calculer la vergence de la lentille L_1 pour que la distance maximale de vision distincte de l'œil regardant à travers deux lentilles accolées soit ramenée à 20 cm.



12. Un œil hypermétrope de distance cristallin-rétine égale à 13 mm, possède une vergence égale à 66 dioptries au repos. L'accommodation maximale augmente sa vergence de 8 dioptries. Calculer sa distance minimale de vision distincte.
13. Un œil placé au foyer image d'une lentille convergente de distance focale 20 cm, voit nettement des objets se trouvant à une distance de la lentille comprise entre 10 cm et 25 cm.
- 13.1. Quel est le défaut de cet œil ?
- 13.2. Quelle est la nature de la lentille qu'il faut lui associer pour lui permettre de voir au loin sans accommoder ?
14. La distance cristallin – rétine d'un œil est 18 mm.
- 14.1. De quoi souffre cet œil ?
- 14.2. Entre quelles limites varie la vergence de cet œil dont les distances minimale et maximale de vision distincte sont respectivement 20 cm et 24 cm ?
15. Pour ramener le PP de son œil à 25 cm, un hypermétrope utilise des verres à lentilles convergente de vergence 2 dioptries. Quelle est la position du PP de cet œil sans lunette ?
16. Dans cet exercice on assimile les yeux à des lentilles dont le centre est à 20 mm de la rétine.
- 16.1. Quelle est la vergence C_1 de l'œil normal n'accommodant pas ?
- 16.2. Quelle est la vergence C_2 de l'œil normal accommodant pour lire à 25 cm ?
17. Sous quel angle, en radians, voit-on un objet de 20 cm de hauteur situé à 1 m de l'œil ?
18. Balco est un élève d'une classe de première S. Il porte des lunettes dont les verres correcteurs sont des lentilles convergentes.
- 18.1. Quel est le défaut des yeux de Balco ?
- 18.2. Le punctum remotum (PR) de chaque œil de Balco est-il en avant ou en arrière de la rétine ?
- 18.3. La lentille correctrice, forme au PR de l'œil, l'image des objets situés à l'infini. En utilisant la formule de position (formule de conjugaison), déterminer la distance maximale de vision distincte D de l'œil gauche de Balco, sachant que la lentille correctrice de cet œil a pour vergence $C_1 = 0,5\delta$. On négligera la distance entre l'œil et le verre.
19. L'œil humain est système optique particulier équivalent à une lentille convergente de distance focale variable, dans lequel la distance séparant le centre optique de la lentille de l'image est constante et égale à 20 mm dans un œil normal.
- 19.1. Quel est la distance focale de l'œil pour une mise au point pour un objet situé à l'infini ?
- 19.2. Que devient cette distance focale, si l'objet est placé à 25 cm de l'œil ?

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Compréhension des phénomènes d'yeux.

- Pourquoi les phares d'une voiture qu'on croise la nuit ont-ils tendance à nous éblouir, alors que les phares allumés de cette même voiture rencontrée le jour nous affectent très peu ?
- Une élève assise au fond de la classe n'arrive pas à voir ce qui est écrit au tableau. Selon vous, quel est son problème de vision ?
- Pourquoi une personne souffrant de presbytie et ne portant pas de verres correcteurs doit-elle s'éloigner d'un journal pour le lire ?

Situation 2 : Pourquoi pas les deux ?

Atéba fait du camping avec son père, Léki. Léki est myope, tandis que son fils est presbyte et possède des lunettes de lecture. Pour allumer un feu en faisant converger la lumière du Soleil, est-il préférable d'utiliser les lunettes de Léki ou celles d'Atéba ? Expliquez votre réponse.

Situation 3 : Exploitation des résultats expérimentaux

On dispose d'une lentille L_1 de vergence $C = -4$ dioptries.

- On observe à travers cette lentille, un objet AB réel. Construire l'image A'B' de cet objet situé à 30 cm devant la lentille. Quelle est la nature de cette image ? Échelle : 1 cm pour 5 cm sur l'axe optique.
- La lentille est utilisée pour corriger un œil. Quel est le défaut de cet œil ?

Situation 4 : Vieillesse

Atango, en vieillissant, les muscles du cristallin perdent de leur élasticité et l'œil accommode de plus en plus mal, c'est la presbytie qui survient à partir de 45 ans. Un œil complètement presbyte ne voit que les objets situés à 1 m.

- Calculer la vergence de cet œil.
- Trouver la valeur de la vergence des lentilles qui lui permettent :
 - De voir nettement des objets très éloignés.
 - De lire un livre à 40 cm de l'œil.

Réponses : -66,67 δ ; -1δ ; 1,5 δ.

Situation 5 : Acuité visuelle

- Quel est l'instrument qui permet d'augmenter l'angle sous lequel on voit un objet AB avec un bon confort d'observation ?
- Faire un schéma du dispositif proposé.
- Quelle est la hauteur h du plus petit objet observable à l'œil nu ? l'observation d'un tel objet, dans ces conditions, est-elle idéale pour l'œil ?



Leçon 11

LES INSTRUMENTS D'OPTIQUE



ACTIVITÉS

Activité

Observez attentivement les équipements (1), (2), (3), (4), (5) et (6) ci-contre.

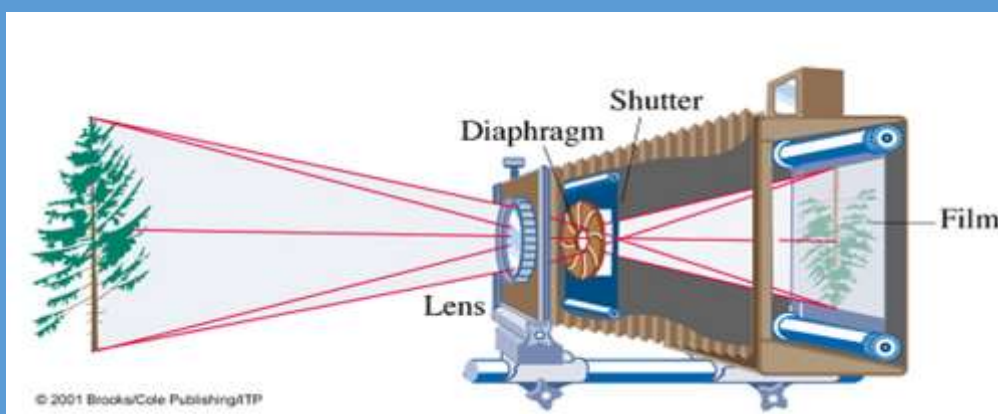
Identifier chacun d'eux, donner le nom commun à ces équipements, puis donner leur rôle et leur mode de fonctionnement.

Comment appelle-t-on le 4^e élément après l'équipement (4) ?



Objectifs

- ⇒ Expliquer le fonctionnement et donner les caractéristiques de quelques instruments d'optique.
- ⇒ Différencier les instruments d'optique étudiés.



Introduction

Le pouvoir séparateur de l'œil étant limité ($\epsilon = 3.10^{-4}$ rad) pour voir des objets de diamètre apparent trop petit, les instruments d'optique viennent donc permettre à l'œil d'observer non plus des objets, mais leur image virtuelle qui présente un diamètre apparent plus grand. Quel est l'enjeu d'une utilisation excessive de ces instruments ?

1. Généralité

Un **instrument d'optique** a pour principal but d'améliorer la perception des détails d'un objet.

Les instruments d'optique (IO) sont de types différents très varié :

- Les plus fréquents à utiliser sont les appareils destinés à aider l'œil dans **l'observation des objets**.
- Analyser la lumière émise ou absorbée (**spectrographe**)
- On distingue deux groupes d'instruments d'optique :



- Les **instruments objectifs** qui ne comportent qu'un système optique. Ils donnent d'un objet réel une image réelle recueillie sur un écran.

Exemple

Œil, appareils de projection et de photographie, agrandisseur photographique...

- Les **instruments visuels ou oculaires ou subjectifs** dont l'œil constitue le récepteur unique.

Exemple

- Pour **les objets mobiles** : la loupe, le microscope, les jumelles...
- Pour **les objets statiques** : les jumelles, la lunette astronomique, le télescope...

- Un instrument d'optique est caractérisé par les paramètres suivants :

1.1. La mise au point

- Mettre au point un instrument d'optique (**I.O**), c'est amener l'image entre le PP et le PR de l'œil de l'observateur.
- L'intervalle de vision distincte sur lequel doit se trouver l'objet pour que l'image soit vue par l'observateur, est appelée **latitude de mise au point**.

1.2. Le grossissement G

C'est le rapport du diamètre apparent de l'image finale donnée par l'instrument α' (en rad) au diamètre apparent α (en rad) de l'objet vu par l'œil nu situé au PP. **G** est une grandeur scalaire sans dimension (unité) :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} \quad (11.1)$$

1.3. La puissance P

C'est le quotient du diamètre apparent α' sous lequel est vue l'image, par la grandeur **AB** de l'objet :

$$P = \frac{\alpha'}{AB} \dots \text{avec} \begin{cases} \alpha' \dots \text{en..(rad)} \\ AB \dots \text{en..(m)} \\ P \dots \text{en..}(\delta) \end{cases} \quad (11.2)$$

Activité 11.1

Le diamètre apparent d'un objet observé à l'œil nu et placé à 25 cm de l'œil est $\alpha = 3.10^{-3}$ rad. Le diamètre apparent du même objet observé à travers un microscope est $\alpha' = 0,9$ rad. Calculer :

- Le grossissement du microscope ;
- La puissance du microscope.

Solution

Données : $\alpha = 3.10^{-3}$ rad ; $\alpha' = 0,9$ rad ; $d_m = 25\text{cm} = 0,25 \text{ m} = \frac{1}{4} \text{ m}$. Calculons :

- Le grossissement G

Par définition, $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$ **AN : G = 300**

- La puissance P

Par définition, $P = \frac{\alpha'}{AB}$ or $\begin{cases} \alpha = \frac{AB}{d_m} \\ G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \alpha' \times \frac{d_m}{AB} = P \times d_m \end{cases} \Rightarrow P = \frac{G}{d_m} = 4G$ **AN : P = 1200 δ.**

2. La loupe

2.1. Principe de fonctionnement

Une **Loupe** est une lentille épaisse convergente de courte distance focale f' , comprise entre 2 et 10 cm, qui, utilisée par un œil myope ou emmétrope, donne de l'objet une image virtuelle agrandie vue sous un diamètre apparent supérieur à celui sous lequel il est vu à l'œil nu. Pour cela, l'objet doit être placé entre le plan focal objet de la lentille et de son centre optique et l'œil étant placé derrière la lentille.

Pourquoi utiliser une loupe ?

Le point le plus proche permettant une vision nette étant fixé (PP), pour mieux voir un objet, il faut utiliser un instrument : c'est ce que permet la loupe.

- Pour obtenir l'effet Loupe, il faut que l'objet soit situé entre le centre optique d'une lentille convergente et son foyer objet : on obtient alors une image virtuelle, droite et agrandie. (Voir figure 11.2 ci-dessous.)

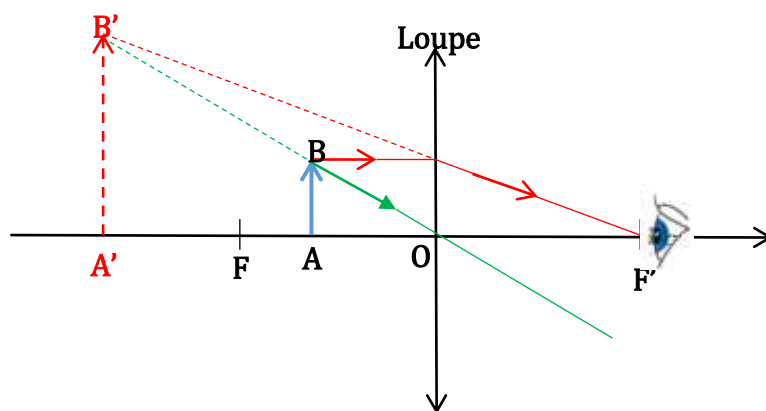


Figure 11.2 : Loupe avec accommodation

- De plus, afin que l'œil puisse observer cette image sans accommodation, celle-ci doit être à l'infini. La meilleure position de l'objet est celle où il sera sur le foyer principal objet.

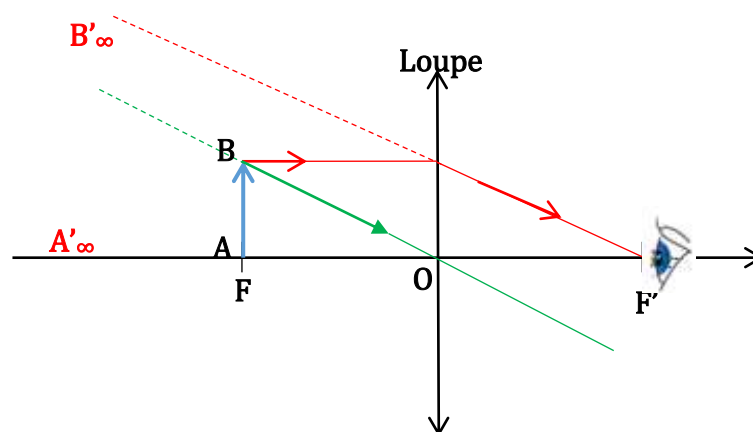


Figure 11.3 : Loupe sans accommodation

- L'image obtenue avec une loupe (L) peut-elle être plus ou moins grande ? La distance objet-lentille joue-t-elle sur la taille de l'image observée ?

La réponse est non :

- Si on approche l'objet de la lentille, l'image devient moins grande (voir figure 11.4), mais elle est vue plus près ;
- Si on éloigne l'objet de la lentille (en gardant $|\overline{OA}| < |\overline{OF}|$), l'image devient plus grande (voir figure



Figure 11.1 : Loupe

11.4), mais elle est vue plus loin !

L'angle θ' défini sur cette figure est le même quel que soit le cas, il ne dépend que de la lentille.

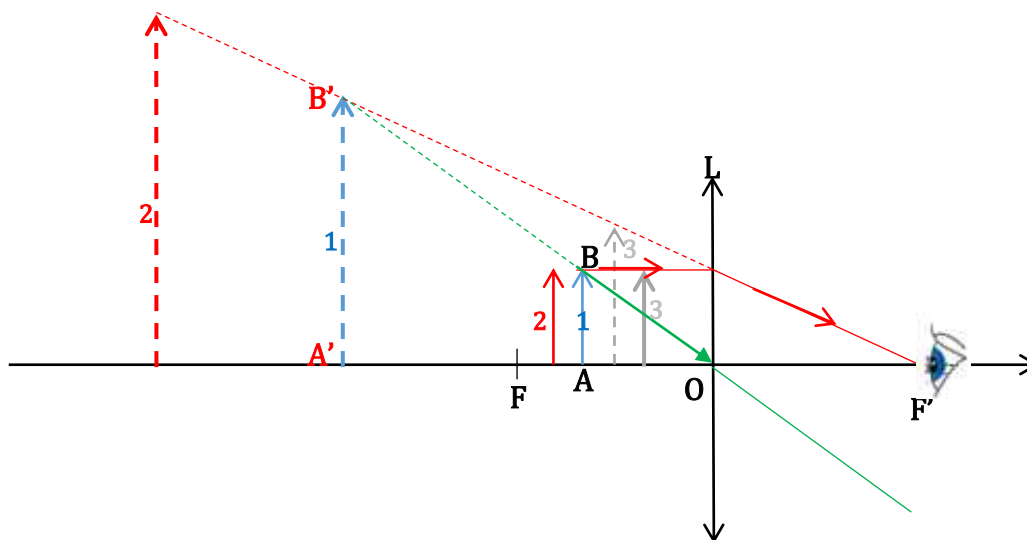


Figure 11.4 : Image obtenue avec une loupe dans plusieurs cas de distance objet-lentille

2.2. La mise au point

- Sa mise au point se fait en modifiant la distance de l'objet à la loupe i.e. amener l'image virtuelle entre le PP et le PR de l'œil de l'observateur.
- La latitude de mise au point est ici de l'ordre de quelques millimètres.

Note

$$\overline{A_1 A_2} = \overline{A_1 O} + \overline{O A_2} = \overline{O A_2} - \overline{O A_1} = \ell$$

(Latitude de mise au point)

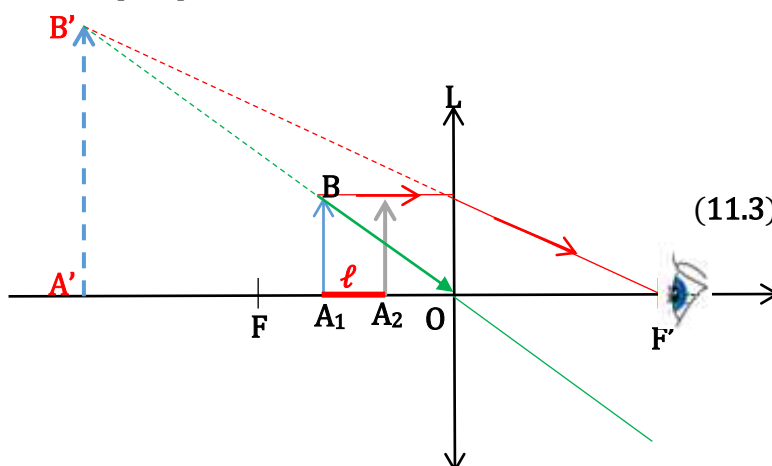


Figure 11.5 : Définition de la latitude de mise au point d'une loupe

2.3. Puissance et grossissement d'une loupe

- On définit alors le grossissement d'une loupe par le rapport entre :

- L'angle θ' sous lequel est vu l'image ;
- L'angle θ sous lequel est vu l'objet depuis l'œil à la distance de vision minimale de l'œil emmétré soit $d_m = 25 \text{ cm}$.

On a :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} \quad (11.4)$$

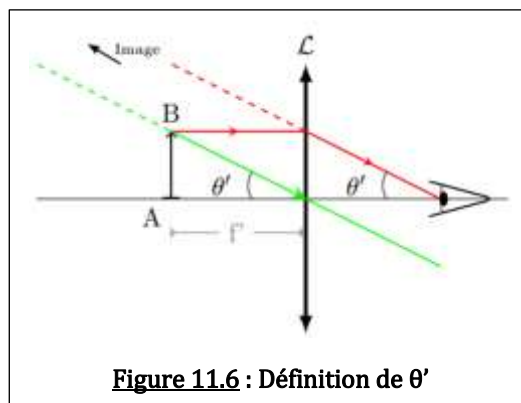


Figure 11.6 : Définition de θ'

Or si on note $h = AB$, la hauteur de l'objet, f' la focale de la lentille convergente, on peut écrire dans le cas des petits angles :

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\frac{h}{f'}}{\frac{h}{d_m}} = \frac{f'}{d_m} \Rightarrow G = \frac{d_m}{f'} \quad (11.5)$$

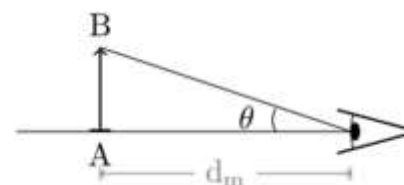


Figure 11.7 : Définition de θ

Remarque

Pour avoir un fort grossissement, il faut prendre une lentille de courte focale (de grande vergence).

- On définit la puissance P d'une loupe par :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\alpha'}{AB} \times \frac{AB}{\alpha} = P \times d_m \Rightarrow \begin{cases} P = \frac{\alpha'}{AB} \\ d_m = \frac{AB}{\alpha} \end{cases} \quad (11.6)$$

- La grandeur $G_c = \frac{P_i}{4}$ (11.7)

, est appelée **grossissement commercial** de la loupe et P_i est la **puissance intrinsèque** de la loupe.

- On démontre aisément que $P_i = C$ (C = la vergence de la loupe) (11.8)

En effet, lorsque l'objet est sur le point focal objet F de la loupe, l'image se forme à l'infini (fig. 11.3 et 11.6).

Dans ce cas, $\alpha' = \frac{AB}{OF'} \Rightarrow P = \frac{AB}{OF'} \times \frac{1}{AB} = \frac{1}{OF'} = C = P_i$ d'où la formule (11.8).

3. Le microscope

3.1. Principe de fonctionnement

- Le **microscope** est instrument optique permettant d'observer des objets ou des détails d'objets trop petits pour être discernés à l'œil nu.
- Le microscope est constitué de deux lentilles convergentes :
 - l'**objectif** : c'est un ensemble convergent de très faible distance focale (**de l'ordre de quelques mm**). Il est placé du côté de l'objet à observer. Il donne d'un objet AB , perpendiculaire à l'axe principal, une image A_1B_1 , réelle, agrandie et renversée ; il porte des indications dont la valeur absolue de son grossissement (γ_1) noté **$|\gamma_1| \times$** .
Exemple : $20\times$
 - l'**oculaire** : c'est un ensemble convergent de distance focale moyenne (**de l'ordre de quelques cm**). Il est placé du côté de l'œil et joue le rôle de loupe. Il donne de l'objet réel A_1B_1 , une image finale $A'B'$ virtuelle, agrandie et droite par rapport à l'objet A_1B_1 . Il porte les indications de la forme **$|G| \times$** où G est le grossissement de l'oculaire.



Figure 11.8 : Microscope

- La distance entre les centres optique O_1 et O_2 de l'objectif et de l'oculaire respectivement, est fixe et varie entre **15 et 20 cm** dans le tube encore appelé **statif**.
- L'œil se place au cercle oculaire, légèrement en arrière du plan focal image de l'oculaire.



Figure 11.9 : Observation au microscope

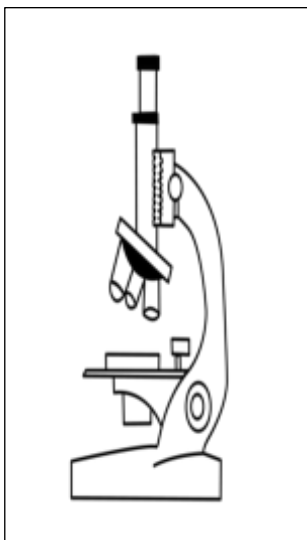


Figure 11.10 : Brochure de dessin

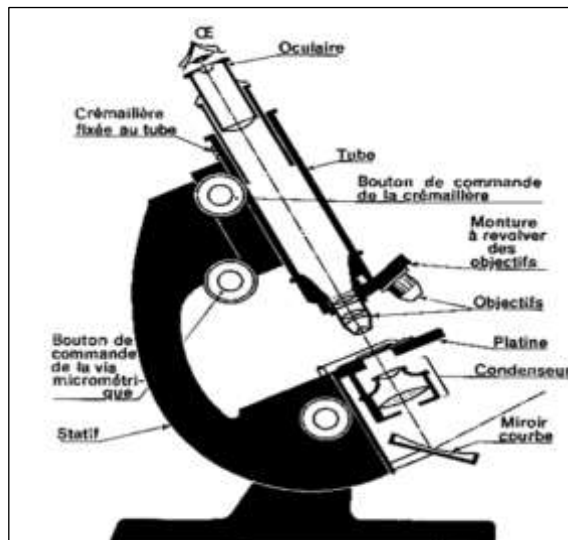


Figure 11.11 : Microscope

3.2. La mise au point

Elle se fait à l'aide d'une **vis micrométrique** située sur le statif par déplacement de l'ensemble objectif-oculaire par rapport à l'objectif. La latitude de mise au point, est très partielle (**varie entre 10^{-6} m et 10^{-5} m**).

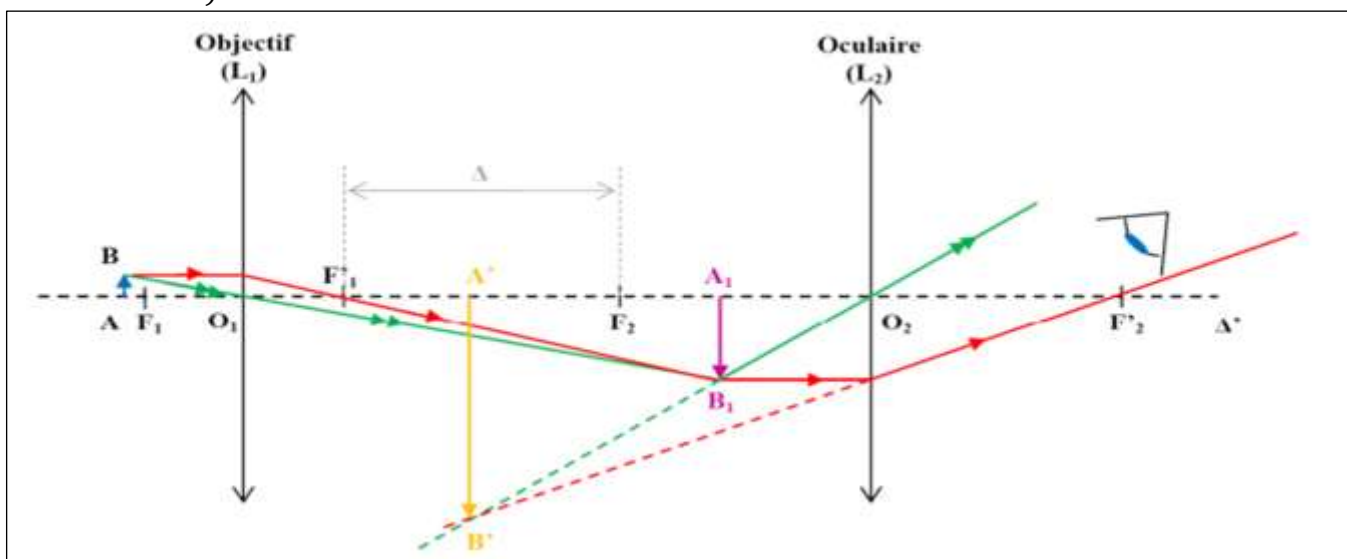


Figure 11.12 : L'œil observe en accommodant

3.3. Puissance et grossissement d'un microscope

$$P = \frac{\alpha'}{AB} = \frac{\alpha'}{A_1B_1} \times \frac{A_1B_1}{AB} = P_2 |\gamma_1| \Rightarrow \begin{cases} P_2 = \frac{\alpha'}{A_1B_1} = \text{puissance.de..l'oculaire} \\ |\gamma_1| = \frac{A_1B_1}{AB} = \text{grandissement..de..l'objectif} \end{cases} \quad (11.9)$$

Remarque

- La grandeur $\Delta = \overline{F'_1 F_2}$ est appelé **intervalle optique** ou **longueur optique** du microscope.
- Lorsque $\Delta = 16 \text{ cm}$, il est appelé **intervalle optique de référence**.
- Δ est lié à la puissance par la relation :

$$P_i = \frac{\Delta}{O_1 F'_1} \times \frac{1}{O_2 F'_2} = \frac{\Delta}{O_1 F'_1} \cdot P_{2i} \quad (P_{2i} = \text{puissance intrinsèque de l'oculaire}) \quad (11.10)$$

Nous savons que le grossissement G d'un instrument d'optique est donné par : $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$

On en déduit alors le grossissement du microscope sous la forme :

$$G_C = |\gamma_1| \times G_{2C} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} G_C = \text{grossissement du microscope} \\ \gamma_1 = \text{grandissement de l'objectif} \\ G_{2C} = \text{grossissement de l'oculaire} \end{cases} \quad (11.11)$$

4. La lunette astronomique

4.1. Principe de fonctionnement

- L'**astronomie** est la science qui a pour but l'étude des corps **célestes** (lune, étoiles, galaxies, etc.).
- La lunette astronomique est constituée de deux systèmes convergents :
 - L'**objectif** de distance focale voisinant 1 à 20 m ;
 - L'**oculaire** de distance focale de l'ordre de quelques cm.
- La construction d'image à travers une lunette astronomique obéit aux mêmes règles que celles d'un microscope.

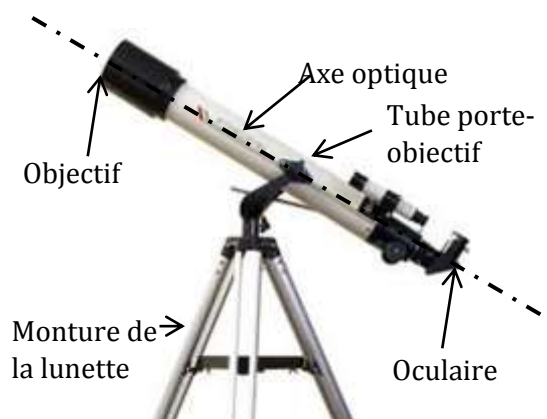


Figure 11.13 : Lunette sur monture azimutale.

On définit alors la lunette astronomique comme étant un instrument d'optique permettant d'observer les astres.

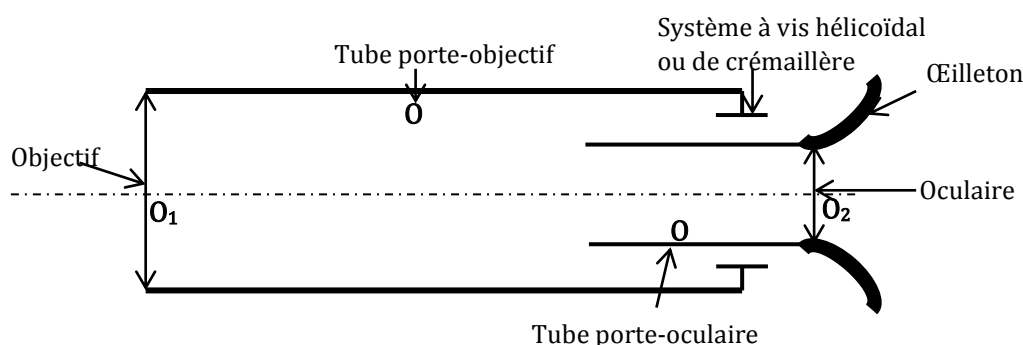


Figure 11.14 : Vue de coupe d'une lunette astronomique

4.2. La mise au point

Elle se fait en déplaçant l'oculaire par rapport à l'objectif. La latitude de mise au point est de l'ordre de quelques millimètres. Pour une vision à l'infini, il faut que l'image $A_1 B_1$ se forme dans le plan focal objet de l'oculaire et dont le foyer de l'objectif seront confondus, dans ce cas, la lunette est dite **afocale** car transforme un faisceau parallèle en un autre faisceau parallèle et l'image d'un objet situé à l'infini est renvoyée à l'infini.

L'enchainement est le suivant :

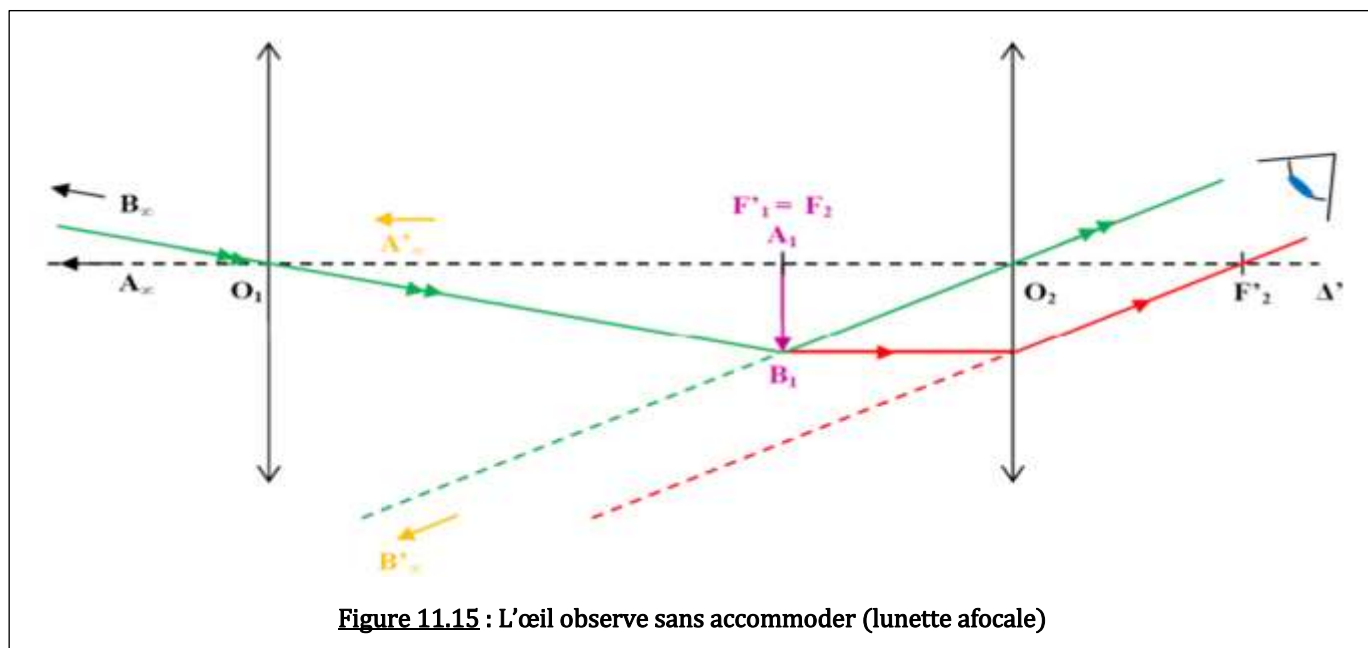
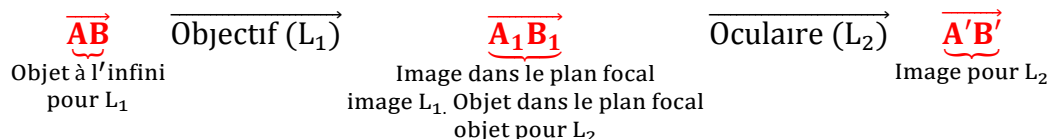


Figure 11.15 : L'œil observe sans accommoder (lunette afocale)

4.3. Puissance et grossissement d'une lunette astronomique

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\alpha'}{A_1B_1} \times \frac{A_1B_1}{\alpha} = \frac{\alpha'}{A_1B_1} \times \overline{O_1F'_1} \Rightarrow G = P_2 \cdot \overline{O_1F'_1} \quad (11.12)$$

$$\text{Pour une lunette afocale, } \alpha' = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2F'_2}} \quad (11.13)$$

- On démontre aussi que : $G = \frac{D}{d}$ où $\begin{cases} D = \text{diamètre.d'ouverture.de.l'objectif} \\ d = \text{diamètre.du.cercle.oculaire} \end{cases} \quad (11.14)$
- La formule (11.14) est appelé **méthode du cercle oculaire**.

Remarque

Le grossissement G d'une lunette afocale est le quotient de la distance focale de l'objectif sur celle de l'oculaire :

$$G = \frac{\overline{O_1F'_1}}{\overline{O_2F'_2}} = \frac{f'_1}{f'_2} \quad (11.15)$$

4.4. Application d'une lunette astronomique

- La première lunette a été fabriquée en **1590** mais ce n'est qu'en **1603** qu'elle a été utilisée par **Galilée**.
- La plus grande lunette est celle de l'observatoire de Yerkes (Wisconsin aux USA). Le diamètre d'ouverture de son objectif est de 1,02 m et sa distance focale de 19,2 m.
- Elle permet aussi de déterminer la distance angulaire de deux points lumineux, ou le diamètre apparent d'une planète.
- Une étoile, vue par une lunette astronomique paraît beaucoup plus brillante qu'à l'œil nu, car le cercle oculaire est plus petit que la pupille de l'œil qui reçoit toute l'intensité du faisceau.

- On appelle **champ d'une lunette**, noté Φ , la portion d'espace vue à travers cette lunette. C'est un cône dont l'angle est d'autant plus petit que la lunette est plus grossissante. Ce champ a la dimension d'un volume i.e. s'exprime en m^3 . La grandeur du champ et le grossissement de la lunette varie en sens contraire.

Activité 11.2

Une lunette afocale comporte un objectif de distance focale f_1 et un oculaire de distance focale f_2 et de rayon r . le rayon extrême qui passe par le bord de l'oculaire permet de calculer le demi-angle maximal $\alpha_{\max}/2$ sous lequel un objet peut être vu entièrement.

- Qu'appelle-t-on lunette afocale ?
- Réaliser une figure de cet énoncé.
- Exprimer $\alpha_{\max}$ en fonction de r , f_2 et le grossissement G .
- En déduire le champ Φ de cette lunette à la distance L de celle-ci.
- Montrer que plus G est grand, plus Φ de la lunette est faible.
- Application numérique : $f_2 = 1,25 \text{ cm}$; $L = 10^3 \text{ m}$; $G = 100$; $r = 3,5 \text{ mm}$. Calculer Φ et conclure.

Solution

$$\text{Lunette afocale : } \begin{cases} \text{objectif} \rightarrow f_1' ; \alpha_{\max} \\ \text{oculaire} \rightarrow f_2' ; r \end{cases}$$

- Une lunette est dite afocale lorsque $F_1' = F_2$.
- Figure expérimentale

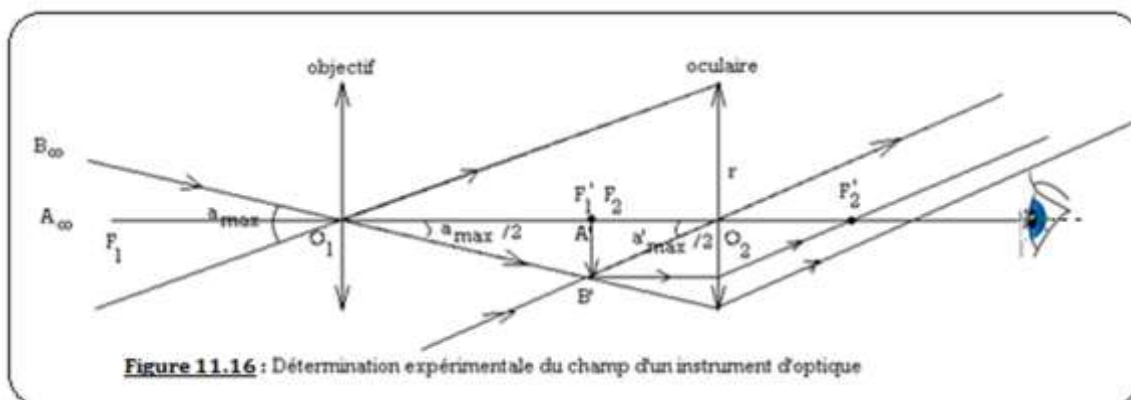


Figure 11.16 : Détermination expérimentale du champ d'un instrument d'optique

- Exprimons $\alpha_{\max} = f(r ; f_2' ; G)$

$$\text{On sait que : } G = \frac{\alpha_{\max}'}{\alpha_{\max}} = \frac{f_1'}{f_2'} \Rightarrow \alpha_{\max} = \frac{\alpha_{\max}'}{G} = \frac{2r}{f_2' \times G}$$

D'où

$$\boxed{\alpha_{\max} = \frac{2r}{f_2' \times G}}$$

- Déduisons-en le champ Φ de cette lunette à la distance L .

$$\text{D'après la loi de } ^{(1)} \text{ Lambert, } \boxed{\phi = \frac{2r}{f_2' \times G} L^3 = KL^3} \text{ avec } \boxed{K = \frac{2r}{f_2' \times G}}$$

- Montrons que plus G est grand plus Φ est faible



Dans la relation précédente, posons $K' = \frac{2r}{f_2'} L^3 \Rightarrow \phi = \frac{K'}{G}$ de ce résultat, on constate que Φ et G sont inversement proportionnels i.e. évoluent en sens inverse. Soit donc, si G augmente Φ diminue.

6. Application numérique : $f_2' = 1,25\text{cm} = 0,0125\text{m}$; $L = 10^3\text{m}$; $G = 100$; $r = 3,5 \cdot 10^{-3}\text{m}$.

$$\Phi = 5600\text{m}^3.$$

Conclusion : Φ a la dimension d'un volume.

Note

(1) **Lambert, Johann Heinrich** (1728-1777), mathématicien, physicien et philosophe allemand, d'origine française.

A- Loupe

Une loupe est constituée par un plan convexe de vergence 50δ et d'indice $n = 3/2$.

1. Quel est le rayon de courbure R de la face convexe ?
2. Calculer la puissance intrinsèque et le grossissement commercial de cette loupe.
3. Cette loupe est utilisée par un œil de punctum remotum et de punctum proximum situés respectivement à 120 cm et 20 cm de l'œil. Définir et déterminer la latitude de mise au point.

B- Lunette astronomique

Une lunette astronomique est constituée d'un objectif de distance focale 200 cm et d'un oculaire de distance focale 4 cm. On suppose la lunette afocale.

1. Que signifie « lunette afocale » ?
2. Déterminer :
 - 2.1. La distance entre les centres optiques de l'oculaire et de l'objectif.
 - 2.2. Le grossissement de la lunette.

Solutions

A- Une loupe est constituée par un plan convexe de vergence 50δ et d'indice $n = 3/2$.

1. Déterminons le rayon R de la face convexe.

$$\text{Par définition, on a : } C = \frac{n-1}{R} \Rightarrow R = \frac{n-1}{C}$$

$$\text{AN : } R = 0,01 \text{ m} = 1 \text{ cm.}$$

2. Calculons :

- La puissance intrinsèque P_i .

$$P_i = C = 50\delta.$$

- Le grossissement commercial G_c . par définition, $G_c = \frac{P_i}{4}$

$$\text{AN : } G_c = 12,5.$$

3. Définition : La latitude de mise au point I_m est la distance comprise entre le PR et le PP.

$$I_m = PR - PP$$

$$\text{AN : } I_m = 100 \text{ cm.}$$

B- Lunette astronomique

On donne : $f_1' = 200\text{cm}$ et $f_2' = 4 \text{ cm}$.

1. Une lunette est dite afocale, lorsque l'intervalle d'optique $\Delta = \overline{F_1'F_2'}$ est nul.

Déterminons :

- 1.1. La distance $\overline{O_1O_2}$. On a : $\overline{O_1O_2} = \overline{O_1F_1'} + \underbrace{\overline{F_1'F_2'}}_0 + \overline{F_2'O_2}$

$$\overline{O_1O_2} = f_1' + f_2'$$

$$\text{AN : } \overline{O_1O_2} = 204\text{cm}$$

- 1.2. Le grossissement G de la lunette

Par définition, on a :

$$G = \frac{f_1'}{f_2'}$$

$$\text{AN : } G = 50$$

5. Le télescope de Newton

Un peu d'histoire

En 1669, le jeune Isaac Newton, à peine âgé de 27 ans, est nommé professeur de mathématiques à Cambridge, période au cours de laquelle il présente son télescope à miroirs à la Royal Society. « Si Newton a construit le premier télescope, c'est parce qu'il est persuadé, à tort, que sa théorie des couleurs condamne la lunette astronomique. Il a démontré en effet, que la lumière blanche était un mélange de lumières colorées, que le prisme déviait différemment. Mais ce n'est pas vrai seulement du prisme. Cela va se produire chaque fois que la lumière traverse la surface d'un morceau de verre, une lentille en particulier : l'objectif d'une lunette donnera toujours des images irisées ». Persuadé qu'il est impossible d'annuler ce défaut, Newton cherche une solution radicale : pas de lentille !

« Le télescope doit remplacer la lunette, car son miroir ne risque pas de disperser les couleurs de la lumière. Le problème avec le télescope, c'est que l'image se forme devant le miroir. L'idéal pour la regarder serait de mettre la tête devant le tube mais alors on empêcherait la lumière de rentrer....Newton a l'idée de renvoyer le faisceau de rayons non pas vers l'arrière mais sur le côté du tube. Pour cela, il suffit d'un petit miroir plan placé sur l'axe du tube et incliné à 45 degrés.... »

Newton et la mécanique céleste - J P Maury - Découvertes Gallimard

Le premier télescope de Newton mesure à peine 20 cm de long ; pourtant les images sont 9 fois plus grandes qu'avec une lunette de 80 cm.

Actuellement, le VLT « Very Large Telescope », implanté dans le nord du Chili à 2600 m d'altitude, est composé de 4 miroirs de 8,2 m chacun, il équivaut à un monstre de 16,4 de diamètre et pourra avoir, dans certaines directions, le pouvoir d'un miroir de 200 m de diamètre.

- Tout comme pour la lunette astronomique il s'agit d'observer à la loupe l'image d'un objet éloigné, l'objectif étant un **miroir sphérique**.
- Une lunette astronomique moderne est constituée de deux lentilles convergentes (comme vue ci-dessus). Une lentille est appelée objectif, elle se situe à l'avant de la lunette et collecte la lumière. La deuxième lentille est appelée oculaire, et permet de former une image qui pourra être observée à l'œil. La première lunette astronomique créée était la lunette de Galilée (1609) (ci-dessous). Elle était faite d'une lentille convergente (objectif) et d'une lentille divergente (oculaire).

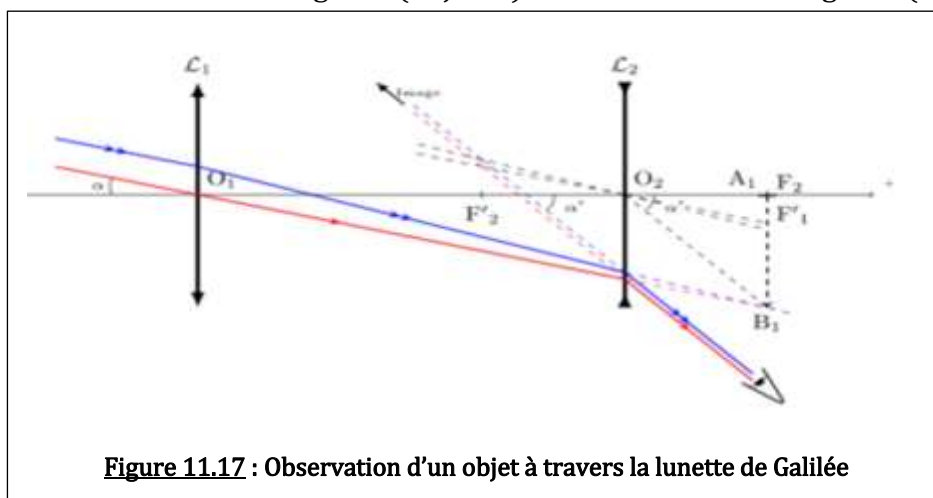


Figure 11.17 : Observation d'un objet à travers la lunette de Galilée

- Un télescope collecte la lumière sur un miroir concave. Ce miroir primaire renvoie la lumière vers un miroir secondaire, puis vers l'oculaire.
- Il existe différents types de télescopes à savoir :
 - Le **télescope de Newton**

- Le **télescope de Schmidt-Cassegrain**
- Le **télescope de Maksutov-Cassegrain**
- Le **télescope de Ritchey – Chrétien**.
- Il faut cependant noter que la différence entre ces télescopes vient des miroirs utilisés.
- Dans ce manuel, nous ne parlerons que du télescope de Newton.

5.1. Description et schéma

Dans le télescope de Newton, à la différence de la lunette astronomique, l'objectif est constitué d'un miroir concave placé au fond d'un tube (miroir principal assimilé à un miroir sphérique) qui réfléchit la lumière vers un second miroir plan incliné à 45° (dit secondaire) qui la renvoie perpendiculairement vers l'oculaire.

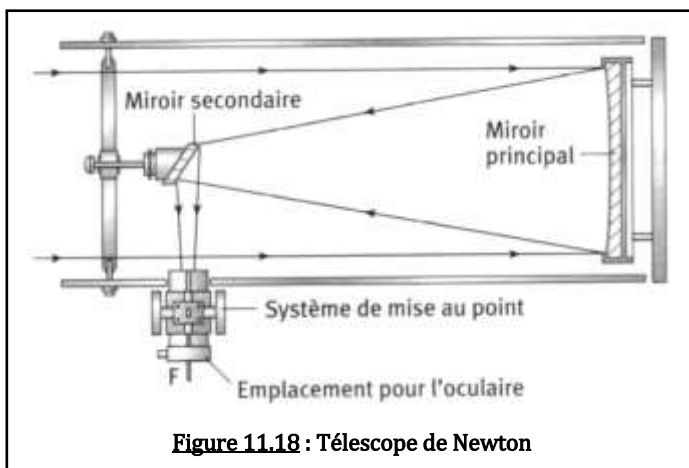


Figure 11.18 : Télescope de Newton

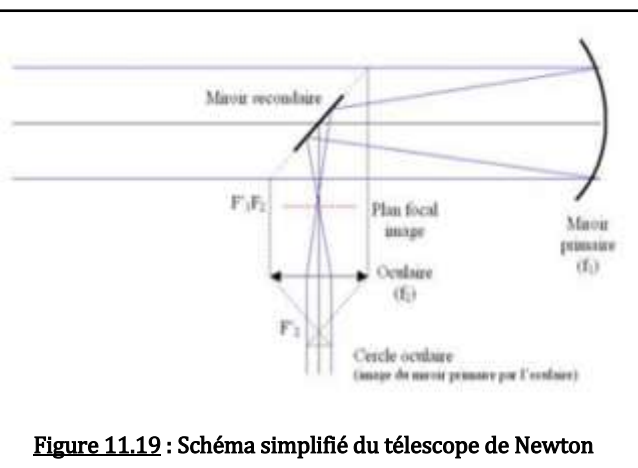


Figure 11.19 : Schéma simplifié du télescope de Newton

- L'**objectif** : SF'_1 représente la distance focale f'_1 de l'objectif. L'objet AB est à l'infini ; son image A_1B_1 , donnée par le miroir sphérique, se situe dans le plan focal image de l'objectif. (Fig. 11.20.a)
- Le **miroir secondaire** : Permet de renvoyer l'image A_2B_2 sur le côté pour permettre son observation ultérieure. (figure 11.20.b).
- L'**oculaire** : Comme pour la lunette, ce système convergent de lentilles joue le rôle d'une loupe. En condition afocale, f'_1 confondu avec le foyer objet f_2 de l'oculaire, l'image définitive $A'B'$ est rejetée à l'infini et peut donc être observée par un œil normal sans accommodation. (fig. 11.20.c)

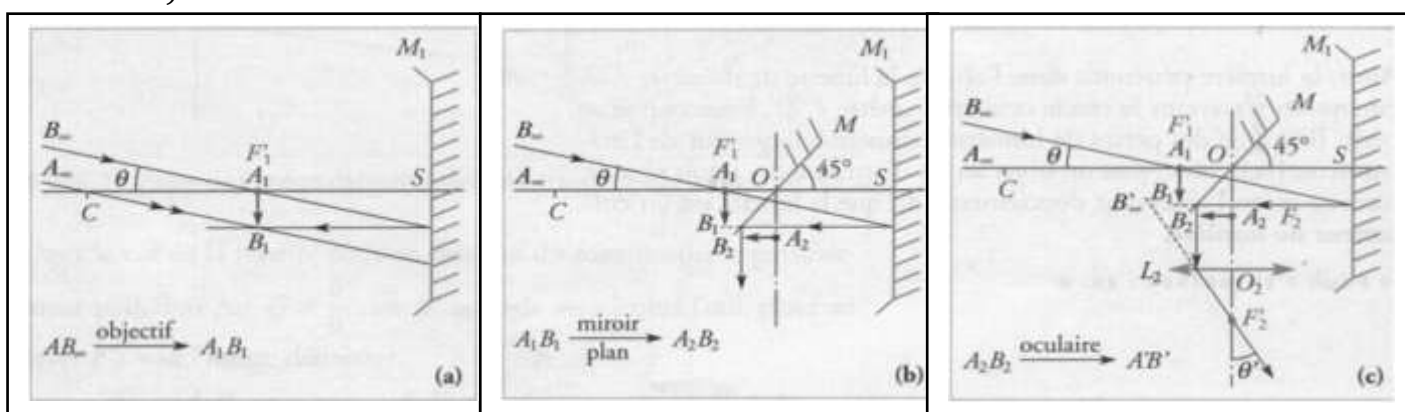


Figure 11.20 : Formation de l'image à travers le télescope de Newton.

- Le grossissement G est donné par :
$$G = \frac{\theta'}{\theta} \quad (11.16)$$



Avec

$$\begin{cases} \theta' = \frac{\overline{A_2 B_2}}{f_2'} \\ \theta = \frac{\overline{A_1 B_1}}{f_1'} \end{cases} \quad (11.17)$$

Or $\overline{A_1 B_1} = \overline{A_2 B_2} \Rightarrow G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{f_1'}{f_2'}$ (11.18)

On retrouve là l'expression du grossissement d'une lunette afocale, cas particulier de la lunette de Galilée.

5.2. Principe de fonctionnement

- Tout rayon lumineux arrivant de l'infini, converge en un point. On appelle ce point le **foyer**.
- La lumière des astres est recueillie par **un miroir primaire de forme parabolique** situé au fond du tube.
- Les rayons sont alors réfléchis vers **un miroir secondaire plan**, placé au centre du tube, qui peut alors observer à l'aide d'un oculaire placé dans le porte-oculaire.
- Le télescope est un système réflecteur.
- Ce mécanisme (ensemble de miroirs) du télescope, mais alors en évidence, le phénomène de **diffraction**.
- Un télescope est alors caractérisé par :
 - une distance focale : f .
 - Le diamètre du miroir D (en mm) : plus le diamètre est grand, plus le télescope collecte de la lumière. Plus la qualité de lumière sera importante, et plus on pourra se permettre de grossir sans perdre en qualité d'image.
 - Le pourcentage d'obstruction : A
 - Un grossissement $G=f/foc$ (foc focale de l'oculaire)
 - Le critère f/D qui permet de savoir ce que l'on peut observer ou photographier.
- Si λ (nm) est la longueur d'onde de la lumière reçue dans le télescope et D le diamètre de l'instrument, le rayon angulaire r de la tâche de diffraction est :

$$r = 1,22 \times \frac{\lambda}{D} \quad (11.18)$$

- Quant au rayon linéaire R (en pm), il s'obtient par :

$$R = r \times f = \frac{1,22 \times \lambda \times f}{D} \quad (11.19)$$

5.3. Intérêt par rapport aux instruments à lentilles

- Les télescopes ne souffrent pas de l'aberration chromatique comme les lunettes astronomiques car ils utilisent des miroirs pour collecter la lumière.
- Le coût de fabrication est moindre que pour une lunette, ce qui se répercute sur le prix de vente.
- Le télescope permet l'observation du ciel profond. Beaucoup sont adaptés pour la pratique de l'astrophotographie.
- Les télescopes de Newton peuvent être assez encombrants. Ils sont plus sensibles aux turbulences atmosphériques que les lunettes astronomiques. La collimation peut être difficile pour les débutants.
- Les télescopes de type Cassegrain sont plus compacts que les télescope de type Newton. Ils sont très polyvalents et conviennent à la fois pour l'observation des planètes, du ciel profond ou pour faire de l'astrophotographie. Les images sont de très grandes qualités, encore plus pour les Maksutov-Cassegrain. Ce sont des télescopes très robustes et ils bénéficient d'un très large choix d'accessoires.

Remarque

Aucune lunette ou télescope ne serait sans sa **monture**. On distingue alors :

Monture équatoriale

Une monture équatoriale stable est nécessaire pour compenser le mouvement de rotation de la Terre. Si la mise en station est effectuée correctement, l'objet observé est maintenu au centre du champ par rotation inverse autour de l'axe horaire. Ce mouvement horaire est souvent assuré par un moteur. (fig. 11.21). On distingue ici :

- Les **montures équatoriales allemandes**
- Les **montures équatoriales à fourche** ↗

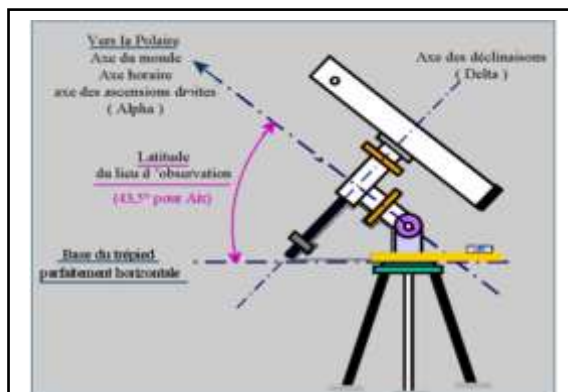


Figure 11.21 : Monture équatorial à fourche

Monture azimutale

Une monture azimutale comporte un axe vertical (axe d'azimut) et un axe horizontal (axe de hauteur). Ce type de monture peut être motorisé pour compenser les mouvements terrestres. Cependant, le champ observé dans l'instrument est en rotation, ce qui interdit les photographies en pose longue. (fig.11.22)

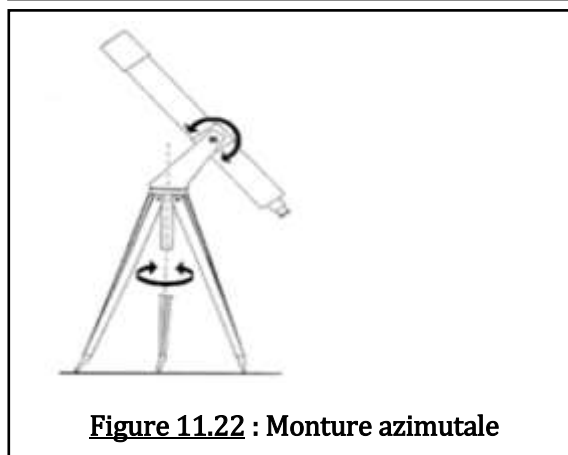


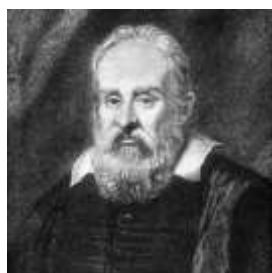
Figure 11.22 : Monture azimutale

6. Jeu bilingue

Expressions françaises	English expression
Loupe	Magnifying glass
Microscope	Microscope
Télescope	Telescope, scope
Monture	Mount, mounting, setting.

Sentence

The microscope is optical instrument that magnifies images of objects invisible to naked eye by means of a lens or a lens system.



Galileo Galilée (1564-1642)



Isaac Newton (1643 – 1727)

- L'œil humain a une puissance de 59 δ, dont la plus grande partie (43 δ) est fournie par la cornée.
- Le grossissement est une grandeur algébrique. Pour l'objectif, si l'image est renversée par rapport à l'objet, $G_{ob} < 0$.

**EXERCICES DE LA LEÇON 11 : LES INSTRUMENTS D'OPTIQUE****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS**

- Définir : instrument d'optique ; latitude de mise au point ; télescope.
- Donner le rôle des appareils optiques suivants :
 - La loupe
 - Le microscope
 - La lunette astronomique.
- Donner la mise au point de chacun des appareils optiques suivants :
 - La loupe
 - Le microscope
- Recopier et compléter les phrases suivantes
 - Le microscope est un instrument.....comprenant un objectif assimilable à une lentille mince très.....et un.....jouant le rôle de.....dans l'examen de l'image réelle.
 - La mise au point consiste à mener l'image finale donnée par l'instrument optique entre le.....et le.....
 - La lunette astronomique est dite.....lorsque sa mise au point est réalisée à l'infini.
 - Le.....d'un instrument optique est le plus petit angle sous lequel l'œil peut distinguer deux points d'un objet à travers un instrument optique.
- Répondre par vrai ou faux et justifier les affirmations fausses.
 - Un microscope permet de mieux voir qu'à l'œil nu des objets éloignés.
 - Le télescope et la lunette sont des instruments d'optique de même envergure.
 - Le pouvoir séparateur de l'œil est l'angle limite sous lequel l'œil est capable de faire la distinction entre deux points d'un détail.
 - Une lunette astronomique est dite afocale, lorsque l'image objective se forme sur le plan focal objet de l'oculaire.
 - La puissance P d'un appareil optique s'exprime en dioptrie.
 - Dans un microscope, l'objectif joue le rôle de loupe.
 - La distance focale de l'objectif d'un microscope est de l'ordre de quelques mètres.
 - Tous les instruments optiques sont constitués de deux lentilles convergentes.
 - Tous les instruments optiques ont pour trait commun, la formation d'une image finale virtuelle.
- Question à choix multiples (QCM)
 - L'objectif d'un instrument optique est assimilable à :
 - Une lentille divergente
 - Une lentille convergente
 - Un miroir.

- L'oculaire d'un instrument optique est assimilable à :
 - Une lentille divergente
 - Un miroir
 - Une loupe.
- La différence entre la fonction d'un microscope et celle d'une lunette astronomique se situe sur :
 - La nature de leur objectif
 - La nature de leur oculaire
 - La position et le type d'objet à observer.
- Le microscope donne une image définitive :
 - Réelle
 - Droite
 - Agrandie.
- L'oculaire est le système optique situé près de :
 - L'objet
 - L'image
 - L'œil.
- La distance focale de l'objectif d'une lunette astronomique est de l'ordre du :
 - Millimètre
 - Centimètre
 - Mètre.
- Le grossissement G d'un instrument optique est :
 - $G = \alpha / \alpha'$
 - $G = \alpha' / \alpha$
 - $G = P_i / d_m$.
- L'intervalle d'optique Δ est dit de référence lorsqu'elle vaut :
 - 32 cm ;
 - 16 cm ;
 - 16 mm.
- Dans un microscope, un objectif marqué x30, est combiné à un oculaire marqué x70.
 - Donner la signification de chaque indication.
 - Calculer le grossissement du microscope.
- La puissance intrinsèque d'un microscope est donnée par la relation $P_i = \frac{\Delta}{O_1 F_1' \times O_2 F_2'}$
Donner les noms et les unités des grandeurs physiques présentes dans cette relation.
- Deux lentilles de distance focale 2 cm et 180 cm sont utilisées pour construire une lunette astronomique.
Attribuer à l'objectif et à l'oculaire leur distance focale respective.
- En vous servant du cours et de vos connaissances, répondez aux questions suivantes.
 - Pourquoi dit-on qu'un microscope forme l'image d'une image ?
 - Qu'est-ce qui distingue la fonction d'un microscope à celle d'un télescope ?
 - Qu'est-ce qui distingue la longueur focale de l'objectif d'un microscope de celle de l'objectif d'un télescope ?



- 10.4. Quelle est la différence entre un télescope réflecteur et un télescope réfracteur ?
- 10.5. Le télescope spatial Hubble est doté d'un miroir principal dont la longueur focale est de 24 m. si ce miroir était sphérique au lieu d'être parabolique, quel serait son rayon de courbure ?

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

- Un objet de 10 mm est observé à l'aide d'un microscope de 10 000 δ de puissance. Sous quel angle sera vu cet objet ?
- Un microscope a un objectif de grandissement γ_1 (x 63) et un oculaire de grossissement commercial G_{2c} (x 10). La longueur (ou intervalle) optique est $\Delta = 185,0$ mm.
 - Calculer les distances focales de l'objectif et de l'oculaire.
 - Calculer le grossissement commercial du microscope.
- Le grossissement commercial d'un microscope est de 250. Déduire, de cette valeur, sa puissance intrinsèque.
- Un objet AB est placé à 0,8 cm d'une lentille convergente de distance focale 1 cm.
 - Construire l'image A'B' de cet objet.
 - Déterminer par le calcul, la position de cette image.
 - Cette lentille est une loupe. L'observateur regarde l'image de cet objet à travers la loupe, l'objet mesure 0,3 mm.
 - Déterminer la taille de l'image A'B'.
 - Déterminer le grandissement de la loupe.
- L'œil étant placé au foyer image de la loupe, déterminer le rapport (grossissement de la loupe) entre l'angle sous lequel on voit l'image et l'angle sous lequel l'observateur voit l'objet à l'œil nu, l'objet étant placé à 25 cm de cet œil.
- Une lunette astronomique afocale est constituée d'un objectif de distance focale $f_1' = 1,00$ m et d'un oculaire de distance focale $f_2' = 10$ cm, assimilables à des lentilles convergentes de même axe optique. À l'aide de cette lunette, un observateur voit la lune avec un diamètre apparent de 96.10^4 rad. L'axe de cette lunette pointe vers le centre du disque lunaire.
 - Calculer le diamètre de l'image intermédiaire (image objective).
 - Donner la définition du grossissement de la lunette, puis calculer sa valeur.
- On veut concevoir un microscope pour être utilisé avec un œil détendu et l'on dispose de deux lentilles convergentes de distance focale 25 mm. On suppose que l'objet est situé à 27 mm de l'objectif.
 - Déterminer la position de l'image objective ?
 - En déduire alors la distance O_1O_2 entre les lentilles.
 - Déterminer le grossissement G_{ob} de l'objectif et celui G_{oc} de l'oculaire.

- Quel sera le grossissement G angulaire de ce microscope ?
- Un œil, dont la distance minimale de vision distincte est de 20 cm, regarde un objet de longueur 0,30 mm à travers une loupe de 3 cm de distance focale. L'œil de l'observateur étant dans le plan focal image de loupe, déterminer :
 - Le diamètre apparent α' de l'image de cet objet. Dépend-t-il de l'accommodation de l'œil ?
 - Le diamètre apparent α de l'objet à l'œil nu.
 - La puissance et le grossissement de la loupe.
- Un œil dont la distance minimale de vision distincte est de 20 cm, utilise une loupe, de distance focale 2 cm, pour observer un objet AB. Sachant que l'œil est placé à 1 cm du centre optique de la loupe, et que l'image A'B' est à 20 cm du sommet S de cet œil, déterminer :
 - La puissance P de la loupe et la comparer à sa puissance intrinsèque P_i .
 - Le grossissement G de la loupe et la comparer à son grossissement commercial G_c .
- On considère une loupe de distance focale 2 cm.
 - Déterminer sa puissance intrinsèque P_i et son grossissement commercial G_c .
 - Un œil myope, placé au foyer image de cette loupe et dont la distance minimale de vision distincte est de 12 cm, distingue à travers elle et en accommodant au maximum, l'image d'un petit objet. Déterminer :
 - Sa puissance.
 - Son grossissement.
- Un objet AB, de longueur 1 mm, est placé à 4,1 mm de l'objectif (L_1) d'un microscope, dont la distance focale est de 4 mm. L'objet AB est perpendiculaire à l'axe optique du microscope, A étant sur l'axe optique.
 - Déterminer la position, la nature et la grandeur de l'image A_1B_1 de AB à travers (L_1).
 - L'oculaire (L_2) du microscope, de distance focale 20 mm, est situé à 184 mm de (L_1).
 - Quel rôle joue l'image A_1B_1 pour (L_2) ?
 - Déterminer la position de A_1B_1 par rapport à (L_2).
 - Où se trouve l'image A_2B_2 de A_1B_1 à travers (L_2) ?
 - Calculer la puissance et le grossissement commercial de ce microscope.
 - Sous quel angle α' , l'œil d'un observateur, à vue normale, et placé au plan focal image de (L_2), voit-il A_2B_2 ?
 - Tracer la marche d'un pinceau lumineux issu de B et traversant le microscope.
- Une loupe est une lentille convergente de distance focale $OF' = 5$ cm. L'image A'B' d'un objet AB de 1 cm de haut, placé à 4 cm du centre optique O de la loupe et perpendiculaire à l'axe de celle-ci, est située à 20 cm de la loupe.



- 11.1.** Un œil, placé en F' , observe cette image sous un angle α' . Calculer α' en radians.
- 11.2.** Sous quel angle α l'œil, placé à 25 cm de l'objet AB, verrait-il cet objet sans sa loupe ?
- 11.3.** Calculer le grossissement $G = \alpha'/\alpha$ de la loupe.
- 12.** Une lunette astronomique est constituée d'un objectif de distance focale 200 cm et d'un oculaire de distance focale 4 cm. La lunette étant afocale, déterminer :
- 12.1.** La distance entre les centres optiques de l'oculaire et de l'objectif.
- 12.2.** Le grossissement de la lunette.
- 13.** L'objectif et l'oculaire d'une lunette astronomique ont pour distance focale respective $f_1' = 2\text{m}$ et $f_2' = 8\text{cm}$. La distance angulaire de deux étoiles est $a = 2.10^3 \text{ rad}$.
- 13.1.** La lunette est-elle afocale ? Justifier votre réponse.
- 13.2.** Quelle est la valeur G du grossissement de cette lunette ?
- 13.3.** Calculer la valeur de la distance angulaire apparente des deux étoiles vues par un œil normal, à travers la lunette.
- 14.** Pour comprendre le principe d'une lunette astronomique, on associe deux lentilles convergentes :
- Un objectif de distance focale $f_1' = 8 \text{ cm}$ qui donne dans son plan focal image, une image $A_1B_1 = -1\text{cm}$ d'un objet situé à l'infini.
 - Un oculaire de distance focale $f_2' = 3 \text{ cm}$ et placé à 10 cm derrière l'objectif.
- 14.1.** Construire l'image finale d'un objet situé à l'infini, à travers la lunette astronomique ainsi constituée. Échelle 1 : 1.
- 14.2.** Déterminer la position et la grandeur de l'image finale $A'B'$.
- 15.** Un microscope est muni d'un objectif et d'un oculaire et d'un oculaire dont les puissances respectives sont 100 δ et 20 δ . Il est utilisé sans accommodation par un observateur à la vue normale. La distance de l'objectif à l'oculaire est $O_1O_2 = 16\text{cm}$. Calculer :
- 15.1.** Le grossissement commercial de ce microscope.
- 15.2.** L'angle sous lequel on voit à travers cet instrument, un globule rouge dont le diamètre est de 22 mm.
- 15.3.** Le diamètre d'un objet qui serait vu à l'œil nu sous ce même angle, à la distance de 25 cm.
- 16.** Une loupe est constitué par un plan convexe de vergence 50 δ et d'indice $n = 3/2$.
- 16.1.** Quel est le rayon R de courbure de la face convexe ?
- 16.2.** Calculer la puissance intrinsèque et le grossissement commercial de cette loupe.
- 16.3.** Cette loupe est utilisée par un œil de punctum remotum et de punctum proximum situés respectivement à 120 cm et 20 cm de l'œil. Définir et déterminer la latitude de mise au point.

17. Un objet est observé à travers une loupe.

17.1. Quelle est la nature de l'image obtenue ? Justifier

17.2. Dans quel intervalle doit-on alors placer cet objet ?

18. Pour quelle valeur de l'intervalle d'optique, a-t-on une lunette afocale ?

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES.

Situation 1 : Obtention d'une image nette.

Pourquoi faut-il placer les diapositives à l'envers dans un projecteur de diapositives ?

Situation 2 : Lunette de Galilée

On fabrique une lunette en utilisant comme objectif une lentille mince convergente L_1 de distance focale $f_1' > 0$ et comme oculaire une lentille mince divergente L_2 de distance focale $f_2' < 0$. Les axes de ces deux lentilles coïncident, et elles sont placées de telle façon que le foyer image de L_1 corresponde au foyer objet de L_2 .

Faire un schéma et montrer qu'un tel dispositif est afocal, et fournit d'un objet à l'infini une image «droite». Calculer le grossissement pour $f_1' = 20 \text{ cm}$ et $f_2' = -5 \text{ cm}$.

Situation 3 : Projection à l'aide d'un miroir concave

1. On dispose d'un miroir concave de rayon $R = 1\text{m}$. quelle est sa focale ?
2. Ce miroir est placé à la distance $D = 5\text{m}$ d'un écran E. Où doit-on placer un petit objet pour en avoir une image nette sur E ? Quel est le grandissement ?

Situation 4 : Loupe ou oculaire ?

Soit une lentille L_1 convergente de distance focale image $f_1' = 4\text{cm}$. On souhaite utiliser cette lentille comme une loupe.

1. Donner la valeur de la vergence de cette lentille en dioptrie.
2. Sachant que l'on souhaite avoir une image droite et grossie de l'objet, où doit se trouver l'objet à observer ? Expliquer votre réponse par le calcul ou graphiquement.

On rappelle que le pouvoir d'accommodation d'un œil emmétrope (=sans défaut) permet d'observer de façon nette des objets situés à des distances d de l'œil allant de 25cm à l'infini.

3. Donner l'ensemble des positions de l'objet pour lesquelles un œil situé à 1cm de la lentille L_1 voit l'objet de façon nette.

Situation 5 : Télescope de Newton

À l'aide d'un schéma, expliquer la marche d'un rayon lumineux à travers le télescope de Newton.



EXERCICES DE SYNTHÈSE DU MODULE 3

Exercice 1 : Formule de conjugaison

On désigne par p (resp. p'), la distance entre un objet AB (resp. son image A'B') et le centre d'une lentille convergente de distance focale f' .

1. Réaliser la figure.
2. Déterminer l'expression de p' en fonction de p et f' si l'objet et l'image sont réels.
3. En déduire les expressions de AA' et du grandissement.
4. Déterminer les expressions de la distance AA' et du grandissement en fonction de p et f' si l'objet est réel et l'image virtuelle.
5. Refaire la question 4 dans le cas d'un objet virtuel et d'une image réelle. Conclure.

Exercice 2 : Loupe

On considère une loupe de distance focale f' . Son «grossissement commercial» (noté G_c) représente le rapport de l'angle sous lequel on voit un objet quand il est placé au foyer de la loupe sur l'angle sous lequel on le verrait, sans loupe, s'il était placé au punctum proximum noté d_m de l'observateur.

1. Que devient le grossissement de la loupe si on fait en sorte que l'image virtuelle soit à la distance d_m de l'observateur, celui-ci collant son œil à la loupe.
2. Calculer ce nouveau grossissement si $G_c = 3$, pour $d_m = 25\text{cm}$.

Exercice 3 : Oculaires

Les oculaires utilisés dans les instruments d'optique (microscope par exemple) sont constitué d'un double de deux lentilles. On note f'_1 et f'_2 des lentilles et on pose $\Delta = \overline{F'_1 F'_2}$. On prendra par la suite, un doublet tel que $f'_1 = 3\alpha$, $f'_2 = \alpha$ et $\overline{O_1 O_2} = 2\alpha$ la distance entre les centres des deux lentilles. La constante α est positive.

1. On note F et F' les positions des foyers objet et image de l'ensemble du dispositif. Déterminer graphiquement leur position.
2. Montrer qu'on a $\overline{F_1 F} = -\frac{f_1'^2}{\Delta}$ et $\overline{F_2' F'} = \frac{f_2'^2}{\Delta}$

Vérifier l'accord avec la construction graphique.

Exercice 4 : Lunette astronomique

On se propose de modéliser une lunette astronomique à l'aide de deux lentilles convergentes : une lentille L_1 de focale $f'_1 = 60\text{ cm}$ et une lentille L_2 de focale $f'_2 = 10\text{ cm}$.

On prend une lentille L_2 à laquelle on associe la lentille L_1 , placée devant L_2 , pour simuler sur le banc d'optique une lunette astronomique utilisée pour observer un objet AB.

1. Quelle lentille sert d'oculaire ? D'objectif ? Justifier.

2. Comment placer les 2-lentilles de manière de manière à ce que l'œil n'accommode pas i.e. que l'objet observé à travers l'oculaire soit à l'infini ?
3. Tracer, sur une feuille de papier millimétré, l'image d'un objet provenant de l'infini et faisant un angle α avec l'axe optique. Une des caractéristiques de ce système optique est son grossissement défini par le rapport du diamètre apparent de l'image à celui de l'objet : $G = \alpha'/\alpha$.
- 3.1. Déterminer le diamètre apparent α de l'objet et le diamètre apparent α' de l'image.
- 3.2. Indiquer ces deux diamètres apparents sur la figure.
- 3.3. Exprimer G en fonction des distances focales des deux lentilles puis le calculer.
- 3.4. En déduire un moyen d'augmenter le grossissement d'une lunette astronomique.

Exercice 5 : Télescope de Newton

On veut construire un télescope de type Newton à l'aide d'un miroir primaire sphérique de diamètre d'ouverture $D = 40\text{ mm}$ et de rayon de courbure $R = 30\text{ cm}$.

1. Quelle est la distance focale f'_1 du miroir primaire ?
2. Le miroir plan secondaire, incliné à 45° par rapport à l'axe du miroir primaire, est placé à 10 cm du sommet S de ce dernier.

Grâce à lui, à quelle distance de l'axe du miroir primaire est rejeté le foyer F'_1 ? On repère par F''_1 la nouvelle position du foyer.

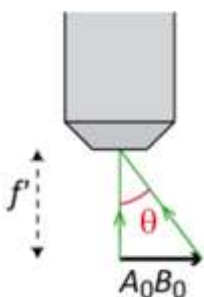
3. On place l'oculaire, de focale 12 mm , en faisant coïncider son foyer objet F, avec le foyer F''_1 . Schématisez en taille réelle le dispositif miroir primaire secondaire / oculaire.
4. Grâce à un filtre spécial, on observe le Soleil dont le centre est dans le prolongement de l'axe du miroir primaire.
- 4.1. En représentant le Soleil par son diamètre apparent α , construisez sur le schéma précédent l'image $A_1 B_1$ qu'en donne le miroir primaire seul.
- 4.2. Sur ce même schéma, placez l'image $A_1' B_1'$ qu'en donne ensuite le miroir secondaire.
- 4.3. Construisez l'image finale fournie par l'oculaire. Où se situe-t-elle ?
- 4.4. Indiquez sur le schéma l'angle α' sous lequel on observe l'image finale.
5. Exprimez α en fonction de la distance focale du miroir primaire et de la grandeur $A_1 B_1$ de l'image intermédiaire du Soleil.

- 5.1. Exprimez α' en fonction de la distance focale de l'oculaire et de A_1B_1 .
- 5.2. Établissez alors une relation permettant de calculer le grossissement G du télescope défini par $G = \alpha' / \alpha$.
6. On pourrait déplacer le miroir secondaire pour le rapprocher du foyer du miroir principal ; quel serait l'intérêt de cette modification ?
 - Comment la position de l'oculaire est-elle déplacée dans ce cas ?
 - Quel peut-être alors l'inconvénient de la modification ?

Exercice 6 : Microscopie et pouvoir de résolution.

Un microscope est utilisé avec un objectif dont l'ouverture possède un diamètre de 1 mm et une distance focale de valeur $f' = 4$ mm.

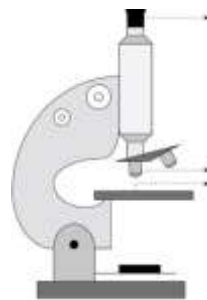
1. Calculer le pouvoir de résolution de ce microscope. Pour traiter cette question on supposera que la diffraction est le seul phénomène qui limite la résolution de l'instrument. On considère la longueur d'onde correspondant au maximum de sensibilité de l'œil : $\lambda \approx 550$ nm.
2. En considérant que les objets sont approximativement situés dans le plan focal objet de l'objectif, calculer la taille minimale d'un objet visible dans ce microscope. On pourra s'aider de la figure ci-contre, où sont représentés l'objectif, l'objet le plus petit observable et deux rayons de lumière qui en sont issus.
3. Donner quelques exemples, en biologie, d'objets observables dans cet instrument.
4. Comment faudrait-il modifier l'objectif pour que cette taille minimale diminue ? D'après vos connaissances sur les lentilles, pourquoi n'est-ce pas faisable aisément ?



Exercice 7 : Constitution et fonctionnement du microscope

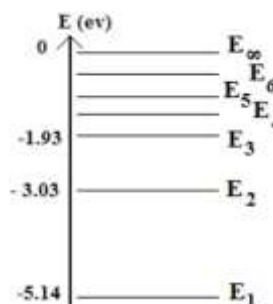
1. Sur la figure du microscope ci-dessous, légèrer la figure par les mots : oculaire-objectif-objet.
2. Compléter les phrases suivantes :
 - 2.1. L'objectif donne de l'objet observé une image (...), (...) et (...). Cette image est appelée (...).

- 2.2. Lorsque la mise au point est effectuée, l'image donnée par l'oculaire est (...) et (...).
3. [QCM] Afin d'augmenter le grossissement du microscope, on peut :
 - 3.1. Modifier la distance objectif-oculaire
 - 3.2. Modifier la distance objet-objectif
 - 3.3. Remplacer l'oculaire par un autre de distance focale plus élevée.
 - 3.4. Remplacer l'oculaire par un autre de distance focale plus faible.
 - 3.5. Remplacer l'objectif par un autre de grande vergence.
 - 3.6. Remplacer l'objectif par un autre de faible vergence.



Exercice 8 : Spectre de l'atome de Na

Données : $h = 6,63 \cdot 10^{-32}$ Js ; $c = 3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ ;
 $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J.



On donne le diagramme des niveaux d'énergie du sodium ci-dessus.

1. Que signifie le terme «quantifié» lorsqu'on dit que les niveaux d'énergie de l'atome de sodium sont quantifiés ? À quoi doit-on ce terme ?
2. Déterminer la longueur d'onde du photon émis lorsque l'atome de sodium se désexcite de son état E_3 vers son état fondamental.
3. À quel domaine des ondes électromagnétiques ce rayonnement appartient-il ?
4. Lorsqu'il est en état E_3 , le photon peut-il émettre un photon de fréquence $2,66 \cdot 10^{14}$ Hz ? Justifier.
5. Quel type de spectre obtient-on avec une lampe à vapeur de sodium ? À quoi ressemble-t-il ?

Exercice 9 : Année-lumière

Calculer la distance parcourue par la lumière dans l'espace sidéral après 50 ans, si l'on suppose sa trajectoire rectiligne.



Leçon 12

LES GÉNÉRATEURS OU DIPÔLES ACTIFS

Activité

Observe attentivement l'image de droite.

Comment cet homme assis à l'aire libre pense-t-il faire fonctionner :

- Son écran ?
 - Sa lampe de bureau ?
- Identifie la source d'énergie.

ACTIVITÉS**Objectifs**

- Définir : générateur
- Symboliser un générateur
- Ressortir le modèle de Thévenin d'un générateur
- Évaluer les caractéristiques d'un générateur
- Énoncer et appliquer la loi d'Ohm pour un générateur
- Effectuer des calculs sur les groupements des générateurs.

1. Définition et représentation**1.1. Définition**

- Un **générateur** est un dipôle actif dissymétrique qui produit du courant électrique à un circuit extérieur.

Exemple

- Les piles, qui dans un circuit électrique, transforment l'énergie chimique en énergie électrique;
 - Les photopiles qui convertissent l'énergie lumineuse reçue du soleil en énergie électrique ;
 - Les thermocouples qui convertissent une partie de l'énergie d'agitation thermique en énergie électrique ;
 - Les accumulateurs ;
 - L'alimentation stabilisée
 - Etc.
- Tout générateur possède deux bornes de branchement :
 - Une **borne positive** (ou pôle positif) notée **P** de signe +
 - Un **pôle négatif** (ou borne négative) noté(e) **N** de signe -

1.2. Représentations

1.2.1. Symboles normalisés

- On distingue :
- Les générateurs de **courant continu**, dont le symbole normalisé est :

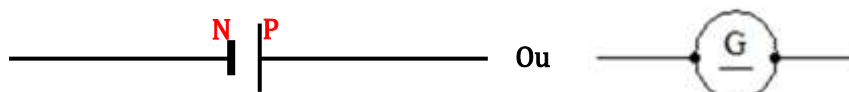


Figure 12.1 : Symboles normalisés d'un générateur de courant continu

- Les générateurs de **courant alternatif** dont le symbole normalisé est :



Figure 12.2 : Symboles normalisés d'un générateur de courant alternatif

- Comme nous l'avons défini plus haut, un générateur crée le courant électrique utilisable par tout autre dispositif d'un circuit électrique. Cela implique alors qu'aux bornes du générateur, ce qui crée une **différence de potentiel** (ddp) notée $V_P - V_N = U_{PN}$. On dit alors qu'en mode générateur, le courant et la tension ont même sens aux bornes du générateur, car, selon la convention d'ampère, le sens du courant est de P vers N.

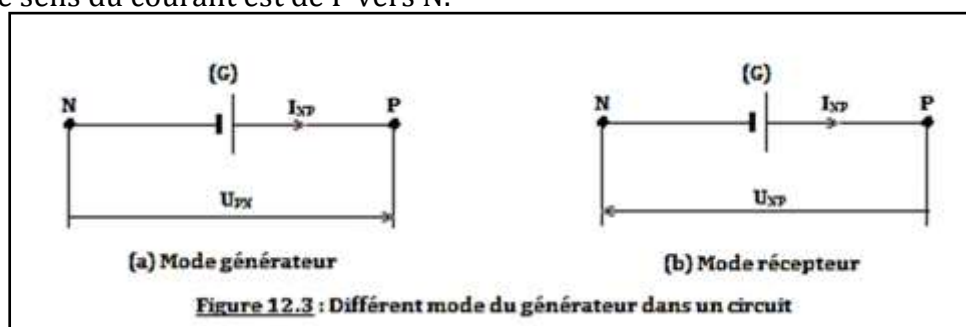


Figure 12.3 : Différent mode du générateur dans un circuit

1.2.2. Représentation en modèle de Thévenin

Le modèle de Thévenin pour un générateur linéaire, est le schéma équivalent du générateur linéaire. Il met en évidence les caractéristiques internes du générateur. Sa représentation est la suivante :

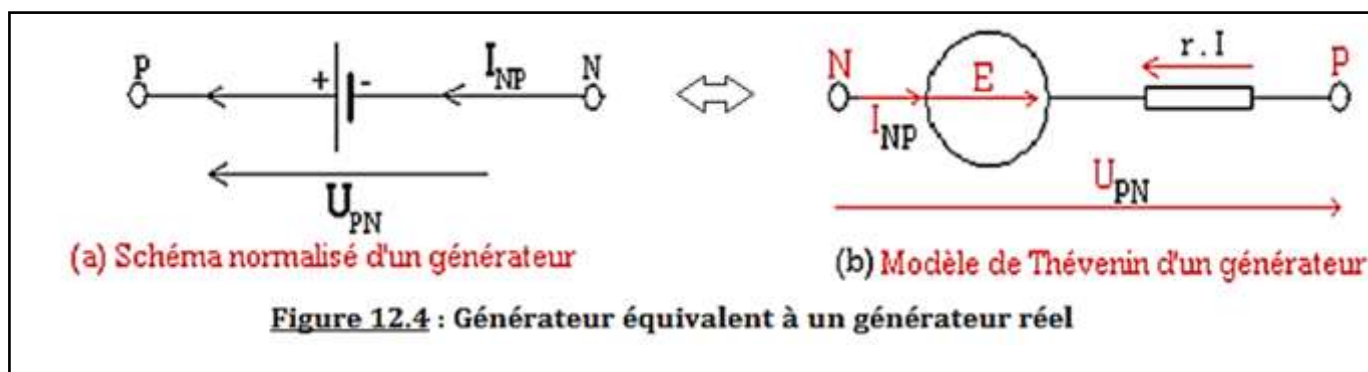


Figure 12.4 : Générateur équivalent à un générateur réel

1.3. Les caractéristiques d'un générateur

Un dipôle actif (générateur) est caractérisé par :

1.3.1. La force électromotrice

- Lorsque le générateur ne débite pas, on dit qu'il est « à vide » et la tension à ses bornes U_{PN} est appelée **tension à vide** ou **force électromotrice** notée **E** et abrégée **f.é.m.**

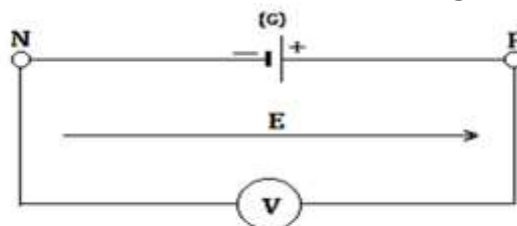


Figure 12.5 : Mesure pratique de la f.é.m. du générateur.

- La tension aux bornes d'un générateur en charge est appelée chute de tension et est obtenue par la relation **$E - U_{PN} > 0$** . Celle-ci croît lorsque le débit augmente.
- La f.é.m. E d'un générateur est le rapport de la puissance électrique fournie P_f , à l'intensité I du courant fourni par G :

$$E = \frac{P_f}{I} \quad (12.1)$$

Unités : P_f (en Watts (W)) ; I (en ampères (A)) ; E (en volts (V))

1.3.2. La résistance interne

Le générateur consomme une partie de l'énergie électrique qu'il fournit par effet joule. Il comporte donc un résistor de résistance **r** dite **résistance interne** du générateur. La puissance dissipée par effet Joule dans le générateur est telle que :

$$P_j = r \times I^2 \quad (12.2)$$

Unités : P_j (W) ; I (A) ; r (en ohms (Ω))

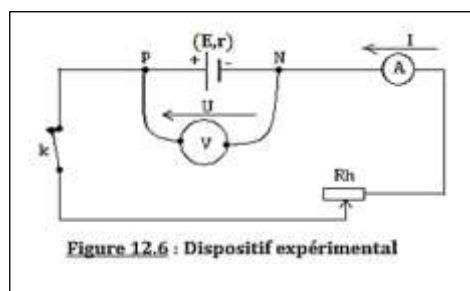
1.3.3. Caractéristique d'un générateur

- Un générateur est alors caractérisé par une f.é.m. E et une résistance interne. On adoptera alors l'écriture suivante : **G (E, r)**.
- La caractéristique d'un générateur est la représentation graphique de l'expression de la tension $U = U_{PN}$ à ses bornes lorsqu'il débite le courant d'intensité I :

$$U = E - r \times I \quad (12.3)$$

La courbe **$U = f(I)$** est la caractéristique courant-tension.

- Étudions alors la caractéristique $U = f(I)$
 - Dispositif expérimental



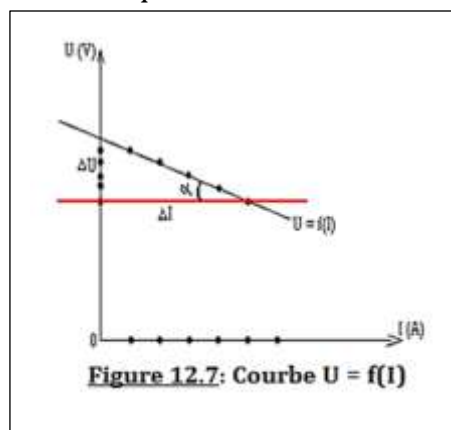
Légende

- (k) : interrupteur
- (V) : voltmètre
- (Rh) : rhéostat
- (A) : ampèremètre

- Relevé des mesures

U (V)	4.35	4.2	4.0	3.9	3.85	1V pour 1cm
I (A)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1 A pour 1 cm

- Tracer de la caractéristique



Remarque

✍ $U_{PN} = V_P - V_N = E - r \times I$, donc, $-U_{NP} = U_{PN} \rightarrow U_{NP} = r \times I - E$. Dans les deux cas, la tension aux bornes d'un générateur est la somme de deux tensions : la f.é.m. E du générateur et la **chute ohmique** de tension : $E = U + r \times I$ (12.4)

✍ La caractéristique permet de trouver la f.é.m. du générateur i.e.

$$E = (\text{axe des } U) \cap (\text{caractéristique}) = V_P - V_N.$$

✍ La caractéristique permet aussi de trouver la résistance interne r du générateur qui correspond au coefficient de la droite caractéristique que l'on peut calculer par exemple sur fig.12.7 :

$$-r = \text{tg} \alpha = -\frac{\Delta U}{\Delta I} \Rightarrow r = \frac{4,35 - 3,9}{0,5} = 0,9 \Omega$$

2. La loi d'Ohm pour un générateur

Soient P_f la puissance fourni par le générateur, P_j la puissance dissipée par effet Joule et P_d la puissance disponible au circuit extérieur. On a :

$$P_f = P_d + P_j \quad (12.5)$$

$$\Rightarrow P_d = P_f - P_j \quad (12.6)$$

$$\Leftrightarrow U \times I = E \times I - r \times I^2 \quad (12.7)$$

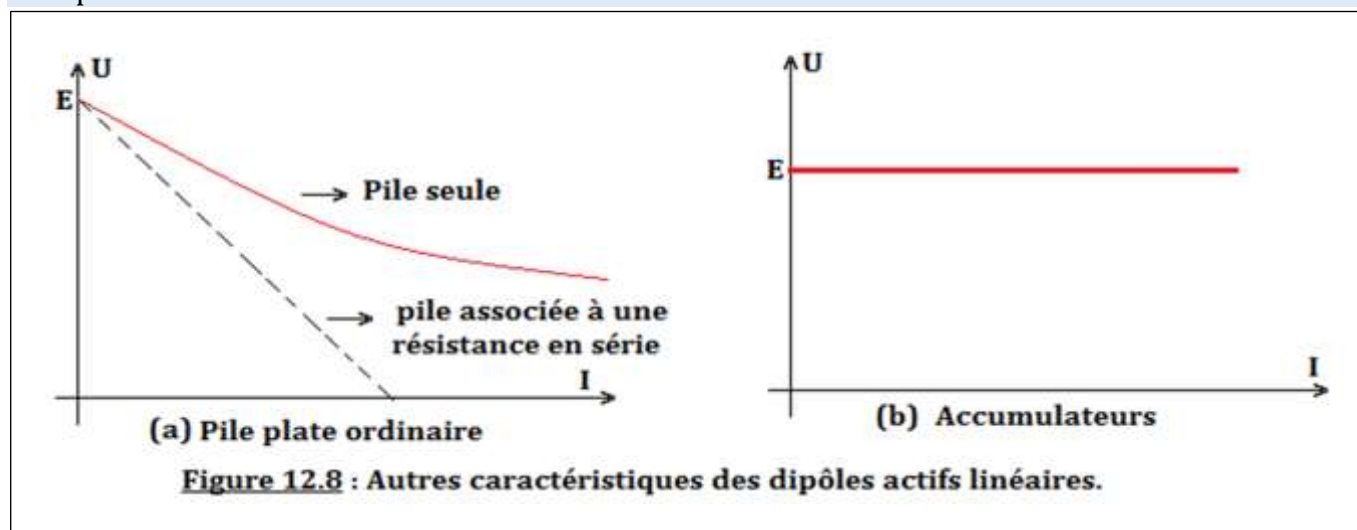
$$\Leftrightarrow U = E - rI \quad (12.8)$$

Remarque

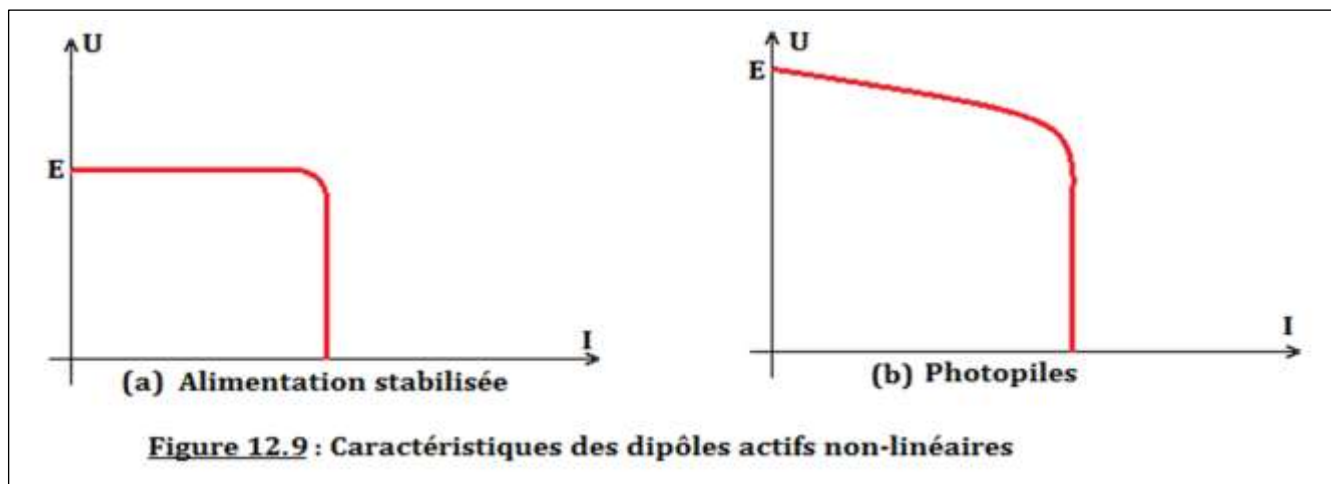
✍ La relation $U = E - rI$ peut être mise sous la forme : $E - U = rI$ (12.9)

La chute de tension aux bornes d'un générateur linéaire est proportionnelle à l'intensité débitée.

✍ La caractéristique de la pile, si on se limite à des intensités faibles, est une droite (fig. 12.8.a). il en est de même de celle d'un accumulateur (fig. 12.8.b). On peut alors dire que ce sont des dipôles actifs linéaires.



✍ Pour le cas des générateurs non-linéaires tels que l'alimentation stabilisée (fig.9.a) ou les photopiles (photodiode par exemple) (fig.9.b), la caractéristique n'est plus linéaire.



✍ (12.8) est la **loi d'Ohm** aux bornes d'un générateur.

✍ Lorsque l'on prolonge la caractéristique d'une pile (pile Daniell par exemple) jusqu'à $U = 0$ V, elle coupe l'axe des intensités au point d'abscisse I_{cc} . La pile est alors en **court-circuit** et est traversée par le courant de **court-circuit** I_{cc} tel que :

$$I_{cc} = \frac{E}{r} \quad (12.10)$$

✍ Si $I = 0$ A, le générateur ne débite pas et $U = E$: en circuit ouvert, la ddp aux bornes d'un générateur est égale à sa f.é.m.

Exemple

Soit une pile de f.é.m. $E = 6$ V et de résistance interne $r = 1 \Omega$. Calculer la tension U aux bornes de cette pile lorsque l'intensité du courant débité vaut 100 mA.

Solution

Données : $E = 6$ V ; $I = 100$ mA = 0,1 A ; $r = 1 \Omega$; $U = ?$

On sait par définition que :

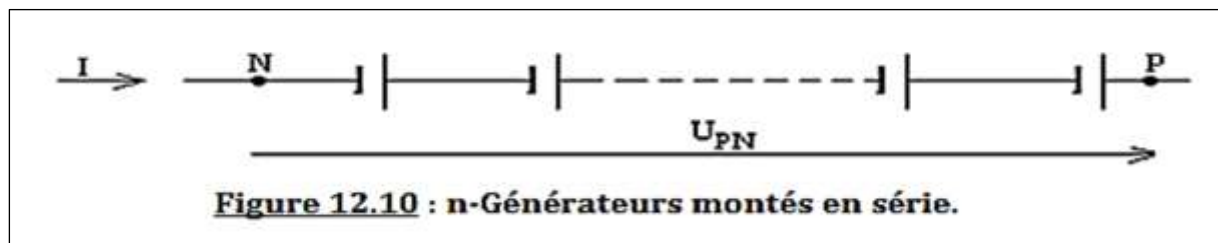
$$U = E - rI.$$

AN : $U = 5,9$ V.

3. Groupement des générateurs

La notion de groupement de générateur est semblable à l'association en série et/ou en parallèle des résistors vue en classe de seconde. On verra alors le groupement en série et le groupement en parallèle des générateurs. Le but est alors de déterminer la f.é.m. équivalente.

3.1. Groupement en série



Considérons n générateurs identiques de f.é.m. E_0 et de résistance interne r_0 chacun (figure 12.10). On a :

$$U_1 = U_2 = \dots = U_n = E_0 - r_0 \times I \quad (12.11)$$

(Car les générateurs sont identiques)

Or
$$U_{PN} = U_1 + U_2 + \dots + U_n = n \times E_0 - n \cdot r_0 \cdot I = E - r \cdot I \quad (12.12)$$

(12.12 est la loi d'additivité des tensions)

Par identification,
$$\begin{cases} E = n \times E_0 \\ r = n \times r_0 \end{cases} \quad (12.13)$$

Remarque

✍ Lorsque n -générateurs sont groupés en série, leur f.é.m. s'ajoute et leur résistance aussi (fig.12.13). on obtient alors un générateur unique (ou équivalent) de f.é.m. $n \times E_0$ et de résistance interne $n \times r_0$.

✍ À chaque fois que l'on veut obtenir une f.é.m. importante, on utilise le groupement en série. Cependant, l'intensité limite du courant est celle de chacun des générateurs.

✍ Les piles usuelles ainsi que les accumulateurs sont constitués par la mise en série d'un certain nombre d'éléments identiques (**Ex.** : pile plate 4,5 V : 3-éléments ; batterie de 12 V : 6-éléments).

✍ Si les générateur en série ne sont pas identiques, alors,
$$\begin{cases} E_{\text{équivalente}} = \sum_{i=0}^n E_i \\ r_{\text{équivalente}} = \sum_{j=0}^n r_j \end{cases} \quad (12.14)$$

Exemple

On dispose d'un lot de piles identiques :

- Force électromotrice $e = 1,5 \text{ V}$
- Résistance interne $r_1 = 0,5 \Omega$.

Elles débitent dans de bonnes conditions un courant de $i = 0,2 \text{ A}$.

On souhaite alimenter une résistance de $R = 10 \Omega$ sous la tension $U = 20 \text{ V}$.

- Déterminer l'association qu'il faut réaliser avec les piles précédentes pour pouvoir alimenter la résistance de 10Ω .
- Quels sont les éléments caractérisant le générateur équivalent à cette association ?
- Quel est le courant le courant réellement fourni à la résistance ?

Solution

(a) Selon les données, l'association appropriée avec ces piles est l'association en série.

(b) Les éléments caractérisant le générateur équivalent sont :

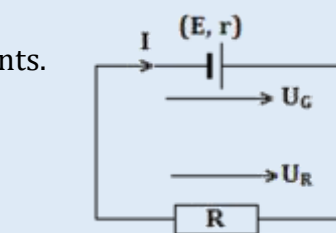
- La résistance interne : $r = n \times r_1 = 0,75 \Omega$ avec $n = e/r_1 = 3$ -éléments.
- La f.é.m. $E = U + i \times (r + R) = 22,15 \text{ V}$.

(c) Déterminons le courant I réellement fourni.

Posons : $U_G = E - rI$, la tension fournie par le générateur

Et $U_R = RI$, la loi d'Ohm aux bornes du conducteur ohmique.

D'après la figure, $U_G = U_R \Rightarrow I = \frac{E}{r + R}$



AN: $I = 2,06 \text{ A}$.

3.2. Groupement en parallèle

Les générateurs étant identiques, on a :

$$\begin{cases} U_{PN} = U_1 = U_2 = \dots = U_n \\ I = n \cdot I_1 = n \cdot I_2 = \dots = nI_n \\ \Rightarrow U_{PN} = E_0 - rI_1 = E_0 - r_0 \frac{I}{n} \end{cases} \quad (12.15)$$

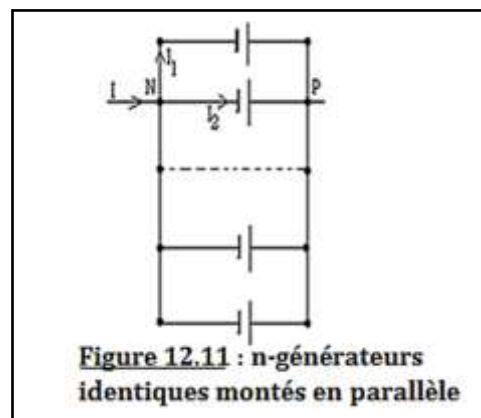


Figure 12.11 : n -générateurs identiques montés en parallèle

**Remarque**

✍ Lorsque **n** générateurs identiques sont montés en parallèle, la f.é.m. du groupement est égale à celle d'un générateur et la résistance interne est égale à celle d'un générateur divisée par le nombre total de générateurs :

$$\begin{cases} E = E_0 \\ r = \frac{r_0}{n} \end{cases} \quad (12.16)$$

✍ À chaque fois que l'on veut obtenir un courant d'intensité supérieure à l'intensité limite de chaque générateur, on utilise le groupement en parallèle.

3.3. Groupement mixte

Entre deux points N et P, on utilise m dérivation comprenant chacun n générateurs en série.

- Déterminons la f.é.m. **E** et la résistance **r** du groupement.

Les séries ainsi constituées sont identiques et l'intensité dans chaque branche est : $\frac{I}{m}$.

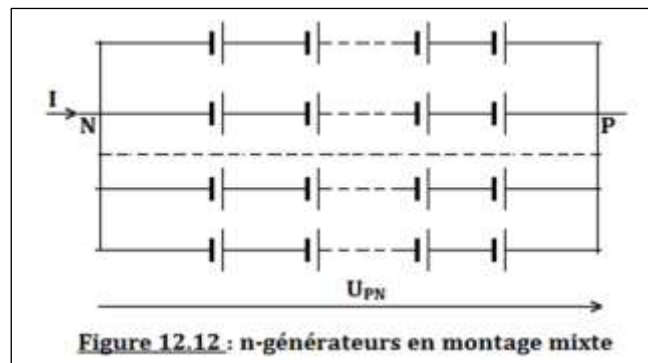


Figure 12.12 : n-générateurs en montage mixte

$$U_{PN} = nE_0 - \frac{nE_0}{m} I \Rightarrow \begin{cases} E = nE_0 \\ r = \frac{n}{m} r_0 \end{cases} \Rightarrow U_{PN} = E - rI \quad (12.17)$$

Remarque

Le produit **n × m** représente le nombre total de générateurs.

- **Intérêt du montage mixte**

- Lorsque le groupement mixte débite dans un conducteur ohmique de résistance R, l'intensité **I** du courant sera :

$$I = \frac{n \cdot E_0}{R + \frac{n}{m} \times r_0} = \frac{E}{R + r} \quad (12.18)$$

- On a aussi deux autres avantages :

☞ Il permet d'obtenir une f.é.m. importante : $E = n \times E_0$

☞ Il permet également d'obtenir un courant plus important, du fait que la résistance du groupement

$$r = r_0 \times \frac{n}{m} \quad (12.19)$$

soit plus faible que celle d'une série (**r = n × r₀**).

4. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Maille	Stitch
Générateur	Generator

Sentence

The generator is on that generates, creator, one who produces; machine that converts mechanical energy into electrical energy.



EXERCICES DE LA LEÇON 12 : LES GÉNÉRATEURS

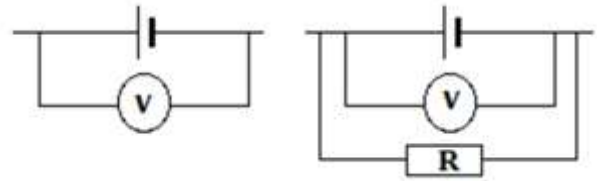
PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES

EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS

- Définir : générateur ; photopile.
- Énoncer la loi d'Ohm pour un générateur.
- Vrai ou faux
 - Dans un générateur, le courant sort par la borne positive (celle de plus fort potentiel).
 - Comme la réaction de synthèse de l'eau à partir d'hydrogène et d'oxygène est exoénergétique, elle permet de réaliser un générateur.
 - Une DEL est un générateur électrique.
 - Un générateur est un dipôle passif dissymétrique.
 - La tension U_{PN} aux bornes d'un générateur diminue quand l'intensité débitée augmente.
 - La chute de tension est telle que $U - E = rI$.
 - Le courant de court-circuit est déterminable pour tout type de générateur.
 - Dans certaines conditions, la caractéristique d'une pile peut être linéaire.
- En utilisant vos connaissances et le cours, répondez aux questions suivantes :
 - Que peut-on dire de la caractéristique tension - courant d'une pile ?
 - Quelles sont les grandeurs caractérisant un générateur ?
 - Quel avantage a-t-on :
 - À réaliser un montage en série de générateurs ?
 - À réaliser un montage en parallèle de générateurs ?
 - À réaliser un montage mixte de générateurs ?
- Choisir la bonne réponse
 - Lorsqu'on double la résistance interne d'une pile court-circuitée, l'intensité du courant de court-circuit :
 - Double
 - Diminue de moitié
 - Reste inchangée.
 - La relation $E = U + rI$, s'appelle :
 - Chute de tension
 - Chute de courant
 - Chute ohmique de tension
 - Lorsque le générateur débite,
 - $E \neq U$
 - $E = U$
 - $U + E = rI$
 - Un générateur
 - Produit de l'énergie
 - Fabrique de l'énergie
 - Consomme de l'énergie.

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

- Pour déterminer la f.é.m. E et la résistance r d'une pile, on réalise les deux montages ci-dessous.
Le voltmètre de très grande résistance indique $U_1 = 4,5$ V dans le premier montage. Le même voltmètre indique $U_2 = 4,2$ V dans le second montage.
Calculer E et r en sachant que $R = 21 \Omega$.



- On dispose de 6-piles identiques ($E = 1,5$ V, $r = 1 \Omega$). On désire les associer en série. Déterminer la f.é.m. et la résistance interne du générateur ainsi obtenu.
- Une pile a pour f.é.m. $E = 1,1$ V et pour résistance interne $r = 0,8 \Omega$.
 - Écrire l'équation de la caractéristique de cette pile et tracer cette caractéristique.
 - On possède 2-piles identiques à la précédente que l'on place en dérivation. Tracer la caractéristique du dipôle actif ainsi obtenu.

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Explication de phénomène

Quel phénomène physique est à la base de la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique ? Décrire une expérience permettant de mettre ce phénomène en évidence.

Situation 2 : Expression de la tension U

Montrer que la tension aux bornes d'un générateur est une fraction de sa f.é.m. lorsqu'il est placé dans un circuit comportant un conducteur ohmique de résistance R . La résistance interne de ce générateur est r .

Situation 3 : Exploitation des résultats expérimentaux

On se propose de déterminer graphiquement la f.é.m. E et la résistance interne r d'un générateur. À l'aide d'un dispositif approprié, on a obtenu le tableau ci-dessous présentant les variations de la tension U en fonction de l'intensité I délivrées par le générateur.

U (V)	$E,00$	19,80	19,60	19,40	19,20	19,00
I (mA)	0	50	100	150	200	250

- Quel dispositif a-t-on utilisé pour avoir la variation de I dans ce circuit ?
- Tracer la caractéristique courant-tension aux bornes de ce générateur.
Échelle : 1 cm → 100 mA (abscisses) ; 1 cm → 10 V (ordonnées)
- À partir du graphe, déterminer :
 - La valeur de la f.é.m. E du générateur.
 - La valeur de la résistance interne r du générateur
- Déduire l'intensité du courant de court-circuit I_{CC} , si le générateur est court-circuité.



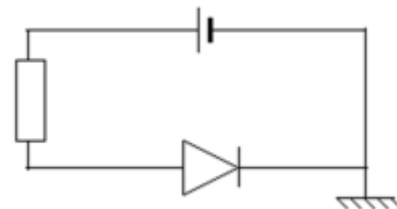
Leçon 13

LES RÉCEPTEURS, DIPÔLE PASSIF

Activité

Observe attentivement l'image de droite.

Identifie un générateur et un dipôle passif et un récepteur. Comment appelle-t-on le composant ayant la forme d'un râteau sur la figure ?



ACTIVITÉS

Objectifs

- ⇒ Définir : récepteur, dipôle passif.
- ⇒ Symboliser un récepteur
- ⇒ Ressortir le modèle de Thévenin d'un récepteur
- ⇒ Évaluer les caractéristiques d'un récepteur
- ⇒ Énoncer et appliquer la loi d'Ohm pour un récepteur
- ⇒ Effectuer des calculs sur les groupements des récepteurs.

1. Définition et représentations1.1. Définition

- Un **récepteur** est un dipôle dissymétrique, capable de transformer une partie de l'énergie électrique reçue en une autre forme que l'énergie calorifique.

Exemple : électrolyseur ; moteur ; lampes à incandescence ; diodes ; varistances ; condensateurs ;

- Un **dipôle passif**, est un dipôle qui reçoit de l'énergie électrique qu'il transforme intégralement en chaleur.

Exemple : résistor.

1.2. Représentations1.2.1. Symboles normalisés.

Les symboles normalisés de quelques récepteurs et dipôle passif sont les suivants :

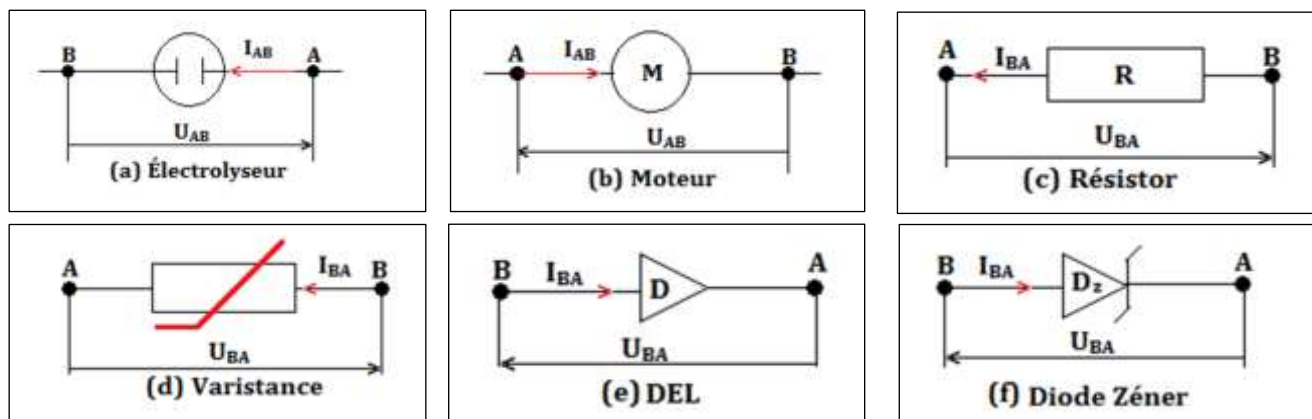
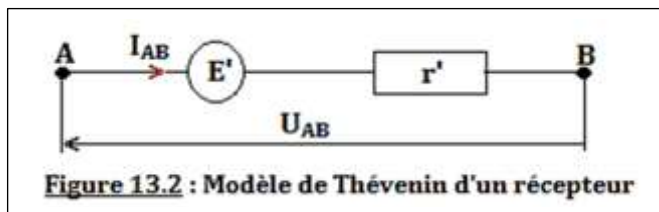


Figure 13.1 : Représentation normalisée de quelques dipôles passifs + Résistor

1.2.2. Représentation en modèle de Thévenin

Le modèle de Thévenin d'un récepteur (moteur, électrolyseur par exemple), est une représentation équivalente du récepteur faisant ressortir ses caractéristiques internes. Il se présente de la manière suivante.



1.3. Les caractéristiques d'un récepteur

1.3.1. La force contre électromotrice

Notée E' , la force contre électromotrice (f.c.é.m.) d'un récepteur, est le quotient de la puissance utile P_u , par l'intensité I du courant qui le traverse :

$$E' = \frac{P_u}{I} \quad (13.1)$$

Unités : P_u (W) ; I (A) ; E' (V)

Remarque

La grandeur $P_u = P'$, est la puissance électrique transformée en puissance mécanique ou ohmique.

1.3.2. La résistance interne

Le récepteur perd une partie de l'énergie électrique reçue par effet joule. Il comporte donc un résistor de résistance r' dite résistance interne du récepteur. La puissance dissipée par effet Joule dans le récepteur est telle que :

$$P_j = r' \times I^2 \quad (13.2)$$

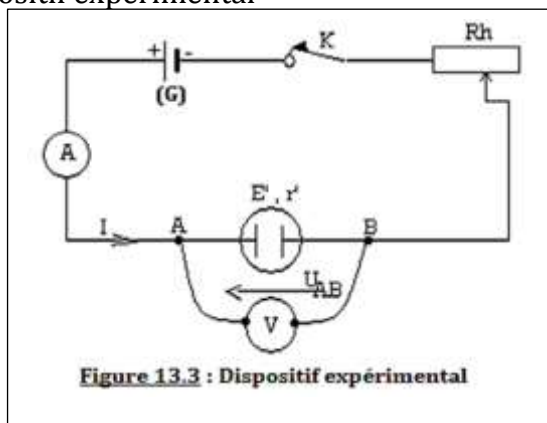
1.3.3. Caractéristiques d'un récepteur

- Un récepteur est alors caractérisé par une f.c.é.m. E' et une résistance interne r' . on adoptera alors l'écriture suivante (E', r') pour caractériser un récepteur.
- La caractéristique d'un récepteur est la représentation graphique de l'expression de la tension $U_{NP} = U$ à ses bornes lorsqu'il est parcouru par un courant d'intensité I :

$$U = E' + r' \times I \quad (13.3)$$

La courbe $U = f(I)$ est la caractéristique courant-tension du récepteur étudié.

- Étudions alors la caractéristique $U = f(I)$
 - Dispositif expérimental



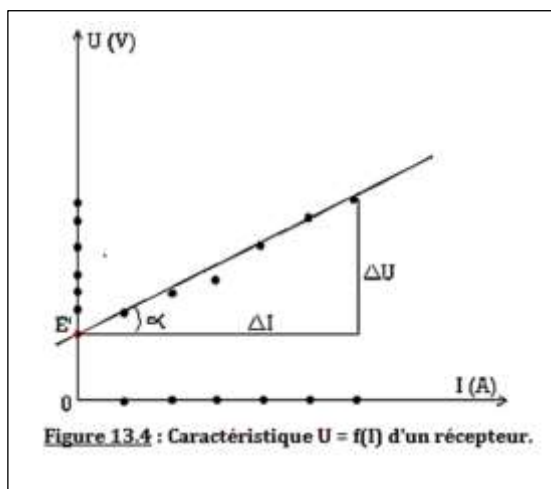
Légende

- (G) : générateur (E, r)
- (k) : interrupteur
- (Rh) : rhéostat
- (A) : ampèremètre
- (V) : voltmètre
- (E) : électrolyseur (E', r')

- Relevé de mesure

U (V)	2.1	2.5	2.9	3.5	4.1	4.5	2cm pour 1V
I (A)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1 cm pour 0.1 A

- Tracer de la caractéristique



Remarque

☞ Cette caractéristique permet :

- De trouver la f.c.é.m. E' du récepteur. On observe que $E' = (\text{axe des } U) \cap (\text{caractéristique})$.
- De déterminer la résistance interne r' du récepteur, qui est le coefficient directeur de la droite d'équation $U = f(I)$. On a donc :

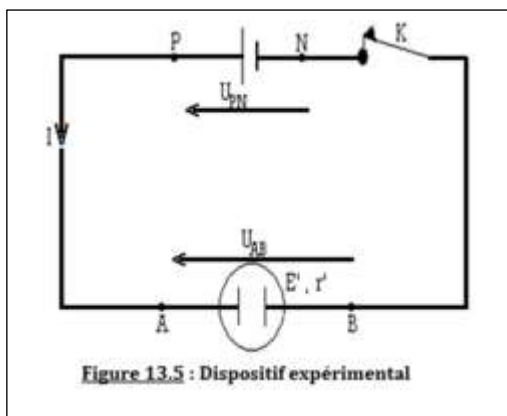
$$r' = \tan \alpha = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{4,5 - 2,1}{0,6 - 0,1} = 4,8 \Omega$$

☞ Pour un moteur traversé par un courant électrique, si sa f.c.é.m. E' est **nulle**, on dit qu'il est **bloqué**. Cela signifie que toute l'énergie électrique reçue est transformée en chaleur par effet Joule. La tension aux bornes du moteur sera dans ce cas $U = r' \times I$ (13.4)

☞ Si dans une électrolyse, il y a transport de la matière de l'anode à la cathode (cas de l'électrolyse avec anode soluble), l'électrolyseur aura dans ce cas une f.c.é.m. **nulle**. Toute l'énergie électrique se transforme en chaleur et $U = r' \cdot I$.

☞ Lorsque dans un circuit électrique, le courant entre dans un générateur par le pôle positif, le générateur fonctionne dans ce cas comme un récepteur.

2. La loi d'Ohm pour les récepteurs



Considérons la figure 13.5 ci-contre.

Appelons $P_f = U_{AB} \times I$ (13.5)
la puissance fournie par le générateur au circuit extérieur.

Remarque

Lorsqu'on néglige la résistance des fils conducteurs, $U_{AB} = U_{PN}$.



- La quantité $P_f = U_{AB} \times I$ est transformée :
 - Une partie en puissance chimique : $P_{chi} = E' \times I$ (électrolyseur) (13.6)
 - L'autre partie par effet Joule : $P_j = r' \times I^2$ (13.7)
- La loi de conservation de l'énergie permet donc d'écrire :

$$P_f = P_{chi} + P_j$$

$$\Leftrightarrow U_{AB} \times I = E' \times I + r' \times I^2$$
 (13.8)

$$\Leftrightarrow U_{AB} = E' + r' \times I$$
 (13.9)

Remarque

- La ddp aux bornes d'un récepteur est $> E'$.
- Pour qu'un récepteur fonctionne normalement, il faut que la tension à ses bornes soit $> E'$.

Exemple

Une génératrice débite dans une batterie d'accumulateur de f.c.é.m. $E' = 100 \text{ V}$ et de résistance interne $r' = 1 \Omega$.

- Quelle tension doit fournir la génératrice à ses bornes pour que le courant soit $I = 10 \text{ A}$?
- La génératrice a une résistance interne $r = 2 \Omega$. Quelle est la f.é.m. E de la génératrice ?
- Quelle est la puissance totale fournie au circuit extérieur par la génératrice ?
- Quelle est l'énergie perdue par effet Joule dans la génératrice pendant 3 min ?
- Que se passe-t-il quand E' devient supérieur à E ?

Solution

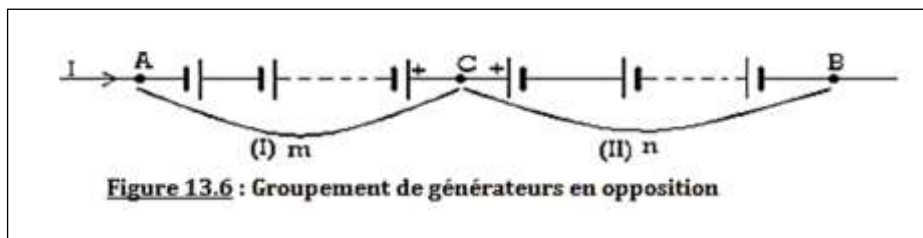
Données : accumulateur ($E' = 100 \text{ V}$, $r' = 1 \Omega$) ;

- Déterminons la tension U fournie si $I = 10 \text{ A}$
 Par définition, $U = E' + r' \times I$ **AN : $U = 110 \text{ V}$**
- Déterminons E si $r = 2 \Omega$.
 Par définition, $U = E - rI \Rightarrow E = U + rI$ **AN : $E = 130 \text{ V}$**
- Déterminons la puissance totale fournie P par la génératrice.
 Par définition, $P = E \times I$ **AN : $P = 1300 \text{ W}$**
- Déterminons l'énergie W perdue par effet Joule si $t = 3 \text{ min} = 180 \text{ s}$
 D'après la loi de Joule, $W = r \times t \times I^2$ **AN : $W = 36000 \text{ J}$**
- Conséquence si $E' > E$
 Le montage étant en série, $E - rI = E' + r'I$. Si $E > E' \Rightarrow r < r'$, dans ce cas la génératrice fonctionnera en mode récepteur.

3. Groupement des récepteurs

3.1. Groupement en série

Considérons le montage ci-dessous, dans lequel m et n représentent le nombre de générateurs identiques montés en série.



- Les deux groupements (I) et (II) sont montés en opposition. Le 1^{er} (I) fonctionne en générateur et le 2nd (II) en récepteur.
- Soient E_0 la f.é.m. d'un générateur et r_0 sa résistance interne. On peut remplacer le groupement (I) par un générateur unique de f.é.m. $E_1 = m.E_0$ et de résistance interne $r_1 = m.r_0$.

- Aussi dans le groupement (II), on peut remplacer par un générateur unique de f.é.m. $E_2 = n \cdot E_0$ et de résistance interne $r_2 = n \cdot r_0$. La loi d'additivité des tensions nous permet d'écrire :

$$U_{AB} = U_{AC} + U_{CB} \quad (13.10)$$

$$U_{AC} = m \times r_0 \times I - m \times E_0 \quad (13.11)$$

$$U_{CB} = n \times E_0 + n \times r_0 \times I \quad (13.12)$$

$$\Rightarrow U_{AB} = (m + n) \times r_0 \times I - E_0 \times (m - n) \quad (13.13)$$

Cette dernière relation montre que l'on peut remplacer le groupement entre A et B par un générateur unique de f.é.m.

$$E = (m - n) \times E_0 \quad (13.14)$$

et de résistance interne

$$r = (m + n) \times r_0 \quad (13.15)$$

Remarque

D'une façon générale, quelles que soient les f.é.m. des générateurs, la f.é.m. du générateur équivalent est $\Sigma E - \Sigma E'$, ΣE étant la somme des f.é.m. des dipôles fonctionnant en générateurs et $\Sigma E'$ celle des générateurs fonctionnant en récepteur.

3.2. Groupement en parallèle

Nous étudions, comme exemple de récepteurs en parallèle, le cas des résistors, alimentés par un générateur G (E, r).

Dans la situation présentée par la figure 13.7, les résistors R_2 et R_3 sont en parallèle : la résistance équivalente est :

$$R_{\text{eq}} = \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3} \quad (13.16)$$

Le circuit se ramène alors à montage en série (figure 13.8)

Dans le schéma équivalent ainsi obtenu, on a :

$$U_G = U_1 + U_2 \text{ (loi d'additivité des tensions)} \quad (13.17)$$

$$\Rightarrow E - rI = R_1 \times I + R_{\text{eq}} \times I \quad (13.18)$$

$$\Rightarrow I = \frac{E}{r + R_1 + R_{\text{eq}}} \quad (13.19)$$

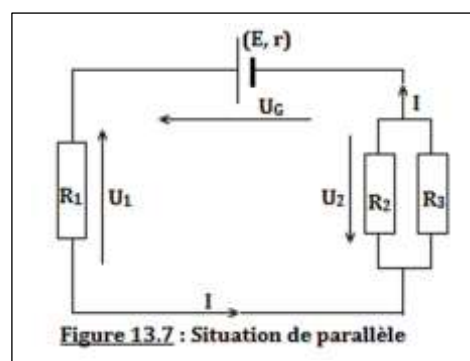


Figure 13.7 : Situation de parallèle

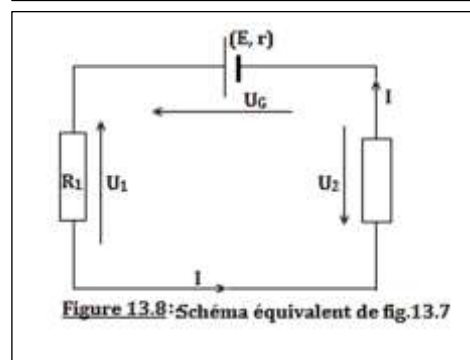


Figure 13.8 : Schéma équivalent de fig.13.7

Remarque

Afin de déterminer le courant I du circuit, il est judicieux de ramener le circuit parallèle en série.

4. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Récepteur	Receptor
Nœud	Node
Borne	Terminal, landmark

Sentence

A receptor is device that receives electrical energy and converts it into chemical or mechanical energy.

Georges-Simon Ohm (1787-1854), Physicien allemande qui énonça en 1826 la loi qui porte aujourd'hui son nom.

**EXERCICES DE LA LEÇON 13 : LES RÉCEPTEURS****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****EXERCICES 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS**

- Définir : récepteur.
- Énoncer la loi d'Ohm pour un récepteur.
- Énumérer en les classant en linéaire et non linéaire, 3 récepteurs pour chaque type.
- Vrai ou faux
 - Un générateur est un récepteur.
 - Un moteur, alimenté sur le secteur ($U = 220 \text{ V}$), est parcouru par un courant d'intensité efficace $I = 0,6 \text{ A}$. La puissance indiquée par le constructeur est de 100 W . Est-ce possible ?
 - Une DEL convertit de l'énergie électrique en énergie lumineuse par effet Joule.
 - La tension aux bornes d'un récepteur augmente quand l'intensité du courant qui le traverse augmente.
 - Dans un récepteur, l'énergie électrique n'est pas consommée par effet Joule.
 - Un moteur convertit une partie de l'énergie reçue en énergie chimique.
 - Un électrolyseur convertit une partie de l'énergie reçue en énergie mécanique.
 - Un moteur est dit bloqué lorsque $U = E'$.
 - Même l'électrolyseur peut être bloqué.
 - En mode récepteur, le courant et la tension ont même sens aux bornes dudit récepteur.
- Choisir la bonne réponse
 - Si l'on double l'intensité du courant traversant un récepteur, sa f.c.é.m.
 - Double
 - Change
 - Diminue de moitié
 - Un récepteur a :
 - Une borne de branchement
 - Deux bornes de branchement
 - Aucune borne de branchement.
 - La loi des nœuds ne s'applique que dans un
 - Montage en série
 - Mixte
 - Parallèle.
- Utiliser le cours et vos connaissances
 - De quel type de conversion d'énergie l'effet Joule est-il à l'origine ?
 - Quelles sont les grandeurs qui caractérisent un récepteur ?
 - Sous quelle forme d'énergie est convertie l'énergie électrique reçue par un électrolyseur ?
 - Que peut-on dire de la caractéristique tension-intensité d'un récepteur ?

EXERCICES 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

- Une lampe à incandescence dont la résistance est 500Ω , a une puissance de 100 W . Déterminer l'intensité du courant dans le filament, et la tension à ses bornes.

Réponses : $0,45 \text{ A}$; 224 V .

- On dispose de n -piles de f.é.m. $e = 1,5 \text{ V}$ et de résistance interne $r_0 = 0,5 \Omega$, montées en série.
 - Déterminer le nombre n de piles.
 - Déterminer la f.é.m. et la résistance interne du générateur équivalent.
 - Cette batterie débite dans une résistance R fixe un courant de $0,2 \text{ A}$. Quelle est la valeur de R et la tension à ses bornes ?
 - Quelle est la puissance fournie par l'ensemble des piles au circuit extérieur ?

Réponses : 420Ω ; $8,4 \text{ V}$; $1,68 \text{ W}$.

- Un moteur électrique fonctionne sous une tension $U = 120 \text{ V}$ fournit une puissance mécanique $P = 240 \text{ W}$. Ce moteur est alors traversé par un courant d'intensité $I = 2,5 \text{ A}$. Calculer :
 - La f.c.é.m. E' du moteur.
 - Sa résistance interne r' .
 - Son rendement. (On appelle rendement d'un moteur, le rapport de la puissance utile à la puissance électrique reçue)

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES**Situation 1 : Exploitation des résultats expérimentaux**

On veut établir la loi d'Ohm aux bornes d'un récepteur M . Pour cela, on dispose d'un générateur, d'un voltmètre, d'un ampèremètre de résistance négligeable et d'un rhéostat.

- Proposer un schéma du montage.
- On obtient le tableau de relevés suivant :

U (V)	3	4	5	6	7
I (A)	0,15	0,24	0,34	0,47	0,55

U (V)	8	9	10	11	13
I (A)	0,67	0,75	0,86	0,95	1,14

Construire le graphe $U = f(I)$. En déduire la f.c.é.m. du récepteur, sa résistance interne, et la loi d'Ohm aux bornes de ce récepteur.

Échelle : $1 \text{ cm} \rightarrow 0,1 \text{ A}$; $1 \text{ cm} \rightarrow 1 \text{ V}$.

Situation 2 : Montage en parallèle

Une pile P a pour f.é.m. $E = 1,5 \text{ V}$ et pour résistance interne $r = 1 \Omega$. On réalise une association de 4-piles identiques en série.

- Tracer la caractéristique de la pile P .
- Trouver la f.é.m. et la résistance interne de l'ensemble des quatre piles.
- On a un circuit où $R_1 = 20 \Omega$ et $R_2 = 80 \Omega$ sont deux conducteurs ohmiques placés en dérivation. Écrire les équations des caractéristiques des 2-conducteurs ohmiques. Rechercher la résistance équivalente aux deux conducteurs placés en dérivation. (Figures à l'appui)
- Rechercher l'intensité i qui circule dans le circuit fermé à partir des piles et des 2-conducteurs en dérivation, et la tension aux bornes des piles ; donner les intensités qui passent dans R_1 et R_2 .



Leçon 14

LE POINT DE FONCTIONNEMENT



ACTIVITÉS

Activité

Un circuit fermé est formé d'un générateur G ($2V$; 10Ω), et d'un conducteur ohmique de résistance 6Ω en série.

- Proposer une figure correspondante à l'énoncé.
- Tracer sur la même courbe les caractéristiques $U = f(I)$ du conducteur ohmique (R) et du générateur (G).
- Déterminer, graphiquement et par calcul, le point de fonctionnement de ce circuit.

Objectifs

- Définir et déterminer le point de fonctionnement d'un circuit.
- Appliquer la loi de Pouillet pour déterminer l'intensité du courant dans une maille.

1. Quelques définitions

- ✦ On appelle **réseau électrique**, tout ensemble constitué de conducteurs reliés entre eux.
- ✦ Une **maille** est tout circuit fermé contenu dans un réseau électrique.
- ✦ On appelle **point de fonctionnement d'un circuit**, le couple de valeurs (I ; U) ou (U ; I) pour lequel le circuit fonctionne.

2. Étude d'un circuit comportant un dipôle passif et un dipôle actif

Considérons la figure 14.1 ci-dessous, constitué d'un générateur (G), d'un résistor (R) et d'un interrupteur (K) montés en série.

Lorsqu'un récepteur est alimenté par un générateur, l'intensité dans le circuit s'établit à une valeur bien déterminée I , de même que la tension U aux bornes de chaque élément.

À ce couple de valeurs (I , U) correspond un point particulier appelé **point de fonctionnement**, appartenant à la fois à la caractéristique du générateur et à celle du récepteur. Il se trouve donc à leur intersection lorsque ces caractéristiques sont tracées sur le même graphique.

Dans ce manuel, nous limiterons notre étude à des générateurs linéaires alimentant des dipôles passifs.

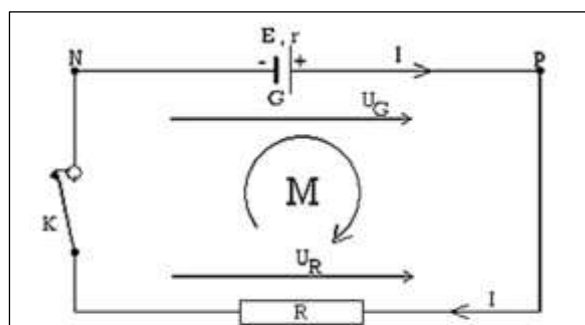


Figure 14.1 : Circuit simple.
Un générateur G alimente un récepteur. Le couple de valeur (I ; U) caractérise le point de fonctionnement.

2.1. Détermination du point de fonctionnement : Méthode théorique

Utilisation de la loi des mailles

Énoncé : « En parcourant une maille dans le sens arbitraire choisit, la somme algébrique de toutes les tensions est nulle ».

Considérons la maille **M** de la figure 14.1 ci-dessus. En appliquant la loi des mailles et en considérant le sens de la flèche de la figure, on aura :

$$U_G - U_R = 0$$

$$\Leftrightarrow U_G = U_R \quad (14.1)$$

$$\text{Or } \begin{cases} U_G = E - rI \\ U_R = RI \end{cases} \quad (14.2)$$

$$\Rightarrow E - rI = RI \quad (14.3)$$

- Le résultat (14.3) permet d'avoir l'intensité **I** :

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (14.4)$$

- En exploitant (14.3) et (14.4) le point de fonctionnement aura pour coordonnées

$$\begin{pmatrix} U \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U \\ \frac{E}{R + r} \end{pmatrix} \quad (14.5)$$

Remarque

- Si $I > 0$, le sens de I choisi est le sens réel ;
- Si $I < 0$, prendre $|I|$ et changer son sens dans le circuit.

2.2. Détermination du point de fonctionnement : Méthode pratique

Elle consiste à tracer dans le même repère les caractéristiques intensité-tension des deux dipôles constituant le circuit. Les coordonnées du point de fonctionnement correspondront donc à l'intersection des deux droites obtenues.

Exemple

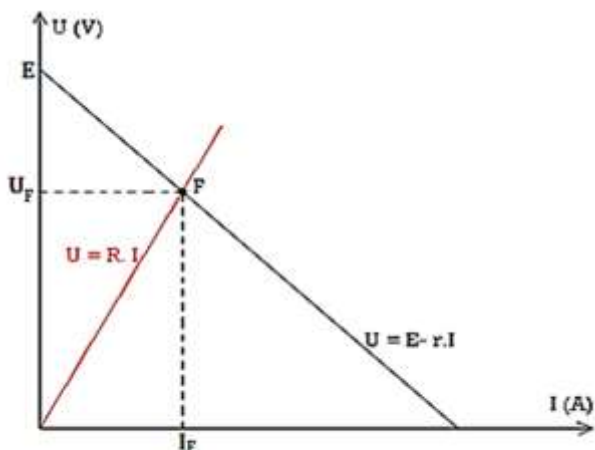


Figure 14.2 : Détermination expérimentale du point de fonctionnement F.

Remarque

- Lorsque les caractéristiques ne sont pas linéaires, seule la méthode graphique peut être utilisée pour déterminer le point de fonctionnement.
- Les caractéristiques doivent avoir la même échelle.
- Quelques écarts peuvent être observés entre la méthode graphique et la méthode par calcul. Une marge d'erreur sera donc indiquée.

2.3. Polarisation du transistor

- Il est aussi possible de déterminer le point de fonctionnement des dipôles passifs non linéaires tel que les transistors (composant électronique). Pour cela, il revient tout d'abord à **polariser le transistor**.
- Polariser un transistor, c'est lui fixer un ensemble de valeurs caractérisant son état de fonctionnement. Pour cela on applique sur les trois électrodes du transistor des potentiels continus de valeurs convenables.

- Cela revient à fixer les valeurs des tensions de polarisation des diodes V_{BE} (alimentation de circuit de base-émetteur) et V_{CE} (alimentation du circuit collecteur – émetteur) ainsi que le courant de commande I_B (courant de la base) et le courant d'émetteur ou de collecteur.
- Selon qu'il s'agisse de la base ou de l'émetteur ou du collecteur, le point de fonctionnement du transistor, peut être défini à partir de deux droites particulières appelées **droite d'attaque** et **droite de charge**.
- Le transistor étant un composant à trois entrées, pour appliquer les résultats vus sur les quadripôles, il faut prendre un des pôles communs à l'entrée et à la sortie. Le montage le plus utilisé est le montage « **émetteur commun** », mais il existe aussi les montages « **base commune** » et « **collecteur commun** » où ce sont la base et le collecteur qui servent de pôle commun.
- Dans la suite de cette leçon, le transistor sera monté en **émetteur commun**.
- Polariser un transistor va donc consister à insérer ce quadripôle entre un réseau d'entrée, qui va fixer les valeurs V_{BE} et I_B , et un réseau de sortie qui va fixer les valeurs V_{CE} et I_C .
- Il a été vu que tout réseau linéaire et invariant dans le temps peut se mettre sous forme de dipôle de Thévenin, on en déduit le schéma de principe général d'un transistor polarisé montré à la figure 14.3 ci-dessous.

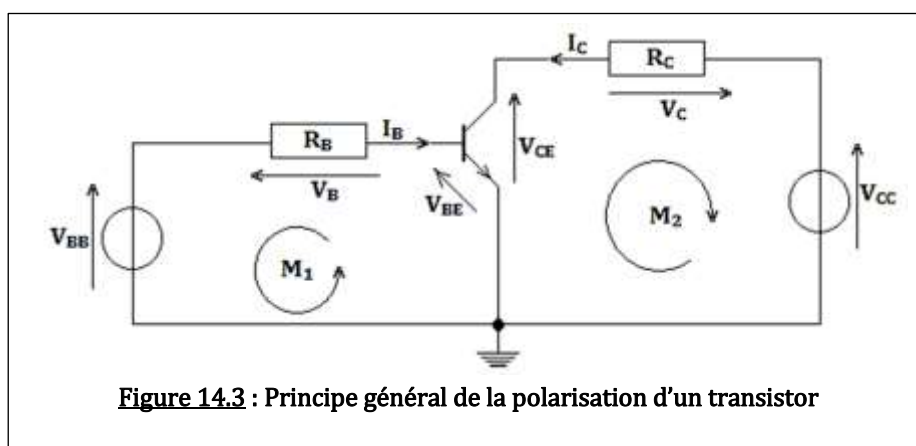


Figure 14.3 : Principe général de la polarisation d'un transistor

2.3.1. Notion de droite d'attaque

En appliquant la loi de maille sur le réseau d'entrée de la maille M_1 , on a :

$$V_{BB} = V_B + V_{BE} \quad (14.6)$$

$$\Rightarrow V_{BB} = R_B \times I_B + V_{BE} \quad (14.7)$$

$$\Leftrightarrow V_{BE} = -R_B \times I_B + V_{BB} \quad (14.8)$$

- On obtient là l'équation d'une droite que l'on appellera la **droite d'attaque** de pente négative $-R_B$ et d'ordonnée à l'origine V_{BB} .
- Cette droite est représentée sur la caractéristique de base du transistor. Les valeurs de V_{BE} et de I_B devant vérifier à la fois l'équation de fonctionnement du transistor et celle du réseau d'entrée, elles seront déterminées par l'intersection entre la droite d'attaque statique et la caractéristique de base du transistor comme le montre la figure 14.4 ci-contre.

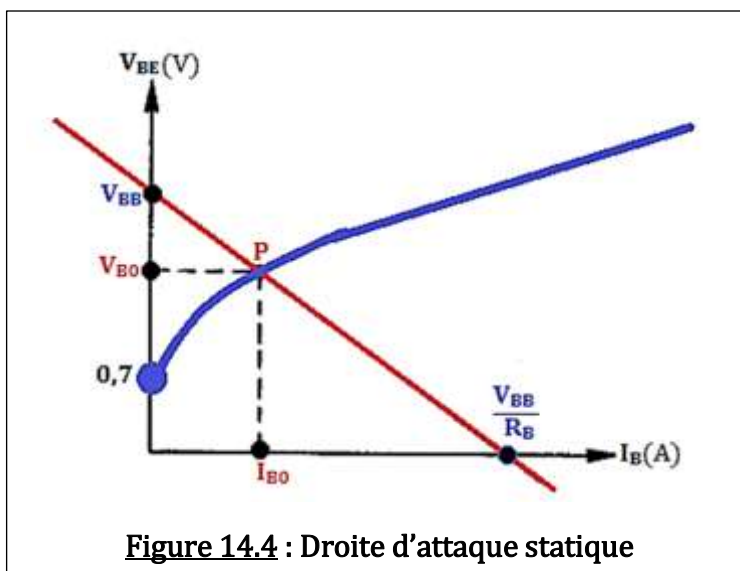


Figure 14.4 : Droite d'attaque statique

Remarque

- Sur la courbe ainsi obtenue, le point P est le point de polarisation et correspond au point de fonctionnement.
- Si P est tel que $V_{BE} < 0,6 \text{ V}$, le transistor est dit bloqué et $I_{B0} = 0$.

2.3.2. Notion de droite de charge

Considérons pour cela, le réseau de sortie représentée par la maille M_2 . On a alors :

$$V_{CC} = V_{CE} + V_C \quad (14.9)$$

$$\Rightarrow V_{CC} = R_C \times I_C + V_{CE} \quad (14.10)$$

$$\Leftrightarrow I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (14.11)$$

- La droite représentative de l'équation (14.11) est appelée **droite de charge statique**.
- L'intersection de cette droite avec la caractéristique de collecteur du transistor donne les valeurs de V_{CE} et d' I_C comme le montre la figure 14.5.
- La caractéristique de collecteur choisie correspondra au courant de base I_{B0} déterminé par la droite d'attaque statique.

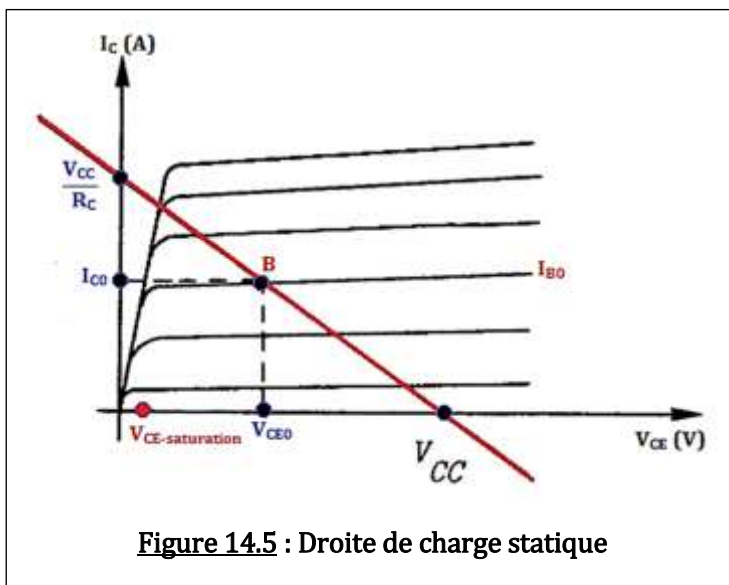


Figure 14.5 : Droite de charge statique

Remarque

- Lorsque $V_{BE0} < 0,6 \text{ V}$, le transistor est bloqué et $I_B = I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC}$.
- Lorsque $V_{CE} < V_{CE\text{-saturation}}$ ($V_{CE\text{-saturation}}$ varie entre quelques dixièmes de volts et 1 volt), on peut donner une excellente approximation de I_C par la formule :

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (14.12)$$

- Tous les points de fonctionnement tels que $V_{CE\text{-saturation}} < V_{CE} < V_{CC}$ et $0 < I_C < \frac{V_{CC}}{R_C}$, donc situés entre les points de blocage et de saturation, se trouvent dans la **zone active**.

Exemple

Le transistor 2N4401 du circuit de la figure (a) est un transistor au silicium avec $\beta = 80$.

- Tracer la droite de charge statique.
- Déterminer le point P de polarisation lorsque $R_B = 390 \text{ k}\Omega$

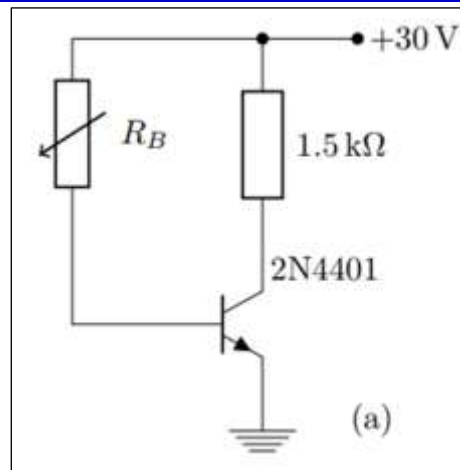
Solution

Données : $R_C = 1,5 \text{ k}\Omega$; $V_{CC} = 30 \text{ V}$.

- D'après (14.12), $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$ **AN** : $I_C = 20 \text{ mA}$.

$$V_{CE\text{-blocage}} = V_{CC} = 30 \text{ V}$$

- La figure b représente la droite de charge statique.



Déterminons I_B .

On a vu que : $V_{BB} = R_B \times I_B + V_{BE} \Rightarrow$

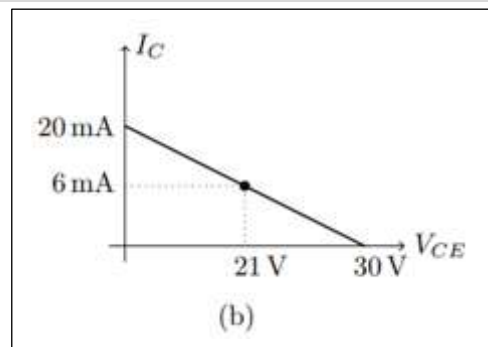
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{30 - 0,7}{390 \cdot 10^3} = 75,1 \mu A$$

Le courant collecteur I_C est donné par la relation :

$$I_C = \beta \times I_B = 6 \text{ mA.}$$

La tension du collecteur-émetteur est :

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \times R_C = 21 \text{ volts.}$$



La figure (b) donne le point P avec ses coordonnées $I_C = 6 \text{ mA}$ et $V_{CE} = 21 \text{ V}$. On remarque que le point P est sur la droite de charge statique car cette droite représente tous les points de fonctionnement possibles. Si on changeait la valeur de R_B , le point P se déplacerait alors en un autre point de la droite de charge.

Remarque

- ✂ Nous avons travaillé ici en régime statique.
- ✂ En régime dynamique (*hors programme pour le moment*), en présence d'un condensateur par exemple monté sur la base du transistor, on obtient le point de polarisation à partir des droites d'attaque dynamique et de charge dynamique.

3. Généralité de la loi des mailles : la loi de Pouillet

Déterminons, sur la figure ci-dessous, l'intensité du courant I qui traverse le circuit.

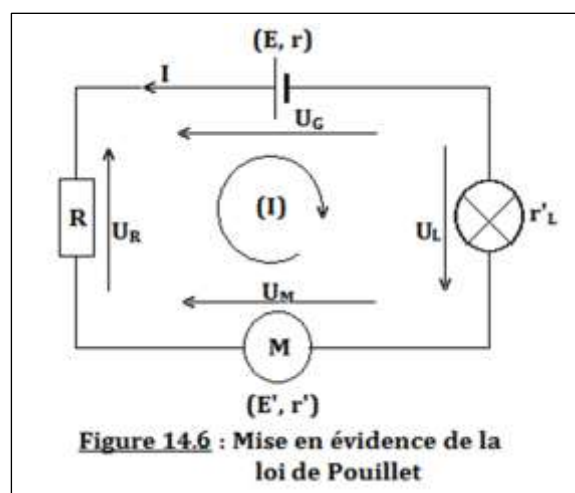
L'ensemble générateur, lampe à incandescence, résistor et moteur, est monté en série. Et chaque équipement électrique porte ses caractéristiques comme l'indique la figure 14.6 ci-dessous.

D'après la maille (I), on a :

$$U_R + U_L + U_M - U_G = 0 \quad (14.13)$$

$$\text{Or } \begin{cases} U_R = RI \\ U_M = E' + r' I \\ U_L = \underbrace{E_L}_{=0} + r'_L I \\ U_G = E - rI \end{cases} \quad (14.14)$$

$$\Rightarrow I = \frac{E - E'}{R + r' + r + r'_L} \quad (14.15)$$



Énoncé de la loi de Pouillet

« Dans une maille, l'intensité I du courant est égale au rapport de la différence entre la somme algébrique des f.é.m. et celle de f.c.é.m. à la somme des résistances :

$$I = \frac{\sum E - \sum E'}{\sum R} \quad (14.16)$$

Où $\sum E$ est la somme des f.é.m. de tous les générateurs du circuit et $\sum E'$ la somme des f.c.é.m. de tous les récepteurs du circuit.

Nota Bene

- Avant d'appliquer la loi de Pouillet, il faut d'abord se rassurer que le circuit est en série. Cela signifie que si certains dipôles passifs sont en parallèle (cas des résistors), il faut d'abord déterminer le schéma équivalent afin de ramener l'ensemble du circuit en série.
- Recenser tous les dipôles passifs et tous les dipôles actifs.

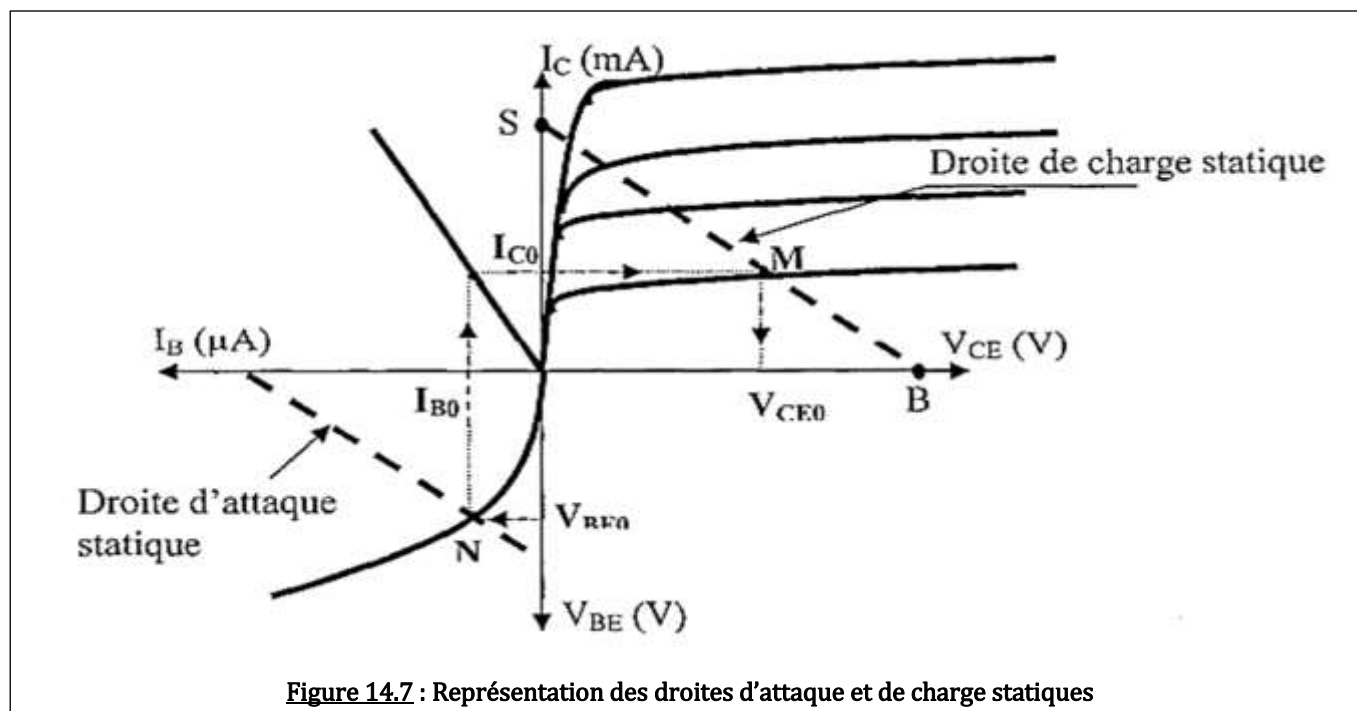


Figure 14.7 : Représentation des droites d'attaque et de charge statiques

Exemple (Non résolu → En exercices)

Un circuit fermé est formé d'un générateur G ($2V$; 10Ω), et d'un conducteur ohmique de résistance 6Ω en série.

- Proposer une figure correspondante à l'énoncé.
- Tracer sur la même courbe les caractéristiques $U = f(I)$ du conducteur ohmique (R) et du générateur (G).
- Déterminer, graphiquement et par calcul, le point de fonctionnement de ce circuit.

4. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Maille	Stitch
Fonctionnement	Working, performance.
Transistor	Transistor
Polarisation	Polarization.

Sentence

P1: The transistor is a small electrical component used to amplify voltage, output or current.

P2: The law of stitch is only used when the electrical components of one circuit are in chain.

**EXERCICE DE LA LEÇON 14 : LE POINT DE FONCTIONNEMENT****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS**

- Définir : point de fonctionnement ; maille ; réseau électrique.
- Énoncer la loi des mailles ; la loi de Pouillet.
- Vrai ou faux
 - On peut déterminer le point de fonctionnement de tout dipôle électrique ou électronique.
 - Le point de fonctionnement d'un transistor correspond à sa polarisation.
 - Le point de fonctionnement contient l'intensité du courant qui circule dans un circuit. (cas des dipôles linéaires)
 - Lorsque les caractéristiques des dipôles ne sont pas linéaires, seule la méthode mathématique est appropriée dans la détermination du point de fonctionnement.
 - La loi de Pouillet est la généralité de la loi des mailles.
 - Le point de fonctionnement de coordonnées (2 ; 6), contient le courant d'intensité 6 A du circuit.
- Choisir la bonne réponse
 - On monte en série, un électrolyseur (3 ; 2) et un générateur (9 ; 1). Le point de fonctionnement du circuit aura pour coordonnées :
 - (3 ; 6)
 - (7 ; 2)
 - (3,5 ; 1)
 - Dans un transistor, le courant du collecteur I_C et celui de la base I_B sont liés par la relation,
 - $I_C = \beta \cdot I_B$
 - $I_C = \beta / I_B$
 - $I_B = \beta \cdot I_C$
 - Sur les figures ci-dessous, les transistors ainsi schématisés, représentent les transistors :



(i)

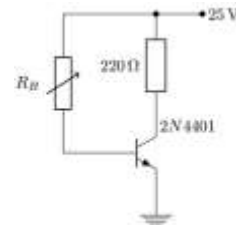
(ii)

- NPN et PNP
- PNP et NPN
- Aucune proposition n'est juste.

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

- Un circuit fermé est formé d'un générateur G (2V ; 10Ω), et d'un conducteur ohmique de résistance 6 Ω en série.
 - Proposer une figure correspondante à l'énoncé.
 - Tracer sur le même graphe, les caractéristiques $u = f(I)$ du conducteur ohmique et du générateur.
 - Déterminer par deux méthodes (graphique et calcul), les coordonnées du point de fonctionnement.

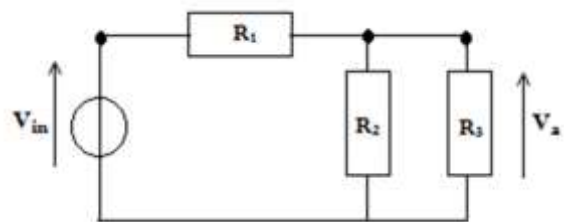
- Sur la figure ci-dessous, le transistor du circuit possède un gain $\beta = 80$ et une tension $V_{CE-sat} = 0,1V$. R_B est ajusté pour obtenir la saturation du transistor. Déterminer :
 - La valeur I_{C-sat} .
 - La valeur correspondante de R_B .



- Un générateur de f.é.m. $E = 12V$ et de résistance interne négligeable, est mis en série avec une résistance $R = 1k\Omega$. Déterminer le point de fonctionnement.

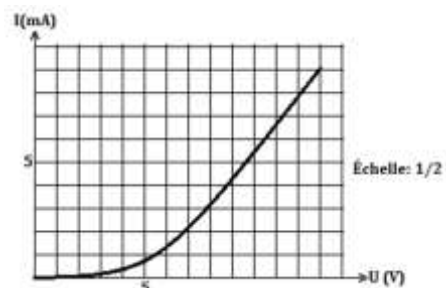
PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES**Situation 1 : Application de la loi des mailles**

On considère le montage ci-dessous



Montrer que le potentiel V_a est donné par la relation :

$$V_a = V_{in} \frac{R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

Situation 2 : Exploitation des données graphiques

Un générateur G (12V ; $r \approx 0$) est mis en série avec une résistance $R = 1k\Omega$ et une varistance dont la caractéristique est tracée sur la figure ci-dessus.

- Réaliser une figure
- Déterminer le point de fonctionnement de ce circuit, en expliquant tous vos calculs pour y parvenir.



Leçon 15

ÉNERGIE CONSOMMÉE DANS UNE PORTION DE CIRCUIT

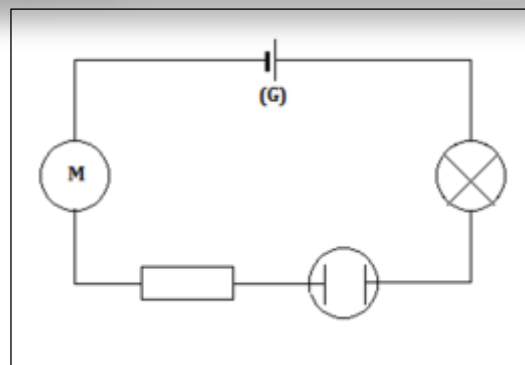


ACTIVITÉS

Activité

Observe attentivement la figure ci-contre.

Après avoir identifié chaque dipôle, caractérise-les et donne la forme d'énergie traduite par chaque dipôle. Fais alors un bilan énergétique du circuit.



Objectifs

- Faire le bilan des différentes formes d'énergies consommées dans une portion de circuit électrique.
- Énoncer et appliquer la loi de Joule

1. Notion d'énergie électrique

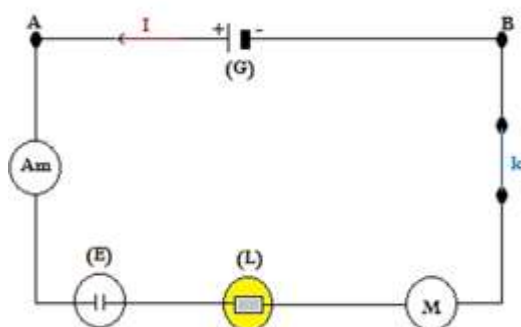


Figure 15.1 : Circuit d'entrée

Légende

- (G) : générateur
- (Am) : Ampèremètre.
- (E) : Électrolyseur.
- (L) : Lampe témoin.
- (M) : Moteur.
- (k) : Interrupteur.

- Lorsque k est ouvert, rien ne se passe dans le circuit
- On ferme k : on observe :
 - L'aiguille de (Am) dévie
 - La lampe (L) brille et s'échauffe : de l'**énergie calorifique** (W_{cal}) est produite suite au passage du courant électrique s'accompagnant aussi par la production de l'**énergie rayonnante** (W_{ray}).
 - Le moteur (M) tourne et chauffe : de l'**énergie mécanique** (W_{mec}) s'est produite.
 - Il y a des dégagements gazeux aux électrodes de (E) qui s'échauffe : de l'**énergie chimique** (W_{chi}) est produite.

Conclusion

Suite au passage du courant électrique, l'énergie électrique ($W_{él}$) fournie par le générateur à la portion AB, se transforme en énergie **mécanique, chimique, rayonnante et calorifique** :

$$W_{él} = W_{ray} + W_{cal} + W_{mec} + W_{chi} \quad (15.1)$$

2. Énergie, puissance et tension électriques

- Relation **énergie-tension** : par définition, $W_{el} = U_{AB} \times I_{AB} \times t$ (15.2)

Unités : U_{AB} : tension (V) ; t : temps (s) ; I_{AB} : intensité (A) et W_{el} : énergie (J) ou en (Wh)

- Expression de la puissance électrique P_{el}

Par définition :

$$P_{el} = \frac{W_{el}}{t} = U_{AB} \times I_{AB} \quad (15.3)$$

où P_{el} : puissance en Watts (W).

Exemple

Une petite lampe à incandescence soumise à une tension de 4,3 V est traversée par un courant d'intensité 93 mA. Calculer l'énergie électrique qu'elle consomme pendant cinq minutes de fonctionnement.

Solution

Données : $I = 93 \text{ mA} = 93 \cdot 10^{-3} \text{ A}$; $U = 4,3 \text{ V}$; $t = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}$.

Calculons l'énergie électrique W_{el} consommée.

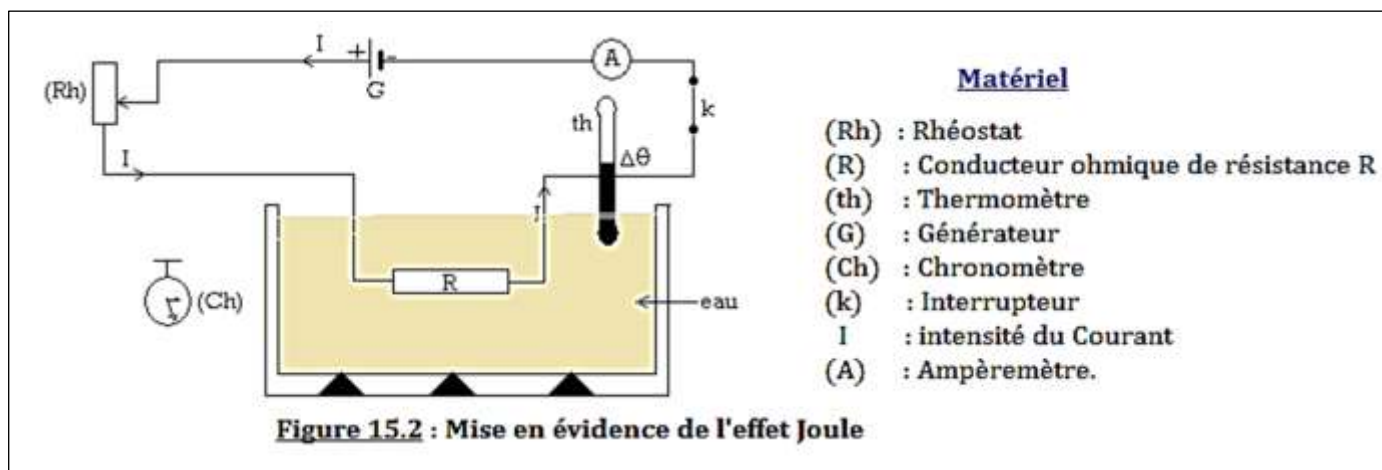
Par définition, $W_{el} = U \times I \times t$ AN : $W_{el} = 120 \text{ J} = 120 \times 3600 = 432 \cdot 10^3 \text{ Wh} = 432 \text{ kWh}$

3. Loi de Joule : l'effet Joule

3.1. Définition de l'effet Joule

L'**effet Joule** est le dégagement de chaleur qui se produit dans un conducteur lors du passage d'un courant électrique.

3.2. Étude expérimentale



- Faits expérimentaux :**

- La quantité de chaleur absorbée par le calorimètre à eau pour une élévation de température $\Delta\theta$, est :

$$Q = (\mu + m) \times C_e \times \Delta\theta = (\mu + m) \times C_e \times (\theta_f - \theta_i). \quad (15.4)$$

μ = valeur en eau du calorimètre (kg)

C_e = chaleur massique de l'eau (J/kg/°C) ou (J/kg/K)

m = masse d'eau dans le calorimètre (kg)

- Résultats expérimentaux**

L'expérience montre que la quantité de chaleur dégagée par le résistor R suite au passage du courant est :



- Proportionnelle à la durée **t** de passage dudit courant
- Proportionnelle au carré de l'intensité **I** du courant
- Variable avec la nature du résistor.

Énoncé de la loi de Joule

« La quantité de chaleur **Q (W)** dégagée par effet joule dans un conducteur de résistance **R** traversé par un courant **I**, est égale au produit de sa résistance par le carré de l'intensité du courant et par la durée **t** de passage dudit courant : **$W = Q = R \times I^2 \times t$** (15.5)

Remarque

- ♦ L'effet joule se manifeste aussi bien en courant continu qu'en courant alternatif.
- ♦ L'intensité efficace **I** d'un courant alternatif est définie comme étant l'intensité du courant continu qui, passant dans le même conducteur pendant le même temps, produirait la même quantité de **chaleur** que ce courant alternatif :

$$I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \Rightarrow \begin{cases} I_{\max} = \text{intensité max. du courant alternatif} \\ I = \text{intensité efficace du courant alternatif} \end{cases} \quad (15.6)$$

- ♦ À l'intensité efficace correspond une tension efficace **U** tel que :

$$U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} \Rightarrow \begin{cases} U_{\max} = \text{tension max. du courant alternatif} \\ U = \text{tension efficace du courant alternatif} \end{cases} \quad (15.7)$$

3.3. Application de l'effet Joule

- Les applications de l'effet joule sont celles qui mettent à profit la conservation de l'énergie électrique en énergie calorifique.
- On peut alors citer comme domaines d'application de l'effet Joule, les domaines suivants :
 - En **électroménager** : fer-à-repasser ; chauffe-eau ; plaque chauffante ; etc.
 - Dans **l'industrie** : fours électriques
 - Dans **les installations électriques** : fusible ; lampes à incandescence ; etc.
 - Etc.

4. Bilan énergétique et rendement d'une portion de circuit

- Pour faire un bilan énergétique dans une portion de circuit, il faut tout d'abord identifier les formes d'énergie mise en jeu, puis discerner l'**énergie utile** de l'**énergie perdue**.
- Le rendement **η (êta)** d'une portion de circuit est le rapport de l'énergie utile par l'énergie reçue et s'exprime en pourcentage (%) :

$$\eta = \frac{W_{\text{utile}}}{W_{\text{reçue}}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{reçue}}} \quad (15.8)$$

4.1. Bilan énergétique dans un résistor

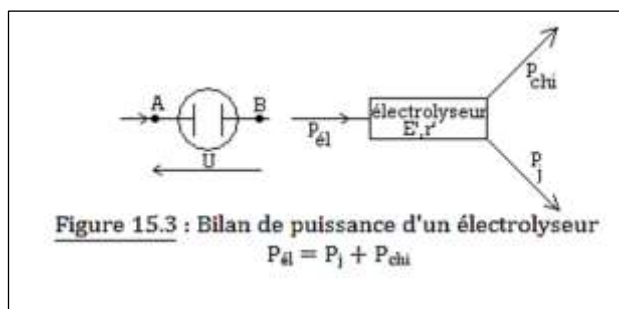
- Le rendement d'un conducteur ohmique est : $\eta = \frac{P_{\text{cal}}}{P_{\text{el}}} = \frac{Q_J}{W_{\text{el}}} \quad (15.9)$

il est pratiquement égal à 1.

- Pour une lampe, la puissance utile est la puissance rayonnante **P_{ray}** émise dans le visible. Dans ce cas le rendement sera :

$$\eta = \frac{P_{\text{ray}}}{P_{\text{el}}} \quad (15.10)$$

4.2. Bilan énergétique dans un électrolyseur



On sait que la tension U aux bornes d'un électrolyseur est donnée par : $U = E' + r' \cdot I$ (*)

En multipliant (*) par I ,

$$\Rightarrow U \cdot I = E' \times I + r' \times I^2 \quad (2^*)$$

Posons :

- $P_{el} = U \times I$ = puissance consommée par l'électrolyseur ; (15.11)

- $P_J = r' \times I^2$ = puissance dissipée par effet Joule ; (15.12)

- $P_{chi} = E' \times I$ = puissance électrique transformée aux électrodes en puissance chimique : c'est la **puissance utile** : $P_u = P_{chi}$ (15.13)

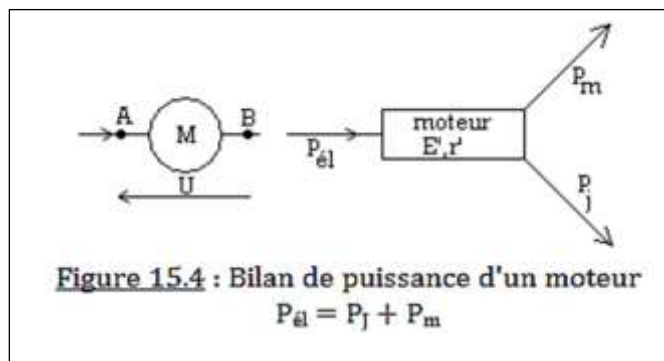
Le rendement est :

$$\eta = \frac{P_{chi}}{P_{el}} = \frac{W_u}{W_{el}} = \frac{E' \cdot I}{U \cdot I} = \frac{E'}{U} = \frac{E'}{E' + r' \cdot I} \quad (15.14)$$

Remarque

L'électrolyseur à anode soluble se comporte comme un conducteur ohmique car $E' = 0 \text{ V}$.

4.3. Bilan énergétique d'un moteur à courant continu



De même que l'électrolyseur, on a : $U = E' + r' \cdot I$ (3*)

en multipliant (3*) par I , on a : $\Rightarrow U \times I = E' \times I + r' \times I^2$. (4*)

Posons :

- $P_{el} = U \times I$ = puissance consommée par le moteur ; (15.15)

- $P_J = r' \times I^2$ = puissance dissipée transformée par effet Joule. (15.16)

- $P_m = E' \times I$ = puissance électrique transformée en puissance mécanique : c'est la puissance utile du moteur $P_u = P_m$ (15.17)

Le rendement est :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{el}} = \frac{W_u}{W_{el}} = \frac{E' \cdot I}{U \cdot I} = \frac{E'}{U} = \frac{E'}{E' + r' \cdot I} \quad (15.18)$$

Remarque

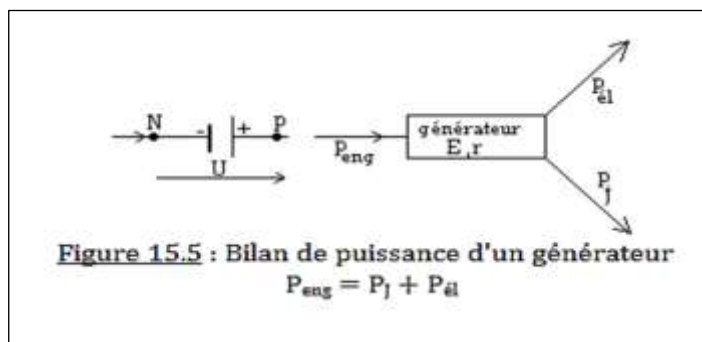
Si le moteur est bloqué, $E' = 0 \text{ V}$, le moteur se comporte comme un résistor de résistance r' .

4.4. Bilan énergétique d'un générateur

(a) Définition

Un **générateur** est un convertisseur d'énergie qui transforme un type d'énergie (chimique, mécanique) en énergie électrique cédée aux différents récepteurs du circuit.

(b) Bilan énergétique



En générateur :

$$U = E - r \times I. \quad (5^*)$$

Si on multiplie par I, on obtient :

$$\Rightarrow U \times I = E \times I - r \times I^2 \quad (6^*)$$

Posons :

- $P_{el} = U \times I$ = puissance électrique **cédée** ou **perdue** par le générateur et utilisée à l'extérieur de celui-ci. Elle porte le nom de puissance **disponible** et est notée : $P_{dispo} = P_{el}$. (15.19)

- $P_j = r \times I^2$ = puissance dissipée par effet joule dans le générateur

- $P_{eng} = E \times I$: puissance chimique ou mécanique transformée en puissance **engendrée**. (15.20)

Le rendement est donné par :

$$\eta = \frac{W_{el}}{W_{eng}} = \frac{P_{el}}{P_{eng}} = \frac{E - r \times I}{E} \quad (15.21)$$

5. Puissance en courant alternatif

Elle est donnée par la relation suivante : $P = U \times I \times \cos\alpha = U \times I \times k$ (15.22)

Unité : U (en V) ; I (en A) ; $\cos\alpha = k$ = **facteur de puissance** du circuit (**généralement $k \leq 1$**) et P (en W).

6. Notion de pertes d'énergie

- Les pertes d'énergie dans un circuit ou dans un réseau électrique sont dues à l'effet joule.
- Pour une puissance **P** à transporter en ligne :

$$- P_{cal} = R \times \left(\frac{P}{U} \right)^2 \quad \text{en courant continu.} \quad (15.23)$$

$$- P_{cal} = R \times \left(\frac{P}{k \times U} \right)^2 \quad \text{en courant alternatif.} \quad (15.24)$$

- Pour minimiser les pertes il faut :
 - Utiliser des fils conducteurs de faible résistance. Cas des câbles en cuivre.
 - Utiliser de câbles de section élevée
 - Transporter l'énergie électrique sous **haute-tension** (**de 15000 à 200000 V**)



- Augmenter le facteur de puissance de l'installation (utilisation des batteries de recharge dans les stations de pompage).

Remarque

✍ La puissance absorbée P_{ab} est donnée par la relation :

$$P_{ab} = \frac{P_u}{r} \quad \text{où } r \text{ est une constante (rapport de pourcentage)} \quad (15.25)$$

✍ La puissance apparente P_a vaut : $P_a = \frac{P_{ab}}{k}$ où k facteur de puissance. (15.26)

✍ La puissance apparente en courant alternatif est :

$$P_a = U \times I \text{ et s'exprime en Voltampère (VA).} \quad (15.27)$$

✍ La résistance R d'un conducteur cylindrique et homogène est donnée par la relation :

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \begin{cases} \rho : \text{résistivité d'un conducteur.} (\Omega m) \\ S : \text{surface de section.} (m^2) \\ \ell : \text{longueur du conducteur cylindrique.} (m) \end{cases} \quad (15.28)$$

Exemple

On monte en série, un générateur (G), un électrolyseur (E) et une lampe (L).

Les caractéristiques sont : (G) : $\{r = 3\Omega ; E = 15V\}$; (E) : $\{r_1' = 2\Omega ; E' = 3,5V\}$; (L) : $\{r_2' = 10m\Omega\}$.

- (1) En circuit fermé, calculer l'intensité du courant qui circule dans le circuit.
- (2) Évaluer le rendement en tension de l'électrolyseur.
- (3) Pour une raison inconnue, le générateur (G) est court-circuité. Déterminer le courant de court-circuit I_{CC} du générateur.

Solution

(1) Calculons I

D'après la loi de Pouillet,

$$I = \frac{E - E'}{r + r_1' + r_2'} \quad \underline{\text{AN}} : I = 2,295 \approx 2,3 \text{ A.}$$

(2) Calculons η_u

On sait que,

$$\eta_u = \frac{E'}{E' + r_1' I} \quad \underline{\text{AN}} : \eta_u = 0,43 = 43\%$$

(3) Déterminons I_{CC} .

On sait que,

$$I_{CC} = \frac{E}{r} \quad \underline{\text{AN}} : I_{CC} = 5 \text{ A.}$$

7. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Énergie	Energy
Effet Joule	Joule effect
Perte d'énergie	Loss of energy

Sentence

The Joule effect is characterized by the warming of an electrical component when it is run by the current.

**EXERCICES DE LA LEÇON 15 : ÉNERGIE CONSOMMÉE DANS UNE PORTION DE CIRCUIT****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES SAVOIRS**

1. Définir : énergie électrique ; puissance consommée ; rendement d'une portion de circuit.
2. Écrire la relation entre la différence de potentiel entre deux points A et B et l'énergie électrique consommée dans cette portion de circuit par un courant d'intensité I pendant un temps t.
3. Énoncer la loi de Joule.
4. Sous quelle forme l'énergie électrique est-elle convertie dans :
 - Un moteur ;
 - Un électrolyseur ;
 - Un conducteur ohmique ;
 - Un générateur.
5. Recopier et compléter les phrases suivantes.
 - 5.1. L'énergie électrique consommée dans une portion de circuit pendant un temps donné est égale à la.....qui y apparaissent pendant le même temps.
 - 5.2. Dans le système international, l'unité de l'énergie électrique est.....de symbole.....
 - 5.3. La relation $P = \dots\dots$ exprime la puissance électrique consommée dans une portion de circuit.
 - 5.4. Le watt de symbole.....est l'unité de la.....dans le système international.
 - 5.5. La relation $P = UI$ correspond à la puissance.....dans un courant alternatif.
 - 5.6. Dans la relation $P = k \times U \times I$, k est appelé.....
 - 5.7. Un générateur électrique convertit en.....d'autres formes d'énergie. La tension en circuit ouvert d'un générateur est appelée.....ou....
 - 5.8. L'.....correspond à une perte d'énergie sous forme de chaleur.
 - 5.9. Tout dispositif électrique capable de transformer l'énergie électrique en une autre forme d'énergie est appelé.....
6. Répondre par vrai ou faux et corriger les affirmations fausses.
 - 6.1. La puissance disponible aux bornes d'un générateur (E, r) est $P = EI$.
 - 6.2. La tension efficace U et la tension maximale $U_{\max}$ sont liées par la relation $U = U_{\max} \sqrt{2}$.
 - 6.3. Un électrolyseur est un exemple de convertisseur d'énergie.
 - 6.4. L'énergie électrique correspond à un transfert d'énergie sous forme de travail.
 - 6.5. Dans un générateur, une partie de l'énergie reçue est transformée en chaleur.
 - 6.6. Le principe de superposition d'énergie ou principe de conservation d'énergie peut s'écrire : $W_{\text{él}} = W_{\text{chi}} + W_{\text{mec}} + W_{\text{ray}} + W_{\text{cal}}$.
 - 6.7. La puissance utile d'un récepteur (E', r') est $P = E'I'$.
7. Questions à choix multiples (QCM)

- 7.1. Lorsqu'un système reçoit de l'énergie d'un système autre système, sa quantité de chaleur Q est telle que :
 - (a) $Q > 0$;
 - (b) $Q < 0$;
 - (c) $Q = 0$.
- 7.2. Selon l'effet joule, l'énergie électrique W d'une portion de circuit (conducteur ohmique) traversée par un courant I en un temps t, est donnée par la relation :
 - (a) $W = R^2It$;
 - (b) $W = RI t^2$;
 - (c) $W = RI^2t$.
- 7.3. Le cheval-vapeur (ch), qui est l'unité industrielle de la puissance, est équivalent à :
 - (a) 735,5 watt.
 - (b) 3600 watt.
 - (c) 73,55 watt.
- 7.4. Une pile de 9V et de résistance interne 2Ω débite un courant d'intensité 2A.
 - 7.4.1. La puissance électrique engendrée par la pile est :
 - (a) 8 W ; (b) 26 W ; (c) 36 W ; (d) 18W.
 - 7.4.2. La puissance dissipée dans la pile est :
 - (a) 15 W ; (b) 26 W ; (c) 10 W ; (d) 20 W.
 - 7.4.3. La puissance disponible à ses bornes est :
 - (a) 10 W ; (b) 26 W ; (c) 18 W ; (d) 22 W.
 - 7.4.4. En une heure de fonctionnement, la quantité de chaleur dégagée est :
 - (a) 108000J ; (b) 38800 J ; (c) 28800 J ; (d) 18800 J.
 - 7.4.5. L'énergie fournie par la pile à l'extérieur est :
 - (a) 64800 J ; (b) 36 000 J ; (c) 144000 J ; (d) 92600 J.

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

1. Une lampe à incandescence (6V ; 100 mA) est utilisée dans une lampe torche.
 - 1.1. Calculer la puissance électrique fournie à la lampe en fonctionnement normal.
 - 1.2. Effectuer un bilan énergétique de la lampe et schématiser les transferts énergétiques.
 - 1.3. On évalue que la puissance rayonnante dans le domaine du visible est de 60 mW. Déterminer le rendement lumineux de cette lampe.
2. Un électrolyseur à eau acidulée, à électrode de platine, ayant une f.é.m. $E' = 1,5 \text{ V}$ et une résistance interne $r' = 4,8 \Omega$ est branché aux bornes d'un générateur de f.é.m. $E = 4,5 \text{ V}$ et de résistance interne $r = 2\Omega$.
 - 2.1. Déterminer le point de fonctionnement $F(I_F ; U_F)$ du circuit.
 - 2.2. Calculer :
 - (a) La puissance électrique engendrée par le générateur.
 - (b) La puissance électrique transformée utilement par l'électrolyseur ;
 - (c) La puissance transformée au total par effet joule.

2.3. Calculer :

- Le rendement de l'électrolyseur ;
- Le rendement du générateur ;
- Le rendement du circuit.

3. Un moteur de résistance interne $r' = 20\Omega$, est alimenté sous une tension électrique de 220V.

3.1. Le moteur est bloqué.

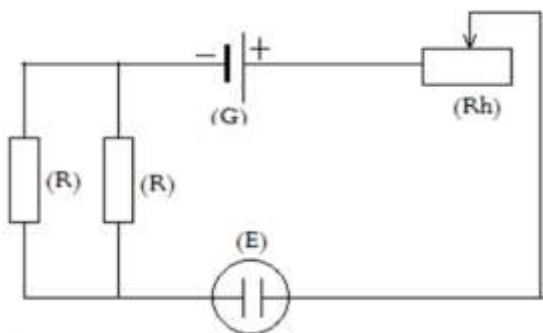
- Pour quelle valeur de E' , force contre électromotrice, a-t-on un moteur bloqué ?
- Dans ces conditions, en déduire l'intensité du courant qui le traverse.

3.2. Le moteur tourne et fournit un travail. La chaleur dégagée par effet joule dans ce dernier en 2 minutes est $Q = 7,8 \text{ J}$.

- Calculer la valeur de l'intensité qui traverse le moteur.
- Calculer la force contre électromotrice E' de ce moteur et en déduire son rendement.

3.3. Faire, à l'aide d'un diagramme des énergies, le bilan énergétique de ce moteur.

4. On considère le montage ci-dessous où les résistances (R) sont identiques et de résistance commune $R = 12\Omega$, montées en dérivation.



- (R_h) = rhéostat de résistance $R_h = 10\Omega$;
- (R) : résistor de résistance R .
- (E) : électrolyseur $\{E' = 4 \text{ V} ; r' = 6\Omega\}$
- (G) : générateur $\{E = 20 \text{ V} ; r = 5\Omega\}$

4.1. Donner le schéma équivalent à ce circuit.

4.2. Déterminer l'intensité du courant qui circule dans le circuit équivalent.

4.3. Quel est le rendement de l'électrolyseur ?

4.4. L'électrolyseur est remplacé par un moteur (M) tels que $\{E'_1 = 5 \text{ V} ; r'_1 = 7\Omega\}$.

4.4.1. Que représentent les indications données de (M) entre accolades ?

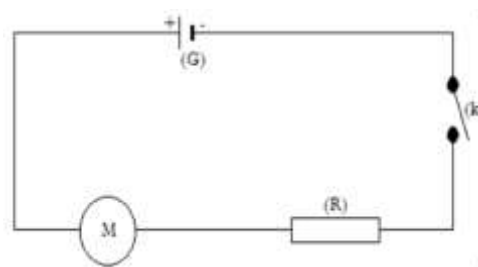
4.4.2. Calculer la puissance utile P_u de ce moteur.

4.4.3. Le facteur de puissance de ce moteur est évalué à $k = 0,85$ et le rendement du moteur est alors $r = 0,92$. Calculer :

- La puissance absorbée P_{ab} par le moteur.
- La puissance apparente P_a du moteur.

5. On considère le circuit ci-dessous sur lequel sont montés en série : un générateur (G), un moteur (M) et un résistor (R).

Caractéristiques : (G) $\{E = 20 \text{ V} ; r = 3\Omega\}$; (M) $\{E' = 12 \text{ V} ; r' = 2\Omega\}$; (R) : $R = 5,55\Omega$.



5.1. Reproduire la figure en y indiquant le sens du courant I , en circuit fermé.

5.2. Quelle est la valeur du courant I en circuit fermé ?

5.3. Quelles sont les formes d'énergie, dans le moteur ? Dans le résistor ?

5.4. On court-circuite le générateur. En déduire dans ce cas, la valeur de l'intensité du courant de court-circuit I_{cc} .

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Pile et énergie

Chaque élément d'une pile Leclanché, contient une masse de 6,5 g de zinc transformable en ions Zn^{2+} . La pile comporte trois éléments en série.

1. Déterminer la quantité maximale d'électricité (en Ah) susceptible d'être fournie par la pile en supposant que tout le zinc soit transformé.

2. Déterminer l'énergie maximale pouvant être convertie par la pile en supposant qu'au cours du fonctionnement, la f.é.m. reste constante et égale à 1,2 V par élément.

3. En réalité, la pile étant devenue inutilisable, on constate qu'il reste 6,0 g de zinc par élément.

1. Déterminer la quantité d'électricité fournie par la pile.

2. Déterminer l'énergie chimique convertie.

3. Qu'est devenue cette énergie ?

Données : $F = 96\,500 \text{ C}$; $M(\text{Zn}) = 65 \text{ g.mol}^{-1}$.

Situation 2 : Distribution d'énergie par câble

Un câble électrique d'épaisseur 0,11 mm, de largeur 0,21 mm et de résistivité $1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$, est utilisé pour fabriquer un résistor (R) de résistance R .

1. On suppose le câble de forme cylindrique et homogène. Déterminer la valeur de R si la longueur du fil à utiliser est de 18,77 m.

2. Le résistor (R) précédent est utilisé dans un circuit comprenant en série une lampe à incandescence (3V ; 75W), un générateur (21V ; 3Ω). L'ensemble de ces éléments est monté en série et commandé par un interrupteur (k).

Réaliser une figure de la situation.

2.1. Quel rôle vient jouer le résistor dans ce circuit ?

2.2. Que représente (3V ; 75W) pour la lampe ?

2.3. Déterminer l'intensité du courant I qui traverse le circuit lorsque celui-ci est fermé.



Leçon 16

PRODUCTION DU COURANT ALTERNATIF

Activité

Le document ci-contre présente un groupe électrogène, source de courant alternatif. Dans un tel appareil, se produit le phénomène d'induction électromagnétique.

Comment expliquer ce phénomène et quel est le mode de fonctionnement d'une telle source ?



ACTIVITÉS

Objectifs

- ⇒ Interpréter le phénomène d'induction électromagnétique
- ⇒ Décrire le mode de fonctionnement d'une source de courant alternatif.

1. Rappels de magnétostatique1.1. Définition du champ magnétique

- Le **champ magnétique** est une région de l'espace dans laquelle des objets ferromagnétiques sont soumis à des forces ferromagnétiques.
- Un champ magnétique est caractérisé en chacun de ses points par une grandeur vectorielle $\vec{B}$ appelée **vecteur champ magnétique** ou **induction magnétique**.
- Caractéristiques de $\vec{B}$:
 - **Direction et sens** : axe orienté $\overrightarrow{SN}$ définit par une aiguille aimantée, le sens est celui du pôle Nord de l'aiguille.

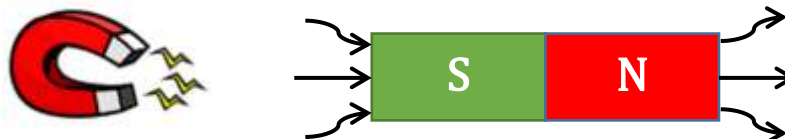


Figure 16.1 : Sens du champ magnétique

- **Intensité** : c'est une grandeur scalaire mesurable à l'aide d'un **Tesla-mètre** ou d'une **sonde de Hall**. Son unité est le **Tesla** de symbole (T).

Exemples

champ magnétique terrestre :	$2 \cdot 10^{-5} \leq B \leq 7 \cdot 10^{-5}$	(T)
Aimant du haut-parleur :	$10^{-3} \leq B \leq 5 \cdot 10^{-1}$	(T)
Aimant ordinaire :	$2 \cdot 10^{-3} \leq B \leq 5 \cdot 10^{-3}$	(T)

Champ géomagnétique

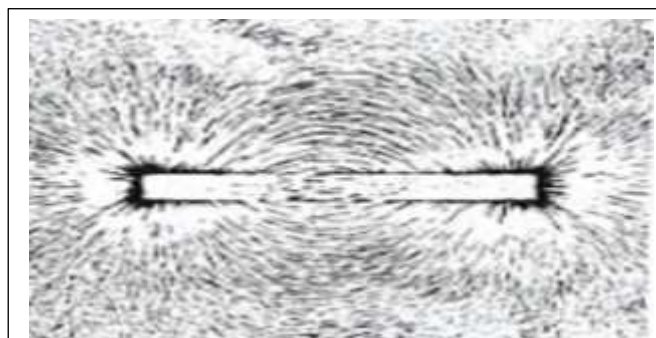
Le champ magnétique au voisinage de la Terre est appelé **champ géomagnétique** ou **champ magnétique terrestre**.

1.2. Spectre magnétique

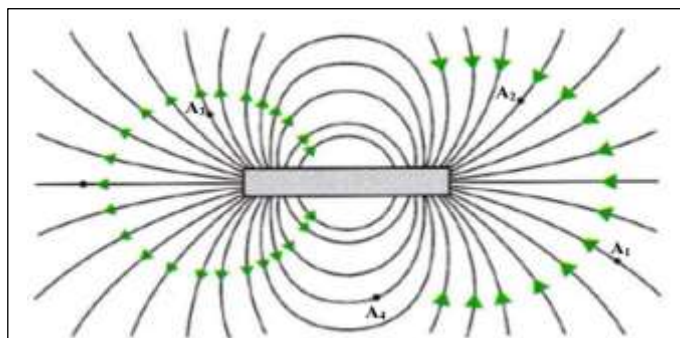
Versons de la limaille de fer sur un aimant ; on observe que les grains de limaille s'organisent selon des lignes courbes privilégiées.

- Ces lignes sont appelées **lignes de champ**.

- L'ensemble de ces lignes de champ est appelé **spectre magnétique** de l'aimant
- Une ligne de champ est une ligne courbe, tangente au vecteur $\vec{B}$ en chacun de ses points.
- **Représentation :**



(a) Spectre magnétique matérialisé par de la limaille de fer.



(b) Représentation de quelques lignes de champ

Figure 16.2 : Spectre et lignes du champ magnétique sur un barreau aimanté

Remarque

- ✍ Les lignes de champ sont des courbes qui sont tangentes en chacun de leurs points au vecteur champ magnétique.
- ✍ Lorsque les lignes de champ sont des droites parallèles, le champ magnétique est dit **uniforme** (c'est le cas par exemple à l'intérieur d'un aimant en U)
- ✍ Il n'existe pas de monopôles magnétiques car lorsqu'on brise un aimant, on obtient toujours un aimant à deux pôles.

2. Champ magnétique créé par un courant

2.1. Expérience d'Oersted : Mise en évidence

Matériels

- Une alimentation, réf. 01981
- Un rhéostat, réf. 04034
- Un ampèremètre, réf. 01266
- Un interrupteur simple sur socle, réf. 04162
- Des cordons de raccordement double puits, Ø 4 mm.

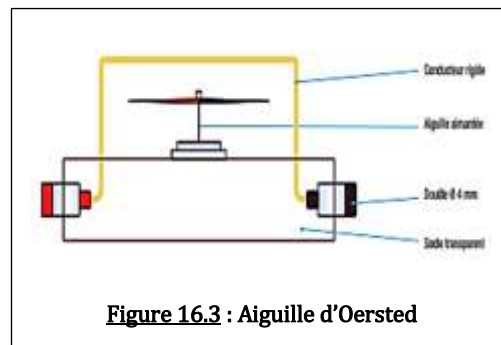


Figure 16.3 : Aiguille d'Oersted

Remarque

L'aiguille aimantée SN, orientée par la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre, est placée parallèlement au conducteur rectiligne en cuivre.

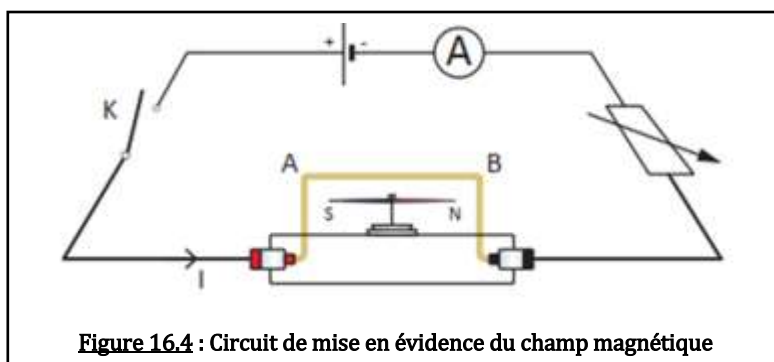


Figure 16.4 : Circuit de mise en évidence du champ magnétique

Observations

- Faisons passer un courant électrique d'intensité I dans le fil AB en fermant l'interrupteur K.
- Aussitôt, l'aiguille aimantée SN dévie. Ainsi le passage du courant dans le conducteur **génère un champ magnétique**.
- La règle d'AMPÈRE donne le sens de déviation : un observateur (bonhomme d'Ampère) est couché le long du fil AB, de façon que le courant entre par ses pieds et ressorte par sa tête. Il regarde le pôle nord de l'aiguille qu'il voit se déplacer vers sa gauche.
- Si l'on inverse le sens de passage du courant, on constate que l'aiguille aimantée se déplace vers sa droite.

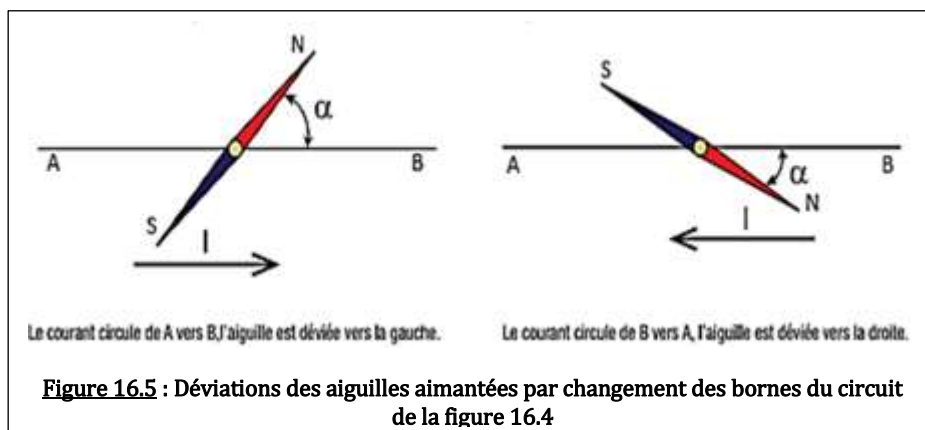


Figure 16.5 : Déviations des aiguilles aimantées par changement des bornes du circuit de la figure 16.4

2.2. Caractéristique du champ magnétique d'un courant

Comme tout segment de droite fléché (vecteur), le vecteur champ magnétique est caractérisée par :

- Une direction** : elle est toujours tangente à la ligne de champ en un point.
- Un sens** : il est donné par la règle de l'**observateur d'Ampère** :

« l'observateur d'Ampère regardant un point M, est placé sur le conducteur, de telle sorte que le courant le traverse des pieds vers la tête. Son bras gauche tendu latéralement, indique le sens de $\vec{B}$ ».

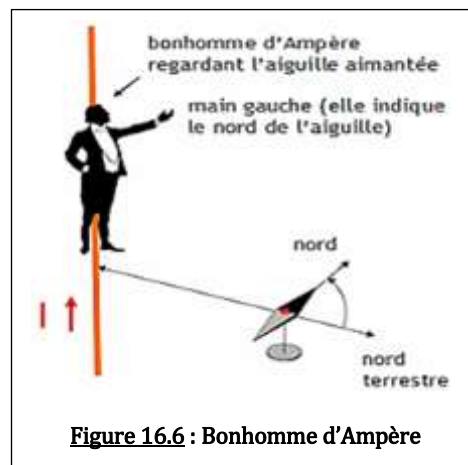


Figure 16.6 : Bonhomme d'Ampère

- Une Intensité** : elle est proportionnelle à celle de I et dépend de la position du point M et de la forme du conducteur.
- Une origine** ou point d'application, qui, pour certains, se trouve au centre de celui-ci.

Nota Bene

Tout conducteur parcouru par un courant électrique, crée à son voisinage, un champ magnétique.

2.2.1. Les conducteurs rectilignes

L'intensité du vecteur champ magnétique $\vec{B}$ créé par un courant rectiligne infiniment long d'intensité I en un point M distant de d du conducteur a pour expression :

$$B = 2 \times 10^{-7} \times \frac{I}{d} \quad (16.1)$$

Unités : I (en A) ; d (en m) B (en T).

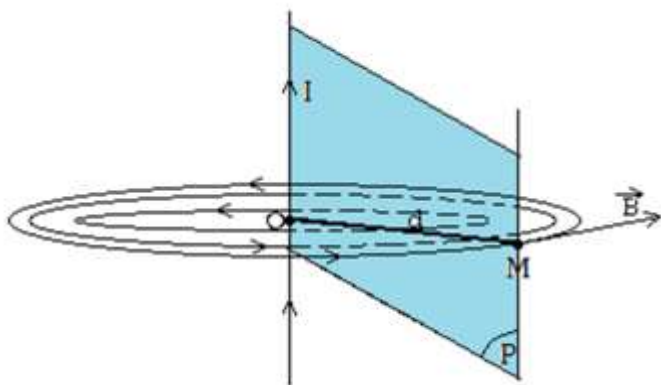


Figure 16.7 : Champ magnétique créé en un point M par un conducteur rectiligne infiniment long.

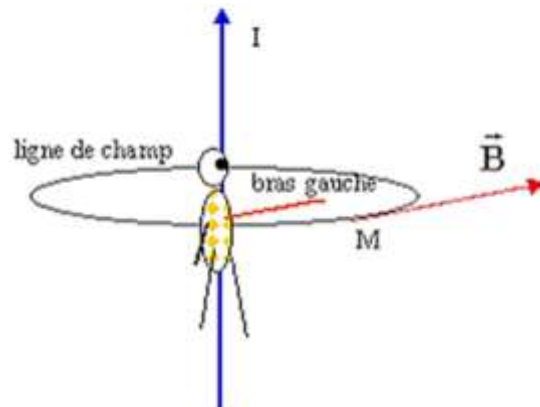
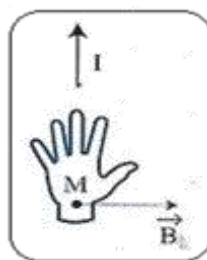


Figure 16.8 : Sens et direction donnés par le bonhomme d'Ampère.

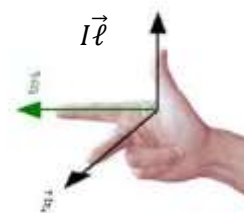
Remarque

Le sens du vecteur champ magnétique peut aussi être donné par la règle de la main droite :

« Le sens du vecteur CM est celui du pouce d'une main droite ouverte, la paume tournée vers M et le courant sortant des doigts ».



Main droite



3-doigts de la main droite

Nota Bene

Si le champ magnétique est créé par un « paquet » de n-conducteurs parcourus par des courants de même intensité I et circulant dans le même sens, on a :

$$B = 2 \times 10^{-7} \times n \times \frac{I}{d} \quad (16.2)$$

2.2.2. Bobine plate ou conducteur circulaire à N-spires de rayon R

Vers le centre de la spire ou de la bobine plate, les lignes de champ sont sensiblement des droites. Le vecteur CM $\vec{B}_0$ est orthogonal au plan des spires. Le sens de $\vec{B}_0$ est donné par la règle de l'observateur d'Ampère.

Intensité : $B_0 = 2\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{N \times I}{R} \quad (16.3)$

Unités : I (A) ; R (m)=rayon de spire ; B_0 (T)

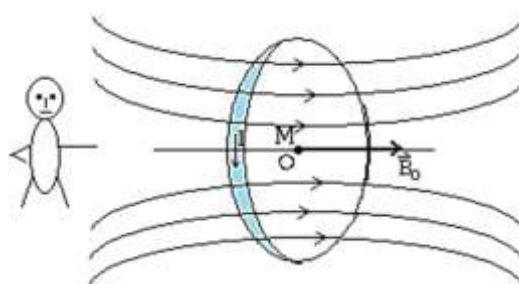


Figure 16.9 : Champ magnétique créé au centre d'une pire ou d'une bobine plate

Remarque

L'épaisseur (e) de la bobine est négligeable devant le rayon d'une spire.

2.2.3. Solénoïde de longueur L à N-spires

- À l'intérieur du solénoïde (figure 16.10), les lignes de champ sont sensiblement des droites parallèles (**champ quasi-uniforme**).
- Le **sens** de $\vec{B}_0$ en O, centre du solénoïde, est donné soit par l'observateur d'Ampère, soit par la règle du tire-bouchon de Maxwell: « placé dans l'axe du solénoïde, et tournant dans le sens de I, le tire-bouchon avance dans le sens de $\vec{B}_0$ », soit par la règle de la main droite.

• Intensité :

$$B_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \times \frac{N \times I}{L} = \mu_0 \times \frac{N \times I}{L} \quad (16.4)$$

Remarque

✍ Si on pose $n = \frac{N}{L}$ = nombre de spires par unité de longueur (16.5)

$$, (16.5) \text{ devient } B_0 = \mu_0 \times n \times I. \quad (16.6)$$

Où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ est appelé **perméabilité magnétique dans le vide et dans l'air**.

✍ Si les spires sont jointives, $L = N \times d$ (16.7)
où d est le diamètre du fil conducteur, L la longueur du solénoïde et N le nombre de spires.

✍ Dans le cas où l'épaisseur e de l'isolant n'est pas négligée, $L = N(d + 2e)$ (16.8)

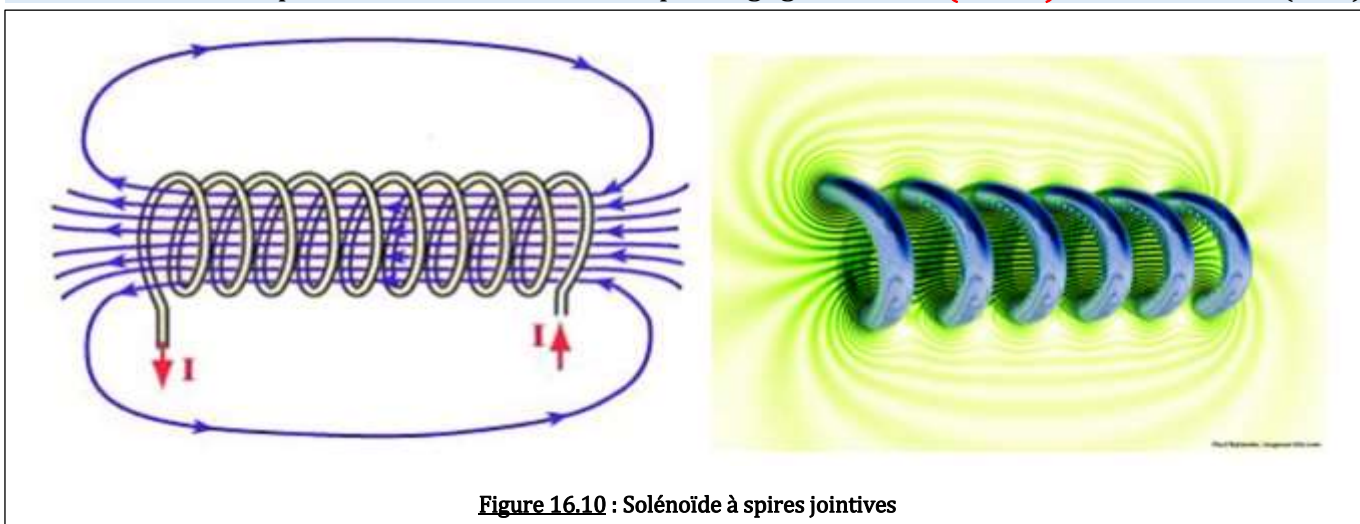


Figure 16.10 : Solénoïde à spires jointives

Exemple

On enroule sur un cylindre de longueur grande devant son diamètre, un fil conducteur isolé de diamètre $D = 1,2$ mm. L'enroulement est à spires jointives, sur une seule couche, toujours dans le même sens. Calculer l'intensité du champ magnétique créé à l'intérieur du cylindre lorsque le fil est parcouru par un courant électrique d'intensité $I = 8$ A.

Solution

Données : $D = 1,2$ mm ; $I = 8$ A.

L'intensité B du champ magnétique a pour expression : $B = \mu_0 \times n \times I$, où n est le nombre de spires par unité de longueur.

- Déterminons n .

Les spires étant jointives et en une seule couche, il y a, par unité de longueur, autant de spires qu'il y a de diamètres du fil qui constitue la bobine.

$$\text{On a alors : } n = \frac{1}{D}$$

$$\text{- Ainsi, } B = 4\pi \cdot 10^{-7} \times n \times I = 4\pi \cdot 10^{-7} \times \frac{I}{D} \quad \text{AN : } B = 8,37 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

3. Flux magnétique à travers une surface

- Plongeons une bobine dans le champ magnétique d'un aimant droit. En déplaçant l'aimant par rapport à la bobine, on constate que le nombre de lignes de champ à travers la surface de la bobine est plus grand lorsque l'aimant est plus proche de la bobine.

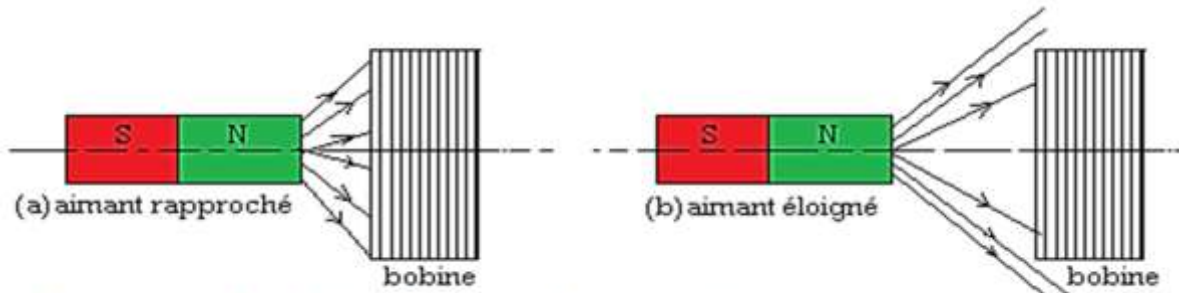


Figure 16.11 : Bobine baignant dans un champ créé par un aimant

- La grandeur physique qui caractérise le nombre de lignes de champ à travers la surface de la bobine est appelée **flux magnétique** et est noté Φ (phi).
- Notons S la surface plongeant dans un champ magnétique $\vec{B}$.

- Le vecteur $\vec{n}$ est la normale à la surface (S).
- Le **flux magnétique** Φ de $\vec{B}$ à travers (S) est tel que :

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{n} S = B \times S \times \cos(\widehat{\vec{B}, \vec{n}}) \quad (16.9)$$

$$\Rightarrow \Phi = B \times S \times \cos\theta \quad (16.10)$$

Unités : S en m^2 , B en T et Φ en **weber** (Wb)

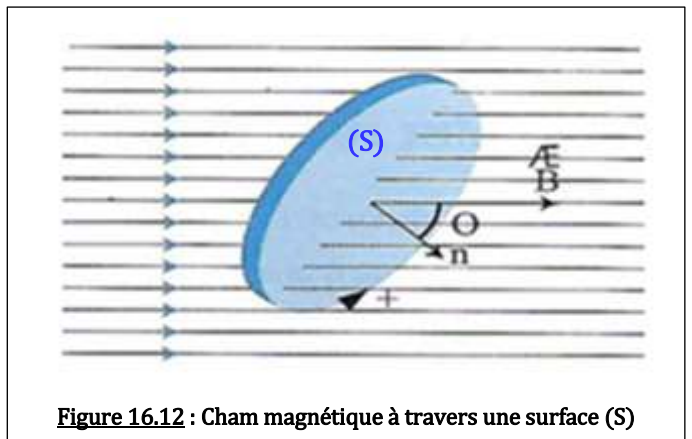
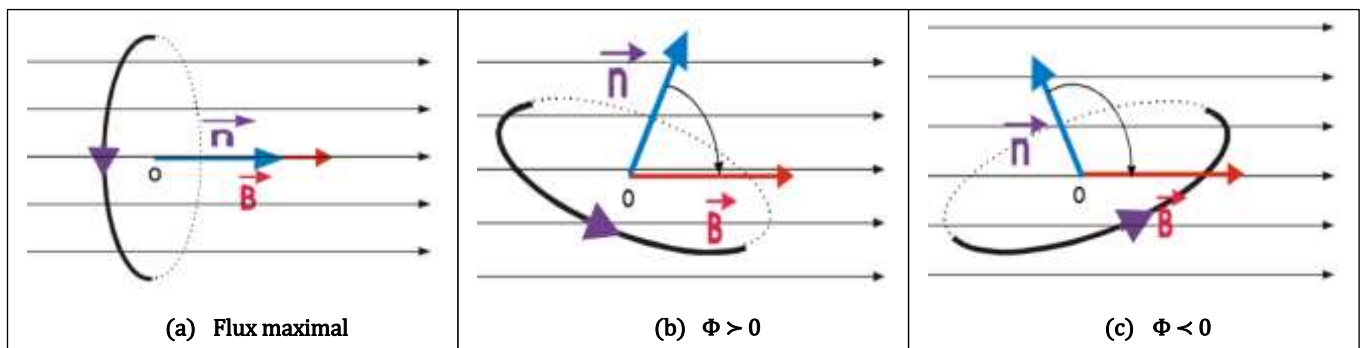
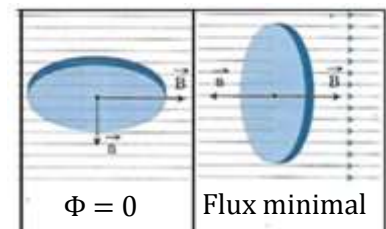


Figure 16.12 : Champ magnétique à travers une surface (S)

Conséquences liées au produit scalaire (16.9)

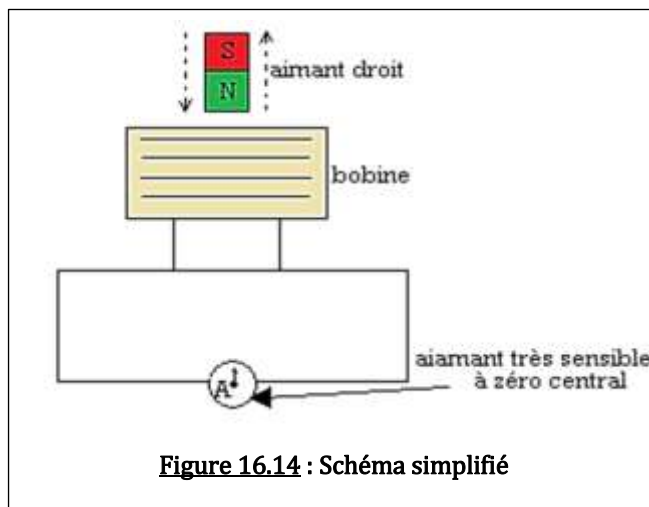
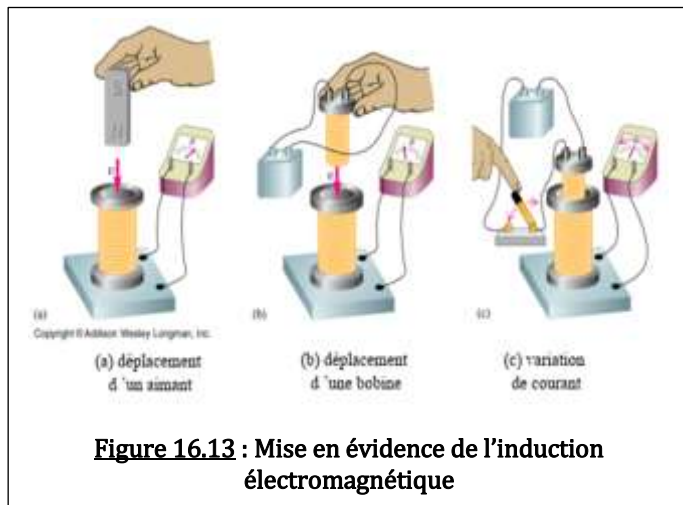
- Si $\theta = 0$, $\Phi = B \times S \rightarrow$ flux maximal et les vecteurs $\vec{n}$ et $\vec{B}$ sont colinéaires et de même sens.
- Si $\theta = \pi$, $\Phi = -B \times S \rightarrow$ flux minimal et les vecteurs $\vec{n}$ et $\vec{B}$ sont colinéaires mais de sens contraires.
- Si $\theta = \pi/2$, $\Phi = 0 \Rightarrow$ flux nul.
- Si $0 < \theta < \pi/2$, $\Rightarrow \Phi > 0$, (angle aiguë)
- Si $\pi/2 < \theta < \pi$, $\Rightarrow \Phi < 0$, (angle obtus)



4. Induction électromagnétique

4.1. Expérience de mise en évidence

Dispositif expérimental



Observations

- On approche le pôle nord de l'aimant vers la bobine, l'ampèremètre dévie. Dès qu'on éloigne ce pôle de la bobine, l'ampèremètre dévie en sens inverse.
- Si on permute les pôles de l'aimant, les sens de déviation changent aussi.
- Si le déplacement est rapide, la déviation de l'ampèremètre est importante.
- Si l'on cesse le mouvement de l'aimant, la déviation de l'aiguille cesse aussi.

Interprétation

- On approche **N** de l'aimant, le flux est grand à travers la surface de la bobine.
- On éloigne **N**, le flux diminue.
- Cette variation du flux créée par le déplacement de l'aimant impose une tension électrique aux bornes de la bobine qui se comporte à son tour comme un **générateur** de f.é.m. appelée **force électromotrice induite e**. Ce phénomène physique est appelé **induction électromagnétique**.
- L'ampèremètre mesure un courant dit **induit** dû à l'existence d'une **f.é.m. induite** dans le circuit.
- L'aimant droit qui est à l'origine du phénomène est appelé **inducteur** et la bobine est qualifiée d'**induite**.

Remarque

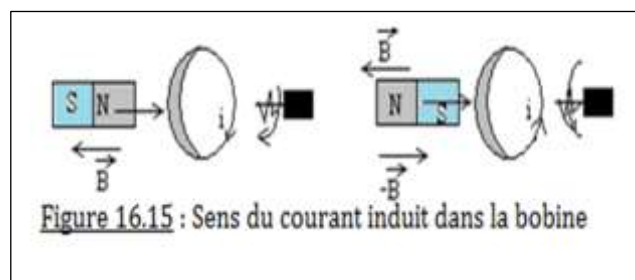
- Toute variation du flux à travers un circuit crée un **courant induit**.
- L'induction électromagnétique est la **création d'une source de tension** dans un circuit en utilisant un flux magnétique variable.

4.2. Sens du courant induit

Loi de Lenz

« Le sens du courant induit est tel que, par ses effets électromagnétiques, il s'oppose à la cause qui lui donne naissance ».

Le sens du courant induit dans la bobine est donné par la figure ci-contre :





4.3. La force électromotrice induite

- Si dans le circuit induit, le flux varie de Φ_1 à Φ_2 pendant une durée Δt , alors, la f.é.m. moyenne d'induction apparente dans ce circuit est :

$$e_{\text{moy}} = e_m = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (16.11)$$

- Si Φ est la relation donnant les variations du flux dans le circuit induit en fonction du temps, alors, la f.é.m. instantanée d'induction apparue dans ce circuit est l'opposée de la dérivée de Φ par rapport au temps :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (16.12)$$

Loi de Faraday

« Tout circuit électrique soumis à une variation du flux est le siège d'une f.é.m. induite e tel que :

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \gg$$

Remarque

- Le signe (-) dans les expressions (16.11) et (16.12), traduit la loi de Lenz précédente.
- L'intensité du courant induit est $i = \frac{e}{R}$ (16.13)
où R est la résistance totale du circuit induit.
- Comme R est positif, e et i ont le même signe. On peut par conséquent utiliser le signe de e pour trouver le sens du courant induit :
 - Le courant induit i circule dans le sens positif si $e > 0$
 - Le courant induit circule dans le sens négatif si $e < 0$

Exemple

Une bobine plate comprenant 150-spires est placée dans un champ magnétique uniforme dont le vecteur induction magnétique $\vec{B}$ a pour intensité 0,2 T. L'aire moyenne de chaque spire est $3,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$. On fait subir à cette bobine, une rotation au cours de laquelle l'angle θ que fait la normale au plan des spires avec $\vec{B}$ passe de 0° à 90° en 0,3 s. Calculer la f.é.m. moyenne induite au cours de cette rotation.

Solution

Données : $N = 150$ spires ; $B = 0,2 \text{ T}$; $S = 3,6 \cdot 10^{-2}$; $\Delta t = 0,3 \text{ s}$; $\theta_i = 0^\circ$; $\theta_f = 90^\circ$

Calculons e_{moy} .

Par définition, $e_{\text{moy}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_i - \Phi_f}{\Delta t} = \frac{NBS(\cos \theta_i - \cos \theta_f)}{\Delta t}$ **AN : $e_{\text{moy}} = 3,6 \text{ V}$.**

5. L'auto-induction

L'**auto-induction** : découverte par **Henry**, est le phénomène d'induction électromagnétique dans lequel un circuit est à la fois inducteur et induit. Il y apparaît donc une **f.é.m. d'auto-induction** suite à une variation du **flux propre Φ_p** i.e. à travers lui-même.

5.1. Mise en évidence

Sur cette figure 16.16 ci-dessous,

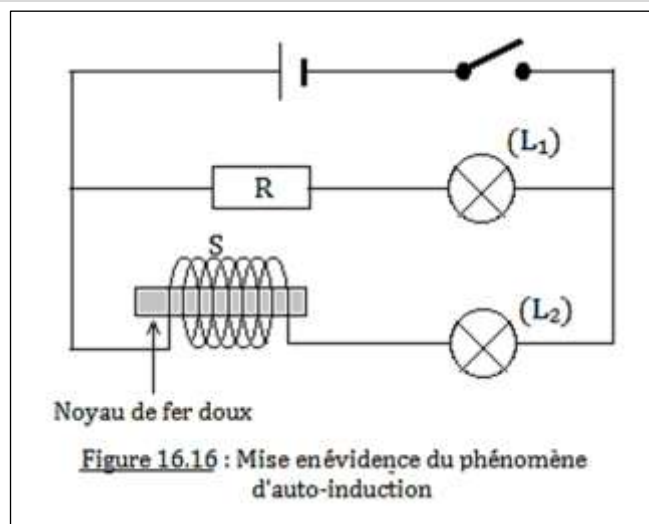
- (S) est un solénoïde avec un **noyau de fer** doux pour augmenter le flux propre.
- (R) est un conducteur ohmique de résistance R

♦ Observation :

- On ferme k : L₁ brille instantanément pendant que L₂ brille progressivement.
- On ouvre k : L₁ s'éteint instantanément pendant que L₂ s'éteint progressivement.

♦ Interprétation :

- On ferme k : la variation du flux propre dans la bobine crée une f.é.m. d'induction qui s'oppose à l'établissement du courant.
- On ouvre k : la variation du flux propre dans la bobine crée une f.é.m. d'induction qui s'oppose à la disparition du courant.



♦ Applications de l'induction :

- Elle est à l'origine de l'apparition de l'étincelle lorsqu'on débranche brutalement les appareils à moteur électrique.

- **Générateur alternatif** (Ex. : Centrale hydraulique)

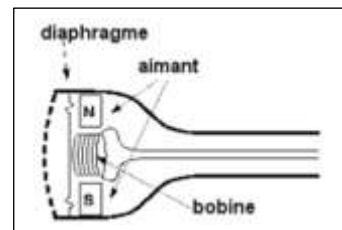
L'eau tourne une roue

- Qui tourne un électro-aimant
- Ce qui change le flux
- Et induit une f.é.m.

- **Microphone dynamique** (Ex. : Certains téléphones)

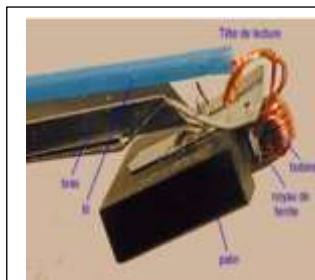
Le son

- Crée des variations de pression
- Qui font osciller le diaphragme et la bobine
- Ce qui va varier le flux
- Ce qui crée une f.é.m. variable qui suit le son.



- Lecture d'un ruban magnétique, d'un disque dur de basse densité, d'une carte de débit ou de crédit.

- L'information prend la forme d'une aimantation variable d'un matériau magnétisable qui recouvre la surface du ruban, du disque...
- De minuscules bobines réagissent aux changements de flux quand la surface défile sous elles ou quand elles se déplacent sur la surface.



5.2. Auto-inductance d'un circuit

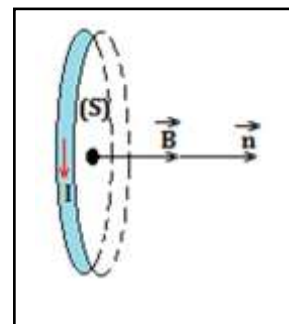
$\cos\theta = 1 \rightarrow \Phi_p = \text{flux propre}$ de $\vec{B}$ à travers la surface S.

Posons **L**, la constante ou coefficient de proportionnalité entre Φ_p et **i**. **L** est appelé **auto-inductance** du circuit et dépend de la forme du circuit : on aura dans ce cas :

$$\Phi_p = L \times i \quad (16.14)$$

On définit l'auto-induction comme étant le phénomène d'apparition d'une f.é.m. induite dans un circuit du fait de la variation de son flux propre :

$$\Phi_p = NBS \quad (16.15)$$



Définition

L'auto-inductance ou inductance L d'un circuit, est le rapport de son flux propre Φ_P à l'intensité i du courant qui le traverse :

$$L = \frac{\Phi_P}{i} \quad (16.16)$$

Unités : i (en A) ; Φ_P (en Wb) ; L (en Henry H).

5.3. La force électromotrice d'auto-induction

La force électromotrice instantanée d'auto-induction a pour expression :

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

(16.17)

Loi de Faraday

En cas de variation du flux magnétique à l'intérieur de ce circuit, il apparaît une tension e donnée par la relation 16.17.

5.4. Tension aux bornes d'une bobine

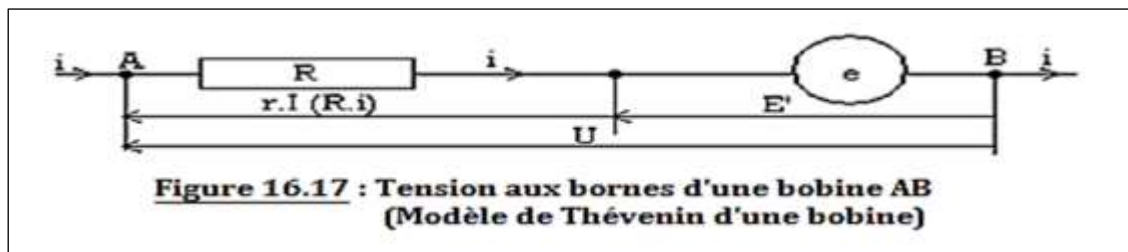


Figure 16.17 : Tension aux bornes d'une bobine AB (Modèle de Thévenin d'une bobine)

Convention récepteur : $U = E' + R \times i$ or $E' = -e = L \frac{di}{dt} \Rightarrow U = R \cdot i + L \frac{di}{dt}$ (16.18)

Remarque

- En courant continu, $i = \text{cste} \rightarrow \frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow U = R \times i$: la bobine se comporte tel un résistor.
- En courant variable, $L = 0 \text{ H}$ et $U = R \times i$.
- L'énergie emmagasinée par une bobine est donnée par : $E = \frac{1}{2} L \times i^2$ (en J) (16.19)

6. Les alternateurs (générateurs électromécaniques)

6.1. Rôle d'un alternateur

Un **alternateur** est un dispositif qui convertit le travail mécanique en énergie électrique.

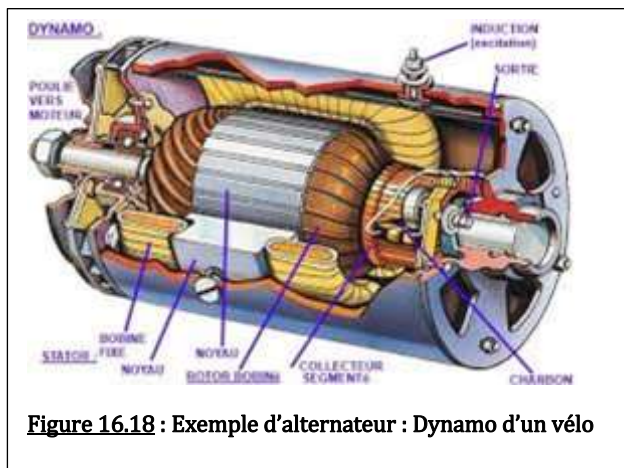


Figure 16.18 : Exemple d'alternateur : Dynamo d'un vélo

6.2. Principe de fonctionnement

- On sait que toute variation du flux à travers une surface fermée donne lieu à l'apparition d'une f.é.m. induite.
- Dans un alternateur, la variation du flux est obtenue par rotation d'un aimant au voisinage d'une bobine.
- Un alternateur est constitué de :
 - L'aimant inducteur, appelé **rotor**
 - La bobine fixe, appelée **stator**.

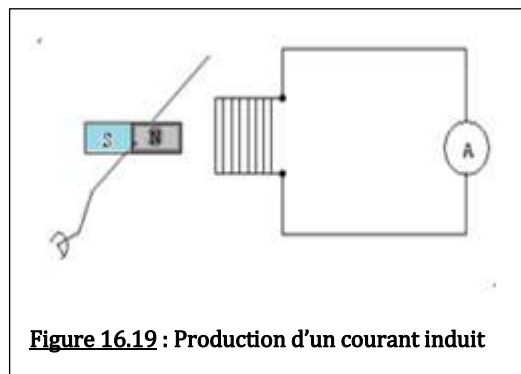


Figure 16.19 : Production d'un courant induit

Remarque

- Dans certains alternateurs, l'aimant peut être fixe et la bobine mobile.
- Dans certains alternateurs industriels, l'aimant permanent est souvent remplacé par des **électroaimants**. Ceux-ci peuvent posséder une paire de pôles (ils sont dits **dipolaires**) ou plusieurs (ils sont dits **multipolaires**).
- On distingue deux types d'alternateurs :
 - Les **alternateurs de bicyclette** (figure 16.18) ou (voir figure 14p 109 (CA))
 - Les **alternateurs industriels** (figure 16.20) ou (voir figure 15p110 (CA))

6.3. Exemples d'alternateurs

Les alternateurs de bicyclettes

La figure 16.20 ci-contre représente le schéma de principe d'un alternateur de bicyclette.

Il est constitué par une bobine fixe proche d'un aimant mobile.



Figure 16.20

Les alternateurs industriels

La figure 16.21 ci-contre représente le schéma de principe d'un exemple d'alternateur industriel.

Dans ce type d'alternateur, les aimants sont remplacés par des électroaimants. Ces derniers, solidaires du rotor, présentent des pôles Sud et Nord alternés.

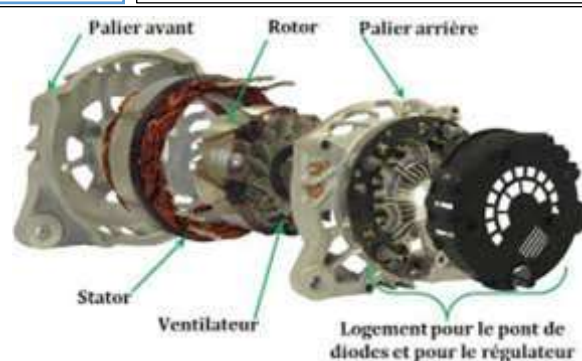
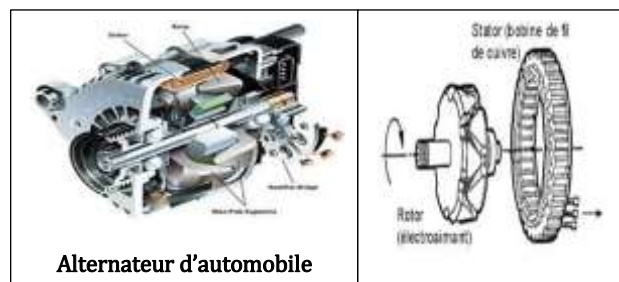


Figure 16.21

Comme autres alternateurs, on a :

- Les alternateurs d'une automobile ;
- Le groupe électrogène
- Les centrales hydroélectriques
- Les centrales solaires à turbine
- Les éoliennes
- Les centrales géothermiques, ou à biomasse.





6.4. Les sources de courant alternatif au Cameroun

On peut citer :

- Les **centrales hydroélectriques** : elles utilisent comme énergie primaire, l' E_p de l'eau.
Exemple : les centrales d'Edéa, Song Loulou, Lagdo, Lompangar, etc.
- Les **centrales thermiques** d'Oyom-Abang à Yaoundé, de Logbaba à Douala, de Bertoua. La centrale à fuel lourd de Limbé. Des groupes électrogènes.

En résumé, les principaux modes de production d'énergie électrique existants au Cameroun sont :

- Les centrales hydroélectriques
- Les centrales thermiques
- Les panneaux solaires pour installations isolées

Exemple

Une bobine de résistance $R = 10 \Omega$ a pour inductance magnétique $L = 0,5 \text{ H}$.

- Déterminer le flux magnétique de cette bobine, lorsque en un temps t quelconque, elle est parcourue par un courant d'intensité $0,87 \text{ A}$.
- Déterminer la valeur de la f.é.m. induite $\mathcal{E}_{\max}$ si le courant dans la bobine est de la forme $i(t) = 0,2 \sin(100\pi t) \text{ (A)}$.

Solution

Une bobine de résistance $R = 10 \Omega$ a pour inductance magnétique $L = 0,5 \text{ H}$. on donne : $I = 0,87 \text{ A}$.

- Déterminons le flux magnétique ϕ de cette bobine.

Par définition,

$$\phi = LI$$

$$\text{AN : } \phi = 0,435 \text{ Wb.}$$

- Déterminons la valeur de la f.é.m. induite $\mathcal{E}_{\max}$ si $i(t) = 0,2 \sin(100\pi t) \text{ (A)}$

On sait par définition que,

$$\begin{cases} e = -\frac{d\phi}{dt} \\ \phi(t) = Li(t) \end{cases}$$

$$\Rightarrow e = e_{\max} \cos(100\pi t) = -62,8 \cos(100\pi t)$$

On en déduit alors que $\mathcal{E}_{\max} = 62,8 \text{ V}$.

7. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Auto-inductance	Self-inductance
Bobine	Bobbin, coil
Bobine d'induction	Induction coil
Alternateur	Alternator

Sentence

The induction coil is the coil that accumulates energy in electrical circuits.

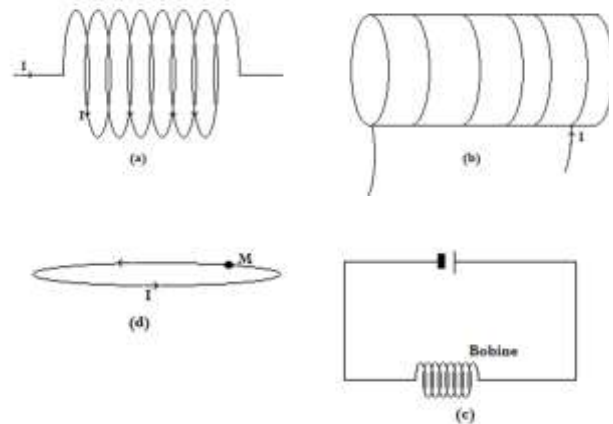
- L'inducteur fait varier le flux à travers le circuit induit où apparaît une f.é.m. induite.
- On produit un courant alternatif en faisant tourner un aimant (ou une bobine parcourue par un courant continu) au voisinage d'une bobine.
- La grandeur $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ est appelée **coefficient de perméabilité magnétique dans le vide**.

**EXERCICES DE LA LEÇON 16 : PRODUCTION DU COURANT ALTERNATIF****PARTIE A : ÉVALUATION DES RESSOURCES****EXERCICE 1 : ÉVALUATION DES AVOIRS**

- Définir : champ magnétique ; ligne de champ ; spectre magnétique ; flux magnétique ; induction électromagnétique ; auto-induction ; inductance d'une bobine ; inducteur ; alternateur.
- Avec quel appareil mesure-t-on l'intensité du champ magnétique ? Quel est son unité ?
- Énumérer les différentes parties d'un alternateur.
- Énoncer :
 - La loi de Lenz
 - La loi de Faraday
 - La règle de l'observateur d'Ampère.
 - La règle du tire-bouchon.
 - La règle de la main droite.
- Donner le principe de fonctionnement d'un alternateur.
- Lister quatre sources de production du courant alternatif au Cameroun.
- Recopier et compléter les phrases suivantes :
 - Le.....est toute région de l'espace dans laquelle un aimant ou un objet ferromagnétique est soumis à des forces magnétiques.
 - Le vecteur champ magnétique $\vec{B}$ est.....à la ligne de champ en chacun de ses points et est.....dans le même sens que celle-ci.
 - L'unité du flux magnétique dans le système international d'unité est le.....noté.....
 - L'induction électromagnétique est un phénomène qui se manifeste par l'apparition d'une.....aux bornes d'un circuit soumis à.....de flux magnétique.
 - L'.....est le phénomène d'apparition d'une force électromagnétique induite dans un circuit du fait de la variation de son flux propre.
 - L'inductance d'un circuit est le.....de son.....à l'.....du courant qui le traverse. Son unité est le.....noté.....
 - Un alternateur permet de.....une énergie mécanique en une.....
 - Les parties, fixe et tournante, d'un alternateur sont appelées respectivement le.....et le.....
- Répondre par vrai ou faux en corrigeant les affirmations fausses
 - Le flux magnétique est une grandeur algébrique.
 - Un courant est dit alternatif, si l'intensité du courant est une fonction du temps.
 - Le circuit dans lequel s'établit un courant induit est appelé inducteur.
 - Toute variation du flux à travers un circuit crée un courant induit.

8.5. Tout conducteur parcouru par un courant électrique, crée à son voisinage, un champ magnétique.

- Décrire une expérience qui met en évidence les lignes de champ créées par :
 - Un barreau aimanté ;
 - Un conducteur parcouru par un courant.
- Décrire un dispositif permettant d'obtenir un champ magnétique uniforme.
- Le champ magnétique créé au centre d'un solénoïde a pour valeur $B = 20 \text{ mT}$. Représenter le solénoïde, choisir un sens du courant et dessiner le vecteur champ magnétique.
- Sur les figures ci-dessous, représenter le vecteur champ magnétique en tenant compte du déplacement du courant électrique I .



- La valeur du champ magnétique créé par l'aimant au point M est $7.2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$.



On place alors l'aimant horizontalement et perpendiculairement au plan du méridien magnétique. Quelle est la valeur du champ magnétique en un point M de ce plan ?

EXERCICE 2 : ÉVALUATION DES SAVOIR-FAIRE

- Une bobine plate comportant 600 spires de rayon moyen $R = 5 \text{ cm}$, est parcourue par un courant d'intensité $I = 2,5 \text{ A}$.
 - Faire un schéma en y représentant le sens du courant, et le vecteur champ magnétique créé par le courant au centre de la bobine.
 - Calculer l'intensité du champ magnétique.
- Le flux magnétique $\phi(t)$ d'un champ magnétique à travers un circuit admet une expression de la forme : $\phi(t) = 4\sin(31,4t)$ en webers.
 - Énoncer la loi de Lenz.



15.2. Calculer la force électromotrice induite E (f.é.m. induite maximale).

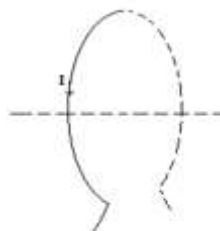
16. On considère une bobine assimilable à un solénoïde théorique ayant les caractéristiques suivantes :

- Rayon moyen de spires : $R = 10 \text{ cm}$;
- Nombre total de spires : $N = 500$ spires ;
- Longueur de la bobine : $l = 1,00 \text{ m}$.

16.1. Donner l'expression puis calculer l'inductance de la bobine sachant qu'elle est fonction des caractéristiques du solénoïde en fonction de N , μ_0 , S (surface du solénoïde) et de l . Prendre $\pi^2 = 10$.

16.2. L'intensité du courant qui circule dans la bobine est caractérisée successivement par les valeurs suivantes exprimées en ampères : $I_1 = 2 \text{ A}$; $I_2 = 5t + 2$; $I_3 = 2(2)^{1/2} \sin(100\pi t)$. Calculer la f.é.m. d'auto-induction produite dans la bobine dans chacun des trois cas ci-dessus.

17. Une spire circulaire de rayon $R = 5 \text{ cm}$ est parcourue par un courant d'intensité $I = 2,5 \text{ A}$. Déterminer les caractéristiques du champ magnétique créé au centre de cette spire. Identifier les faces sud et nord de la spire.



18. Une bobine de résistance $R = 10 \Omega$ a pour inductance magnétique $L = 0,5 \text{ H}$.

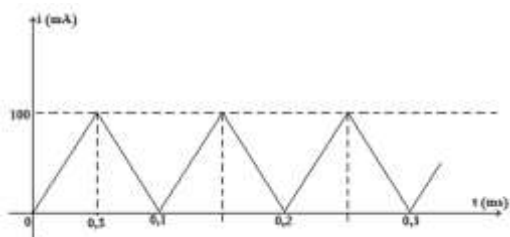
18.1. Déterminer le flux magnétique de cette bobine, lorsque en un temps t quelconque, elle est parcourue par un courant d'intensité $0,87 \text{ A}$.

18.2. En déduire la valeur numérique de la force électromotrice induite e , en 2 s .

PARTIE B : ÉVALUATION DES COMPÉTENCES

Situation 1 : Exploitation des données graphiques 1

Un solénoïde de 500 spires de rayon moyen $1,25 \text{ cm}$, long de 25 cm , est parcouru par un courant d'intensité i , variant en fonction du temps comme l'indique la figure ci-dessous :



1. Comment varient les caractéristiques du vecteur champ magnétique $\vec{B}$ en fonction du temps (direction, sens et valeur) ?

2. Donner l'expression du flux à travers le solénoïde. Tracer la courbe représentant les variations du flux $\varphi(t)$ en fonction du temps.

3. Calculer la f.é.m. moyenne induite :

- (a) Dans le domaine $0 < t < 0,05 \text{ (s)}$
- (b) Dans le domaine $0,05 < t < 0,1 \text{ (s)}$.

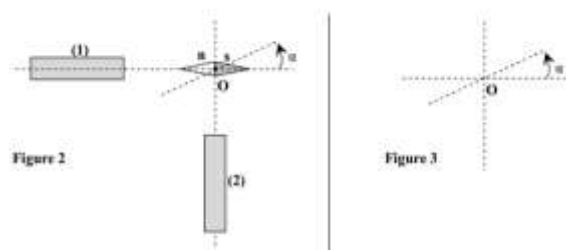
Situation 2 : Mise en évidence

Décrire, en s'aidant d'un schéma, la mise en évidence :

- Du phénomène d'auto-induction
- L'expérience d'Oersted.

Situation 3 : Champ magnétique

Une aiguille dont le centre O est placé sur l'axe de l'aimant 1, s'aligne sur cet axe suivant le vecteur $\vec{B}_1$ de valeur $5,0 \text{ mT}$. On place l'aimant 2 comme l'indique la figure 2 ci-dessous. L'aiguille tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre d'un angle $\alpha = 20^\circ$.



(a) Compléter la figure 3, en traçant le champ magnétique $\vec{B}_1$, le champ magnétique $\vec{B}_2$ créé en O par l'aimant 2 et le champ magnétique résultant $\vec{B}$ sans tenir compte de l'échelle.

(b) Déterminer les caractéristiques de $\vec{B}_2$ et celles de $\vec{B}$

Situation 4 : Solénoïde

On enroule sur un long cylindre de faible diamètre toujours dans le même sens, un fil conducteur isolé de manière à obtenir trois couches de spires jointives. Calculer l'intensité du champ magnétique $\vec{B}$ à l'intérieur de cette longue bobine quand on y fait passer un courant de 8 A . (Le diamètre du fil isolé est $D = 1,2 \text{ mm}$). On admet que le système ainsi constitué est un solénoïde.

Situation 5 : Solénoïde et champ magnétique

Proposer un montage permettant de faire varier l'intensité du courant dans un solénoïde. Quelles en sont les conséquences pour un champ magnétique créé à l'intérieur du solénoïde ?

Situation 6 : English expression

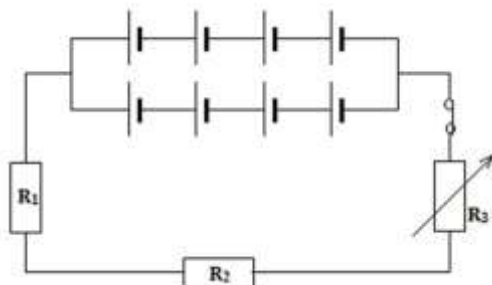
Traduire en anglais : « Le courant induit à travers un circuit est dû à la variation du flux ».



EXERCICES DE SYNTHÈSE DU MODULE 4

Exercice 1 : Montage mixte

On a constitué un circuit de la manière suivante :



Chaque pile a pour f.é.m. $E = 1,5 \text{ V}$, et pour résistance interne $r = 1 \Omega$.

1. Rechercher le générateur équivalent à cette association de piles. Tracer la caractéristique de l'association.
2. R_1 et R_2 sont des conducteurs ohmiques tels que $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 2 \Omega$. R_3 est un rhéostat dont la résistance peut varier de 0 à 23 Ω . Indiquer le domaine d'existence de l'intensité du courant pour les deux valeurs extrêmes de la résistance du rhéostat. Peut-on utiliser tout ce domaine si l'intensité maximale pour R_2 est $i_2 = 200 \text{ mA}$. Préciser alors l'intervalle d'utilisation du rhéostat.

Exercice 2 : Les lampes

Deux lampes L_1 et L_2 portent les inscriptions suivantes : $P_1 = 120 \text{ W}$, $P_2 = 75 \text{ W}$; $U = 110 \text{ V}$.

On place en série, la tension aux bornes étant de 220 V.

- (a) Fonctionnent-elles normalement ?
- (b) Comment faudrait-il modifier l'installation, la tension étant maintenue à 200 V, pour obtenir un fonctionnement normal ?

Exercice 3 : Distribution par câble + solénoïde

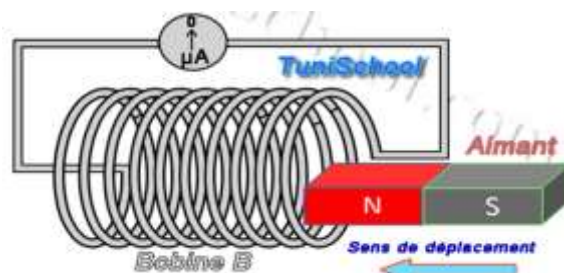
Un câble électrique d'épaisseur 0,11 mm, de largeur 0,21 mm et de résistivité $1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$, est utilisé pour fabriquer un résistor (R) de résistance R .

1. On suppose le câble de forme cylindrique et homogène. Déterminer la valeur de R si la longueur du fil à utiliser est de 18,77 m.
2. Le résistor (R) précédent est utilisé dans un circuit comprenant en série une lampe à incandescence (3V ; 75W), un générateur (21V ; 3 Ω). L'ensemble de ces éléments est monté en série et commandé par un interrupteur (k).
 - 2.1. Réaliser une figure de la situation.
 - 2.2. Quel rôle vient jouer le résistor dans ce circuit ?
 - 2.3. Que représente (3V ; 75W) pour la lampe ?
 - 2.4. Déterminer l'intensité du courant I qui traverse le circuit lorsque celui-ci est fermé.

- 2.5. La lampe est remplacée par une bobine d'inductance $L = 0,12 \text{ H}$.

- 2.5.1. Réaliser une figure de la situation.
- 2.5.2. Calculer l'intensité du courant qui traverse la bobine lorsque le circuit est fermé. On rappelle que la tension aux bornes d'une bobine traversée par un courant I est donnée par la relation : $U_L = LI$.
3. Quelle serait la valeur du courant I , si la bobine précédente est remplacée par un solénoïde de longueur 20 cm, et de nombre de spires $N = 1500$ et de surface totale $S = 1 \text{ m}^2$, dans les cas suivants :
 - (a) Les spires sont non jointives ?
 - (b) Les spires sont jointives dont le diamètre du fil d'enroulement est $d = 1,3 \text{ mm}$?
 - (c) Les spires sont jointives et l'épaisseur 1mm de l'isolant de diamètre de section 1,3 mm ?

Exercice 4 : Inducteur - induit



À proximité d'une bobine qui est fermée sur un microampèremètre, on place un aimant droit (voir figure ci-dessus).

1. On approche le pôle nord de l'aimant de l'une des faces de la bobine B.
 - 1.1. Représenter un champ magnétique $\vec{B}_A$ créé par l'aimant dans la bobine B.
 - 1.2. Énoncer la loi de Lenz. Représenter le champ magnétique $\vec{B}_i$ induit dans la bobine B. En déduire le sens du courant induit.
 - 1.3. Préciser l'inducteur et l'induit.
2. On éloigne la bobine B de l'aimant :
 - 2.1. Le sens du champ magnétique $\vec{B}_A$ varie-t-il ?
 - 2.2. Représenter le champ magnétique induit $\vec{B}_i$ créé dans la bobine.
 - 2.3. Préciser le sens du courant induit dans B.

Exercice 5 : Bobine réelle

Une bobine réelle, dont la résistance et l'inductance sont respectivement R et L , est alimentée à partir de l'instant $t = 0$ par un générateur de courant qui débite une intensité $i(t) = kt$.

- (a) À partir de cette égalité, déterminer l'unité de k .
- (b) Calculer la tension $u(t)$ aux bornes de la bobine réelle.



- (c) Quelle est la tension $u(t)$ au temps $t = 1s$.
Application numérique : $k = 0.5 \text{ SI}$; $R = 20 \Omega$; $L = 2 \text{ H}$.

Exercice 6 : Générateur – Récepteur

- Pour construire un générateur de f.é.m. $E = 45 \text{ V}$ et de résistance interne $r = 0,1 \Omega$, on dispose d'éléments de piles de f.é.m. $E_1 = 1,5 \text{ V}$ et de résistance interne $r_1 = 0,02 \Omega$.
 - Comment doit-on disposer ces éléments de piles ?
 - Combien de piles doit-on utiliser en tout ?
- On dispose en série le générateur précédent, de caractéristiques E et r ; un rhéostat de résistance $R = 12 \Omega$; un moteur de f.c.é.m. E' et de résistance interne r' ; un ampèremètre de résistance $g = 2 \Omega$. Le moteur étant bloqué, l'ampèremètre indique 3 A . Lorsque le moteur tourne, l'ampèremètre indique 2 A .
 - Faire le schéma du circuit.
 - Calculer E' et r' .
- L'ampèremètre du circuit précédent est shunté au $1/10$. Calculer, en envisageant le cas où le moteur tourne et le cas où il est bloqué :
 - La résistance s du shunt.
 - L'intensité du courant qui passe dans l'ampèremètre.
- Dans le circuit précédent, on remplace l'ampèremètre shunté par un électrolyseur au nitrate d'argent avec anode en argent. Sachant que la résistance de l'électrolyseur est $r' = 2 \Omega$ et que le moteur tourne, calculer :
 - L'intensité du courant dans le circuit.
 - La masse d'argent déposée à la cathode en 1 heure. $M(\text{Ag}) = 108 \text{ g.mol}^{-1}$; valence de l'argent = 1.

Rappels

On appelle **shunt** d'un ampèremètre, le résistor de très petite résistance monté en parallèle aux bornes de l'ampèremètre pour que celui-ci ne soit traversé que par de petites intensités de courant. Le shunt est traversé cependant par la plus grande partie du courant principal. : $I_a = I/n$ où I_a est le courant qui traverse l'ampèremètre et n le multiplicateur de shunt.

Le nombre de moles est donné par : $n = Q / x \times F$ où Q est la quantité d'électricité, x le nombre d'électrons échangés et $F = 96500 \text{ C.mol}^{-1}$.

Exercice 7 : Puissance d'une bobine.

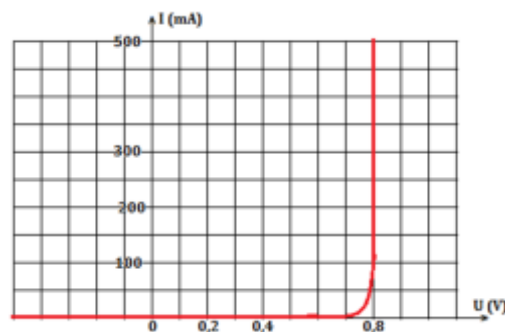
Une bobine d'inductance L est parcourue par un courant continu d'intensité I . L'énergie magnétique emmagasinée est restituée en une durée Δt .

Quelle est la puissance P dégagée ?
Application numérique : $L = 1 \text{ H}$; $I = 10 \text{ A}$; $\Delta t = 1 \text{ ms}$.

Exercice 8 : Exploitation des caractéristiques de dipôles

Pour tracer en toute sécurité la caractéristique directe tension-courant d'une diode, le montage ci-dessous est proposé.

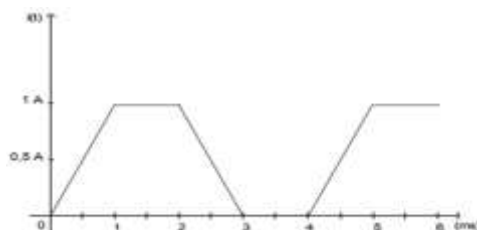
R_1 est une résistance fixe, R_2 est une résistance variable entre 0 et $1 \text{ k}\Omega$. Le générateur G ($1,5 \text{ V}$; $0,5 \Omega$) est une pile. La diode étudiée a pour caractéristique cette tracée ci-dessous.



- Pourquoi est-il indispensable de prévoir la résistance R_1 ? Quelle valeur faut-il lui donner si on veut limiter le courant à 300 mA ?
- Préciser le domaine de la caractéristique de la diode que l'on pourra explorer avec ce montage.

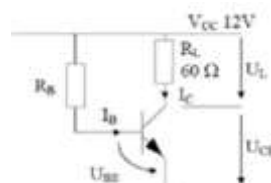
Exercice 9 : Énergie d'une bobine

- Une bobine d'inductance égale à $0,80 \text{ H}$, est traversée par un courant d'intensité constante $I = 1,5 \text{ A}$.
Calculer l'énergie emmagasinée sous forme magnétique.
- Un courant d'intensité $i(t)$, défini par le graphe de la figure ci-dessous, circule dans une bobine d'inductance $L = 10 \text{ mH}$ et de résistance R négligeable ($R = 0 \Omega$). Tracer le graphe de la tension $u(t)$ mesurée aux bornes de la bobine.



Exercice 10 : Transistor

On considère le montage suivant avec un transistor NPN de gain en courant statique $\beta = 100$ et la tension entre la base et l'émetteur est de $0,7 \text{ V}$.



- On désire avoir un courant de 100 mA dans la charge R_L , quelle valeur de résistance R_B faut-il choisir ?
- Si on fait varier R_B alors I_B varie et donc I_C varie aussi. Quelle est la valeur maximale qu'on peut obtenir pour I_C (transistor saturé) ?
- Quelle est la valeur minimale de R_B pour saturer le transistor ?
- Déterminer le point de polarisation de ce transistor.



ÉLÉMENTS D'HISTOIRE DE L'ÉLECTRICITÉ

1600: Traité de magnétisme et d'électrostatique découvert par Thalès, Pélerin de Maricourt, puis par Alexander Neckam en 1269 (Gilbert)

1729: Découverte de l'électrisation par influence (électrostatique) et de la conduction de l'électricité (Gray)

1733: Découverte de deux types d'électrisation (positive et négative) (Du Fay)

1734: Invention du dynamomètre (Le Roy)

1745: Premier condensateur électrique, la bouteille de Leyde (Kleist - Musschenbroek)

1747: Invention l'électroscope (Nollet)

1752: Invention du paratonnerre (Franklin)

1785: Loi des forces électrostatiques (Coulomb)

1786: Observation de l'action de l'électricité sur la contraction musculaire (Galvani)

1800: Invention de la pile électrique (Volta)

1803: Elaboration de la thèse atomique (Dalton)

1811: Découverte de l'arc électrique (Davy)

1820: Détermination de la valeur du champ magnétique (Biot et Savart). Découverte des effets magnétiques du courant électrique (Oersted)

1821: Emission de l'hypothèse que les molécules des corps sont l'objets de courants de particules que l'aimantation peut diriger, se montrant ainsi précurseur de la théorie électronique de la matière. (Ampère)

1822: Invention d'un dispositif qui montre l'action d'un champ magnétique sur un courant électrique (Barlow)

1823: Construction du premier électroaimant (Sturgeon)

1827: Publication de son mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques qui crée le vocabulaire de l'électricité (Ampère). Invention de la pile rechargeable (Becquerel). Etablissement de la loi fondamentale du courant électrique et définit la résistance (Ohm)

1831: Découverte de l'induction électromagnétique (Faraday)

1832: Invention du magnétomètre (Gauss). Découverte de l'auto-induction (Henry). Réalisation de la première machine à induction (Pixii)

1833: Théorie de l'électrolyse (Faraday). Etablissement de la loi donnant le sens des courants induits (Lenz)

1834: Découverte de l'effet thermoélectrique selon lequel le courant, à travers la jonction de deux matériaux, provoque dans cette jonction, le dégagement ou l'absorption d'une quantité de chaleur qui par unité de temps, est proportionnelle au courant (Peltier)

1837: La polarisation des diélectriques et introduction de la notion des lignes de forces (Faraday) Premières démonstrations du télégraphe électrique (Morse)

1841: Découverte de l'échauffement qui se produit lors du passage d'un courant électrique dans un conducteur. (Joule) Invention du rhéostat (Poggendorff)

1845: Découverte de l'action d'un champ magnétique sur la lumière polarisée (Faraday)

1851: Invention de la bobine à induction (Ruhmkorff)

1853: Théorie des circuits oscillants (Thomson)



- 1859:** Invention de l'accumulateur électrique (Planté)
- 1861:** Principe de la dynamo (Paccinotti)
- 1865:** Théorie électromagnétique de la lumière, unifiant les phénomènes électriques et lumineux. (Maxwell) invention du principe du chemin de fer à crémaillère (Riggenbach)
- 1868:** Invention de la pile électrique utilisant comme électrolyte le chlorure d'ammonium et comme dépolarisant le bioxyde de manganèse (Leclanché)
- 1869:** Invention du collecteur qui permet la réalisation de moteurs à courant continu (Gramme)
- 1871:** Première dynamo (Gramme et Pacinotti)
- 1873:** Premier transport d'énergie électrique à Vienne (Fontaine)
- 1874:** Brevet de la télégraphie rapide (Baudot)
- 1876:** Invention du téléphone (Bell et Gray) Démonstration qu'une charge électrique mobile crée un champ magnétique, mettant en évidence l'identité des électricités statiques et dynamiques (Rowland)
- 1878:** Mise au point de la lampe à incandescence (Swan, Edison et les autres). Invention du microphone à charbon (Hugues). Etude des décharges électriques dans les gazes rares (Crookes)
- 1879:** Helmholtz montre que l'électricité a une structure "granulaire". Première locomotive électrique (Siemens)
- 1880:** Découverte de l'hystérésis magnétique. (Warburg) Découverte de la piézoélectricité (Curie) Premier paquebot transatlantique *Le Columbia* éclairé à l'électricité (Edison). Hall découvre l'effet qui porte son nom : apparition d'un champ électrique dans un conducteur ou semi-conducteur soumis à un champ magnétique.
- 1882:** Invention du galvanomètre à cadre mobile, ancêtre du voltmètre. (Arsonval avec Marcel Deprez). Démonstration du phénomène de l'hystérésis (Ewing). Mise en service du premier alternateur industriel (Ferranti) Invention du ventilateur (Wheeler)
- 1883:** Construction du premier moteur électrique à champ tournant (Nicolas Telsa et Galileo Ferraris indépendamment l'un de l'autre)
- 1884:** Invention du transformateur (Lucien Gaulard)
- 1887:** Théorie ionique à l'électrolyse (Arrhenius). Découverte de l'effet photoélectrique et confirmation de la théorie électromagnétique de Maxwell en découvrant expérimentalement des ondes électromagnétiques et en montrant qu'elles possèdent toutes les propriétés de la lumière. (Hertz)
- 1891:** L'"électron" existe enfin, c'est un corpuscule élémentaire de l'électricité, dont il avait déjà été tenté de prouver son existence dès 1874 et on tente d'en calculer la charge (Stoney)
- 1892:** Mise au point du four électrique (Moissan). Etude de l'hydrogénation catalytique (Sabatier)
- 1893:** Invention de l'oscillographe (Blondel). Mise au point la cellule photo-électrique (Elster-Geitel)
- 1895:** Invention du cinématographe (frères Lumière)
- 1896:** Premier phonographe électrique (pick-up) (Dussaud). Découverte de la modification du spectre d'émission d'un corps sous l'action d'un champ magnétique. Il avait déjà trouvé ce que l'on nommera plus tard le *spin* (Zeeman). Brevet du système de TSF (Marconi)
- 1897:** Invention de l'oscillographe cathodique (Braun)
- 1898:** Réalisation du premier enregistrement magnétique (Poulsen)
- 1899:** Réalisation de la première transmission radio sur une distance de 40 km (Marconi)
- 1901:** Invention de l'accumulateur à électrode de fer et de nickel (Jungner)
- 1902:** Invention de la magnéto, système l'allumage électrique des moteurs thermiques (Bosch)



1904: Invention de la diode (Fleming)

1905: Explication de l'effet photoélectrique et du mouvement brownien, théorie de la relativité restreinte (Einstein)

1907: Théorie du ferromagnétisme (Weiss)

1911: Mesure la charge de l'électron (Millikan)

1916: Théorie de la relativité générale (Einstein)

1918: Invention du récepteur radio moderne superhétérodyne (Armstrong) et (Lévy)

1925: Définition du spin de l'électron (Goldsmid - Uhlenbeck). Première communication radiotéléphonique intercontinentale sur ondes courtes entre Londres et Sydney (Marconi); invention du principe du transistor à effet de champ par Julius Edgar Lilienfeld

1927: Démonstration expérimentale du caractère ondulatoire des électrons (Germer - Davisson - Thomas)

1928: Explication de la formations des molécules par la mise en commun de doublets d'électrons. Ils définissent aussi les acides comme des composés capables d'accepter les doublets d'électrons (Lewis - Langmuir) Invention du rasoir électrique (Schick). Mise en évidence de la diffusion de la lumière par les molécules et les ions (Raman)

1932: Découverte du positron. (Anderson) Découverte du neutron (Chadwick)

1935: Invention du radar (Watson-Watt)

1936: Invention de la caméra électronique (Lallemand). Invention du radiotélescope (Reber)

1938: Invention du magnétron, tube à vide générateur ou amplificateur de courant à très hautes fréquences pour les radars et relais hertziens (Ponte)

1939: Invention du klystron, tube à vide amplificateur de courant à hyperfréquences (Varian)

1944: Mise en service avec l'aide de IBM du premier calculateur électromécanique Mark I (Aiken)

1948 : Invention du transistor bipolaire (Brattain, Barden, Cooper)

1956: Explication du phénomène de la supraconductivité, disparition de la résistance électrique dans les métaux à très basse température (Barden - Cooper - Schrieffer)

1957: Invention de la diode tunnel, amplificateur de très haute fréquence utilisé notamment dans les calculateurs électroniques (Leo)

Tableau extrait du document poly_electrocinetique1.doc téléchargé sur <http://bat8.inria.fr/~lang/licence/>



DOCUMENTATION

Ont été consultés pour la réalisation de ce manuel, les documents suivants :

Liens internet

- <http://www.gutenberg.org/ebooks/search/?query=relativity>
- <https://fr.wikisource.org/wiki/Cat%C3%A9gorie:Sciences>
- <http://www.litteratureaudio.com/>
- [https://dictionary.cambridge.org/dictionary/french-english/https://www.academia.edu/31613785/Exercices et probl%C3%A8mes d%C3%A9lectrotechnique Notions de base r%C3%A9seaux et machines %C3%A9lectriques](https://dictionary.cambridge.org/dictionary/french-english/https://www.academia.edu/31613785/Exercices_et_probl%C3%A8mes_d%C3%A9lectrotechnique_Notions_de_base_r%C3%A9seaux_et_machines_%C3%A9lectriques)
- <https://studylibfr.com/doc/1732105/exercices-corrig%C3%A9s---energies-potentielle-et-m%C3%A9canique>
- <https://www.touslesconcours.info/repository/Examen-physique-au-baccalaur%C3%A9at/Physique-BAC-and-E-2001.pdf/>
- <https://www.google.image/>
- <https://www.wikipedia.fr/>
- <https://www.wikibooks.fr/>

Manuels scolaires

- 📖 Draft – Mars 2019, Programmes de physique des classes de 1^{ère} CD & TI
- 📖 Mon cours de physique de 2^{nde} C, Module sur les incertitudes et mesure.
- 📖 Mon cours de physique de 2^{nde} C, leçons sur les diodes, les résistors, les transistors.
- 📖 Mon cahier de physique de Tle C, cours dispensé par M. KENE BERNARD, PLEG Physique.
- 📖 Mon cours de physique de Tle C, cours rédigé et dispensé par M. BEKONGO BERTRAND.
- 📖 Les Majors en Physique-Chimie-Technologie 4^{ème}. ISBN : 978-9956-423-77-7.
- 📖 Physique en seconde C et T de J. EBANGA, M. MOUNJOUOPOU, Les classiques africains ; édition 1987.
- 📖 Nouveau programme, Chimie Terminale CDE, édition 2007.



- 📖 Le Bord de physique en Tle CD et TI, de NOUBISSI SIMO, nouvelle édition
- 📖 Nouveau programme, Physique Terminale CDE, édition 2007, ISBN : 102-7571-0075-0
- 📖 Physique 2^{nde}, de M. L. COTTON, Professeur honoraire au Lycée Marseilleveyre, Marseille.
- 📖 Physique-Chimie 1^{ère} CD, Collection Afrédit, édition 2015.
- 📖 Physique-Chimie 1^{ère} CD, Collection Dewate, édition 2010.
- 📖 Physique 1^{ère} S, Collection BELIN, édition Belin 1998.
- 📖 Physique – Chimie 1^{ère} CD, Nouveau programme, les Classiques africains – Les classiques Camerounais, édition 2005
- 📖 Physique 2^e, de Roger KERAVEC, IPR, édition Casteilla, Juin 1986.
- 📖 Les Classiques africains, Physique – Chimie 2^{nde} C & E, édition 2004.
- 📖 Physics : The physical setting, Bernadine HLADIK Cook, edition 2010
- 📖 CIAM, 1^{ère} SM, edition 1998.
- 📖 Mon manuel en Physique 1^{ère} CDE, de BEKONGO BERTRAND, édition 2018-2019.

