

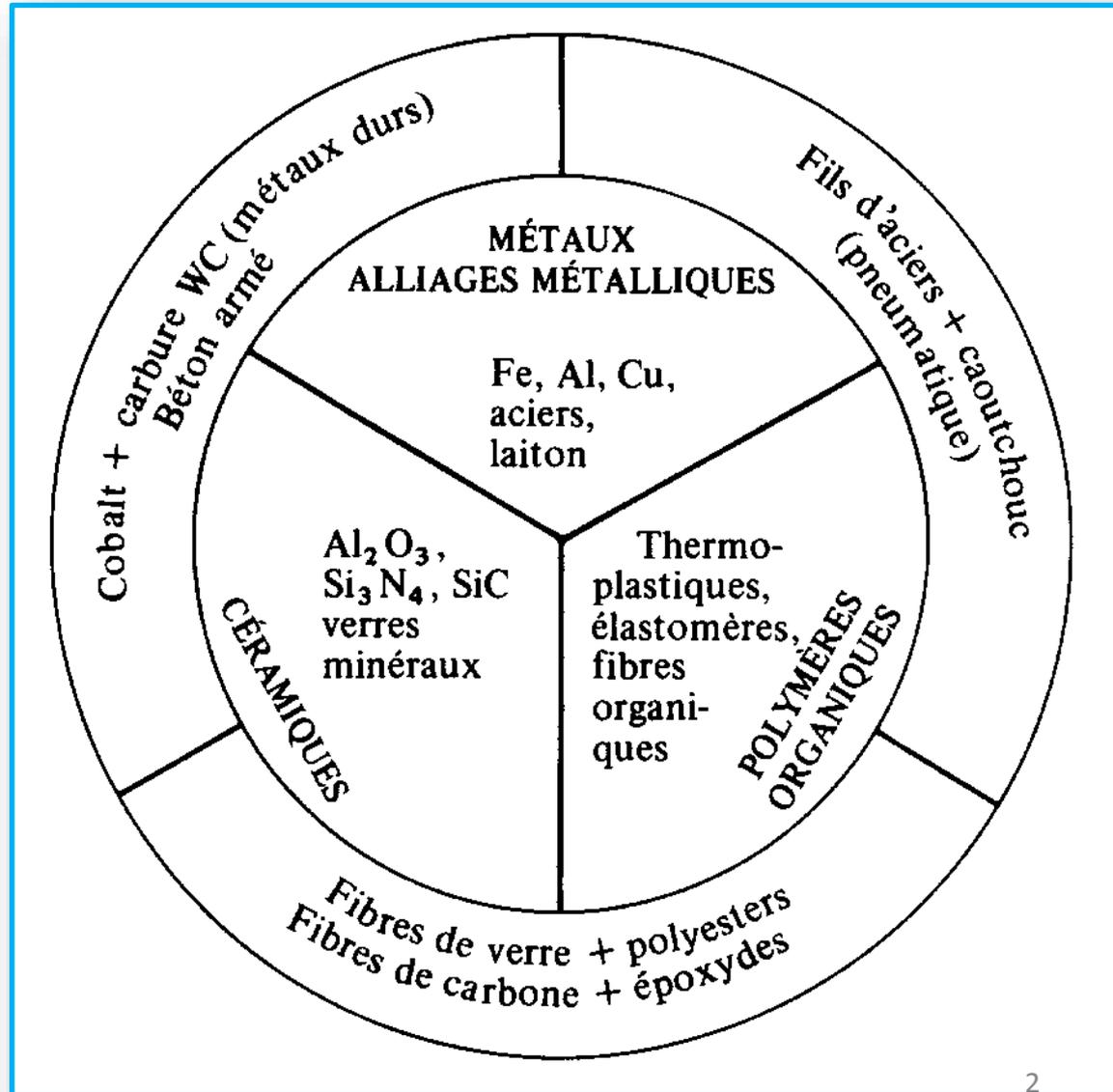
Cours de Métallurgie ENSAM-Meknès/2A



S.Ettaqi

Introduction: Classification des matériaux industriels

- ☺ LES METAUX
- ☺ LES POLYMERES
- ☺ LES CERAMIQUES
- ☺ LES COMPOSITES



LES METAUX

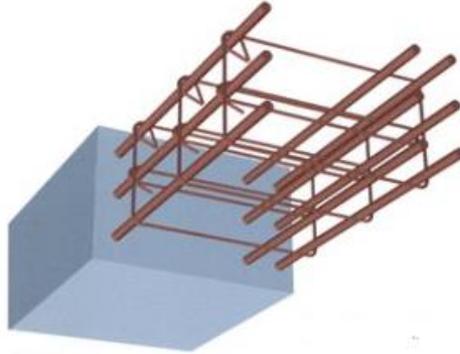
Sont situés dans la partie gauche du Tableau périodique.

- ▶ **À l'état solide, ils sont sous forme cristallisée.**
- ▶ **Ils ont un bon coefficient de réflexion de la lumière.**
- ▶ **Ils ont un des conductibilités thermiques et électrique relativement élevées.**
- ▶ **Ils peuvent se déformer plastiquement.**
- ▶ **Dilatation faible et contrôlable.**
- ▶ **Module d'élasticité élevé**

Les métaux et alliages ferreux



Les Fontes



Les Aciers

Les **Fontes** sont des alliages de *Fer* et de *Carbone* dont le pourcentage de carbone est supérieur à 2%

Les **Aciers** sont des alliages de *Fer* et de *Carbone* dont le pourcentage de carbone est inférieur à 2%.

On peut leur adjoindre d'autres éléments pour en faire des **Aciers Alliés**.

Élaboration des aciers

Processus d'élaboration :

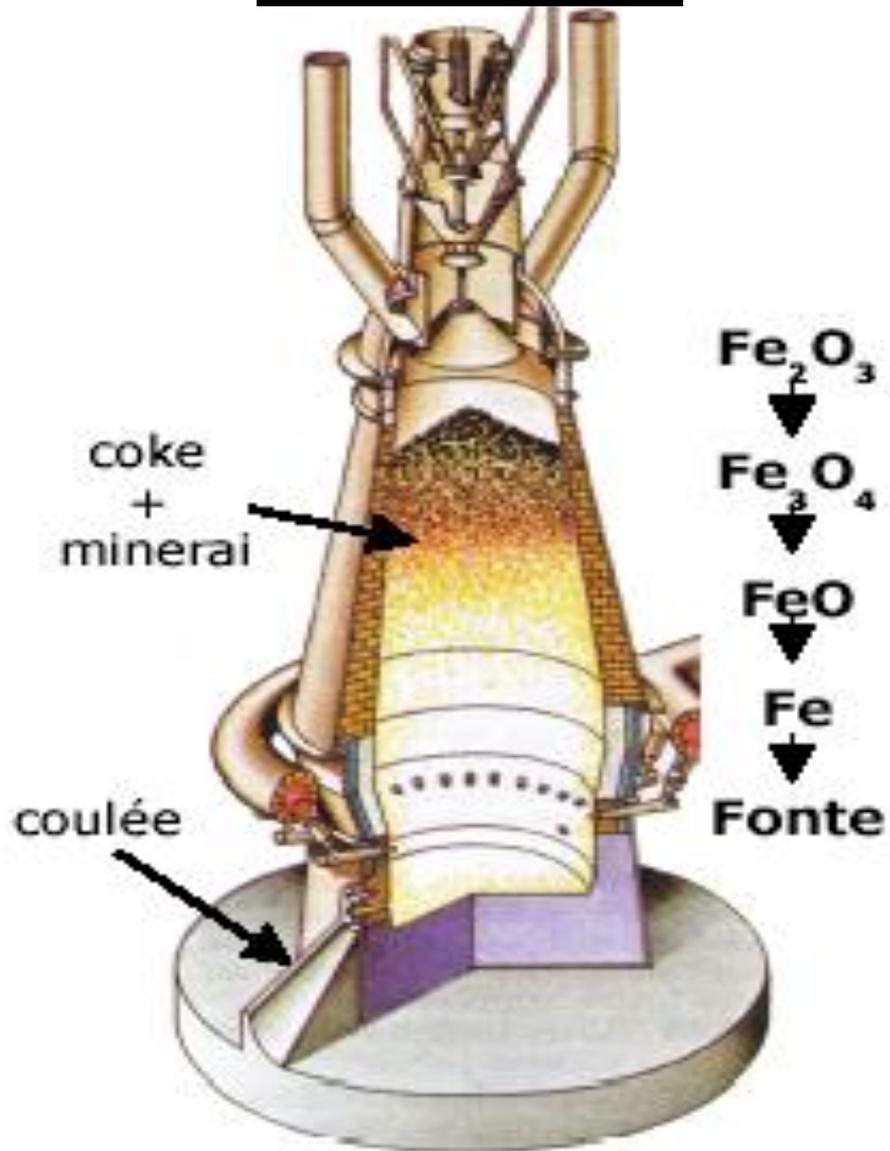
Ce métal est obtenu à partir de matières premières naturelles qui sont les minerais de fer. Ces minerais sont un mélange naturel :

d'oxydes de fer :

magnétite Fe_3O_4 , hématite Fe_2O_3 , hématite brune $2 \text{Fe}_2\text{O}_3, 3 \text{H}_2\text{O}$,
Sidérose FeCO_3 .

- ▶ Le minerai de fer contient des oxydes (**magnétite Fe_3O_4 , hématite Fe_2O_3 , hématite brune $2 \text{Fe}_2\text{O}_3, 3 \text{H}_2\text{O}$, Sidérose FeCO_3**). Il va être concassé, broyé, passé sur des cribles, ... En faisant subir des traitements thermiques au minerai obtenu, on obtient des grains de 18 à 35 mm de diamètre.
- ▶ On utilise ensuite les hauts fourneaux pour réduire les oxydes de fer. Le haut fourneau brûle du coke (charbon chauffé à 1 110 °C en l'absence d'air) pour obtenir une température minimum de 500 °C pour commencer la réduction. On obtient des fontes, mélange de fer et de carbone.
- ▶ Le carbone de la fonte est éliminé par oxygénation.
- ▶ On obtient alors le métal qui sera coulé en lingots, ou en barre.

Haut fourneau



Elaboration des aciers

La fonte du haut-fourneau est divisée suivant la destination en trois groupes :
80% Fonte d'affinage, Fonte de moulage grise, Alliage ferro-métallique.

employée pour la fabrication de l'acier

utilisés comme additions dans la production de l'acier pour améliorer sa qualité.

emploi dans la construction, spécialement pour la fabrication des pièces travaillant à la compression (gabots, poteaux); ainsi que pour les produits sanitaires (tubes, radiateurs de chauffage).

Elaboration des aciers

L'acier ($\% C < 2$) est obtenu en décarburant la fonte ($2 < \% C < 4$), et éliminant le plus possible le soufre et le phosphore tout en modifiant la teneur des autres éléments (Si, Mn).

Les procédés pratiques d'élaboration de l'acier sont :

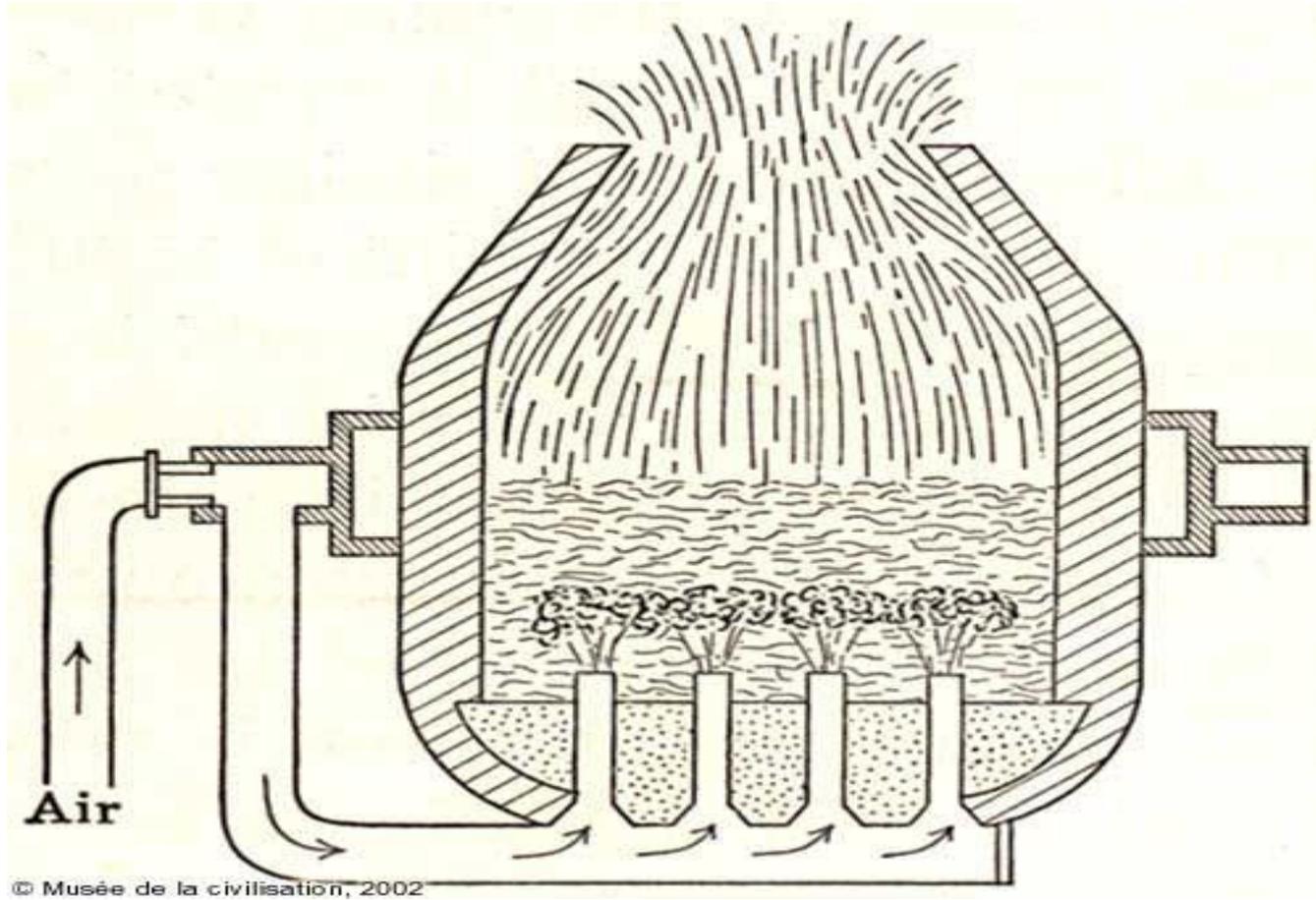
- ☺ l'affinage liquide, qui fournit la quasi-totalité de l'acier employé, le métal restant liquide à la fin de l'opération,
- ☺ l'affinage solide, qui donne un produit à l'état pâteux à la fin de

Elaboration des aciers/Affinage liquide

Affinage par l'air aux convertisseurs Bessmer et Thomas.

La fonte liquide arrivant du mélangeur est versée dans le convertisseur, à travers lequel on souffle un intense courant d'air qui brûle les impuretés de la fonte. Cette combustion dégage en même temps la chaleur nécessaire pour élever la température du bain depuis celle de la fonte en fusion (1200 °C) jusqu'à celle de l'acier (1600 °C).

Elaboration des aciers/Affinage liquide



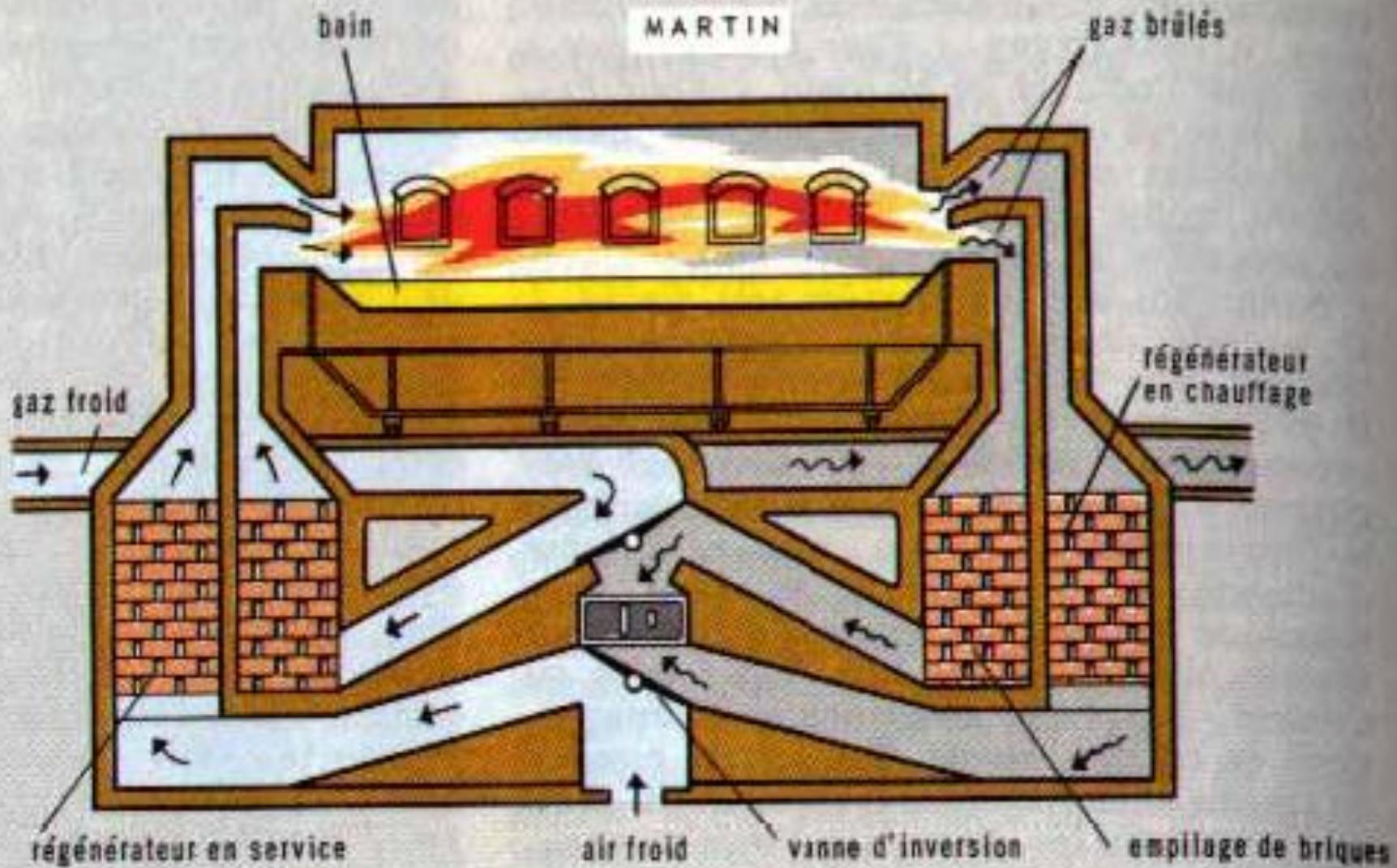
convertisseurs Bessmer et Thomas.

Elaboration des aciers/ Affinage au four Martin.

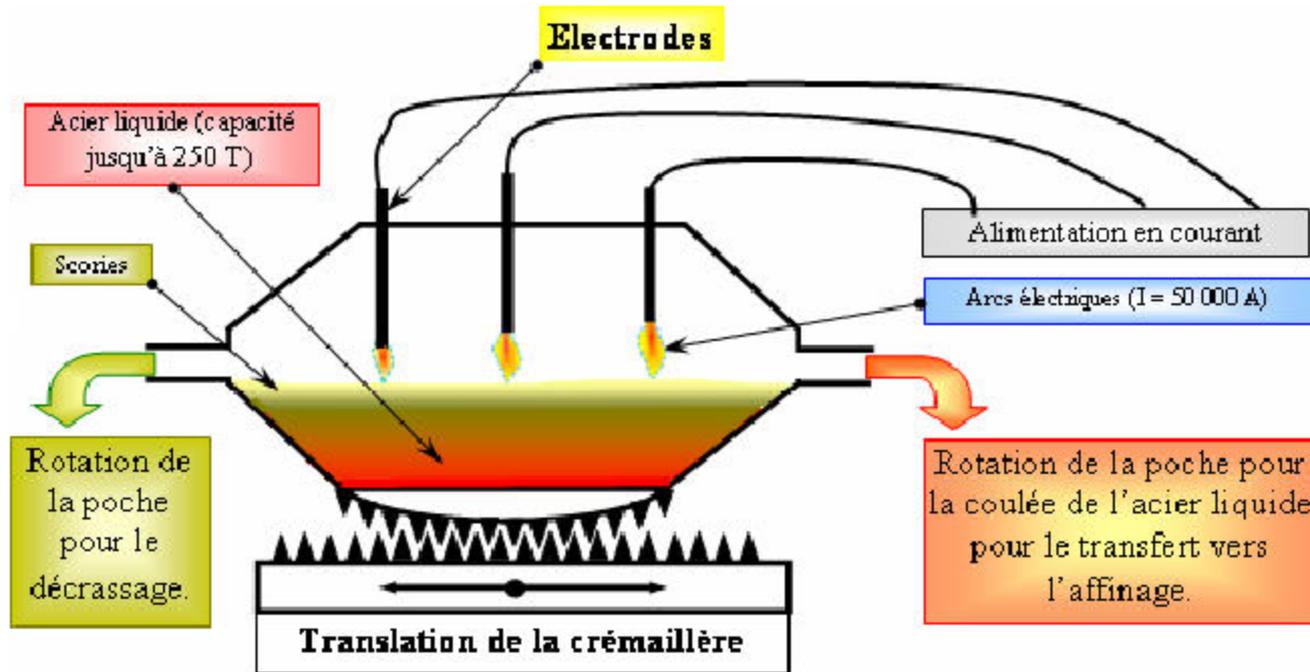
Dans le four Martin acide, l'affinage porte uniquement sur le carbone, le silicium et le magnésium; le Souffre et le phosphore restant intacts. En revanche, dans le four Martin basique, l'affinage peut aussi porter sur ces deux derniers éléments.

on utilise le gaz et parfois les déchets de fer et d'acier comme combustible . La durée de fusion est de 4 à 8 heures. Pendant ce temps, on prend systématiquement des échantillons pour analyse chimique. Quand on obtient la composition requise de l'acier, le métal est déchargé dans la poche à coulée et delà dans les lingotières.

Elaboration des Affinage au four Martin.



Elaboration des aciers/Affinage au four Electrique.

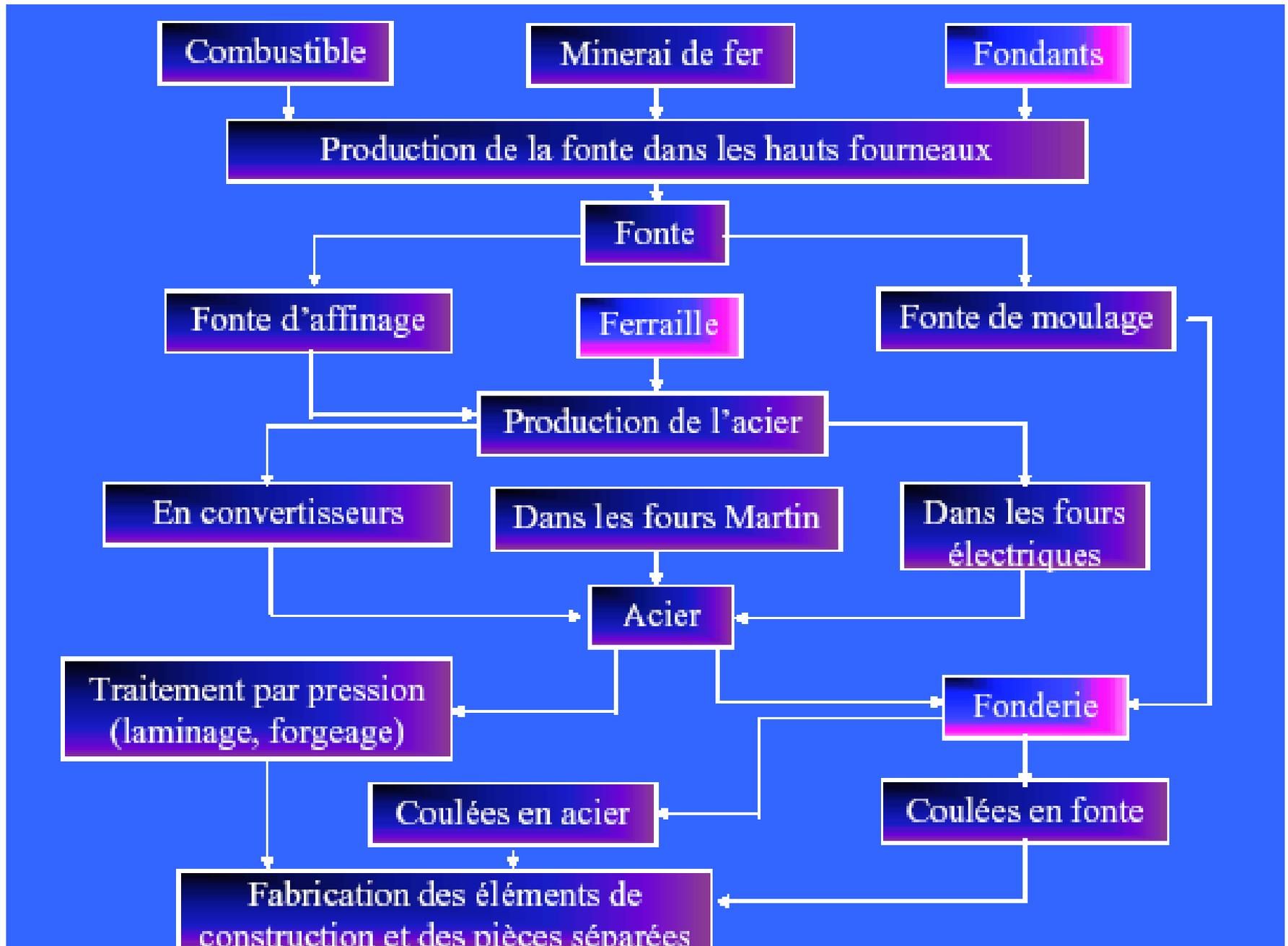


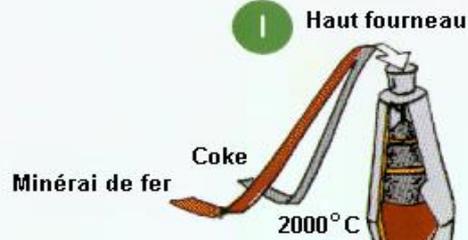
Elaboration des aciers/Affinage solide.

Capables de fournir des fers à teneur en soufre et phosphore très basse et inférieures à tout ce que l'on peut obtenir par les procédés d'affinage liquide.

Dans ce procédé, le combustible (charbon de bois) est en contact direct avec la fonte. L'affinage est réalisée par oxydation des impuretés nuisibles de la fonte, les faisant passer dans le laitier. Lorsque l'opération est terminée, on retire du four des loupes spongieuses de métal contenant de nombreuses scories.

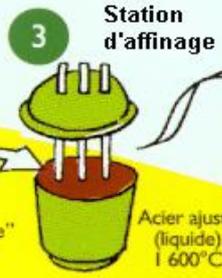
Elaboration des aciers





FILIERE FONTE OU OXYGENE

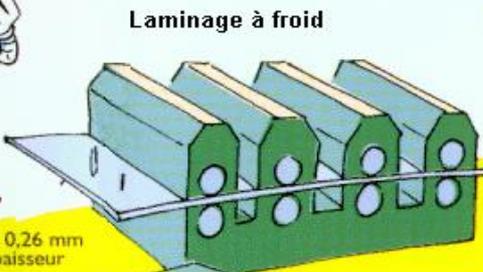
Le minéral est une roche composée d'oxydes de fer (fer + oxygène) et de divers autres minéraux (gangue). L'acier est élaboré à partir de minéral de fer et de ferrailles (filière fonte) ou de ferrailles seules (filière électrique).



Le laminage, hum... très efficace comme régime amincissant.



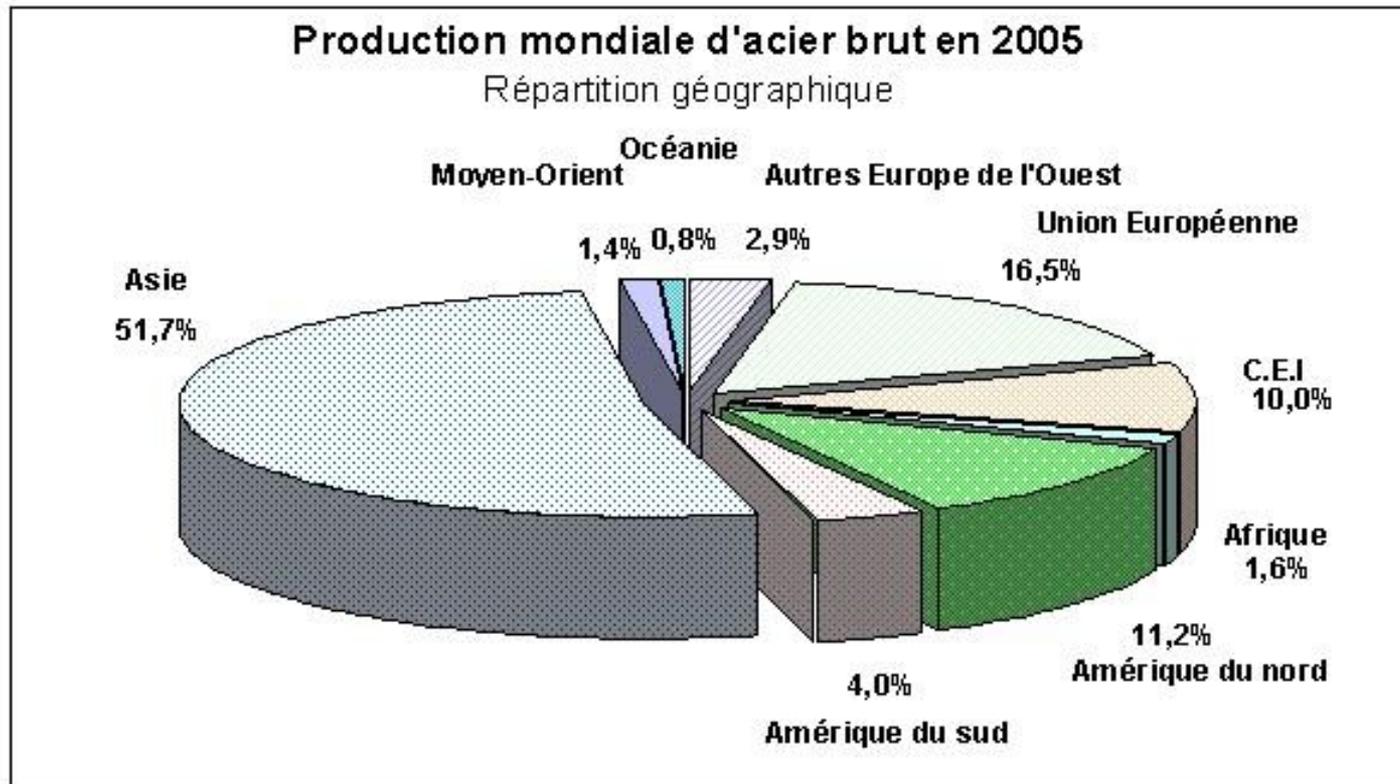
Selon l'épaisseur de l'acier, la longueur de la bande dans la bobine peut atteindre 20 Km !



Bobine : 0,20 mm d'épaisseur moyenne



Production mondiale d'acier brut en 2005



Métallurgie

Liaisons atomiques et structure cristalline

- ☉ Tous les matériaux sont formés: d'atomes et de molécules.
- ☉ Ont distingué les états: solide, liquide et gazeux.
- ☉ La classification des matériaux repose sur la structure atomique et ne considère plus que deux états principaux : **l'état désordonné** et **l'état ordonné** .

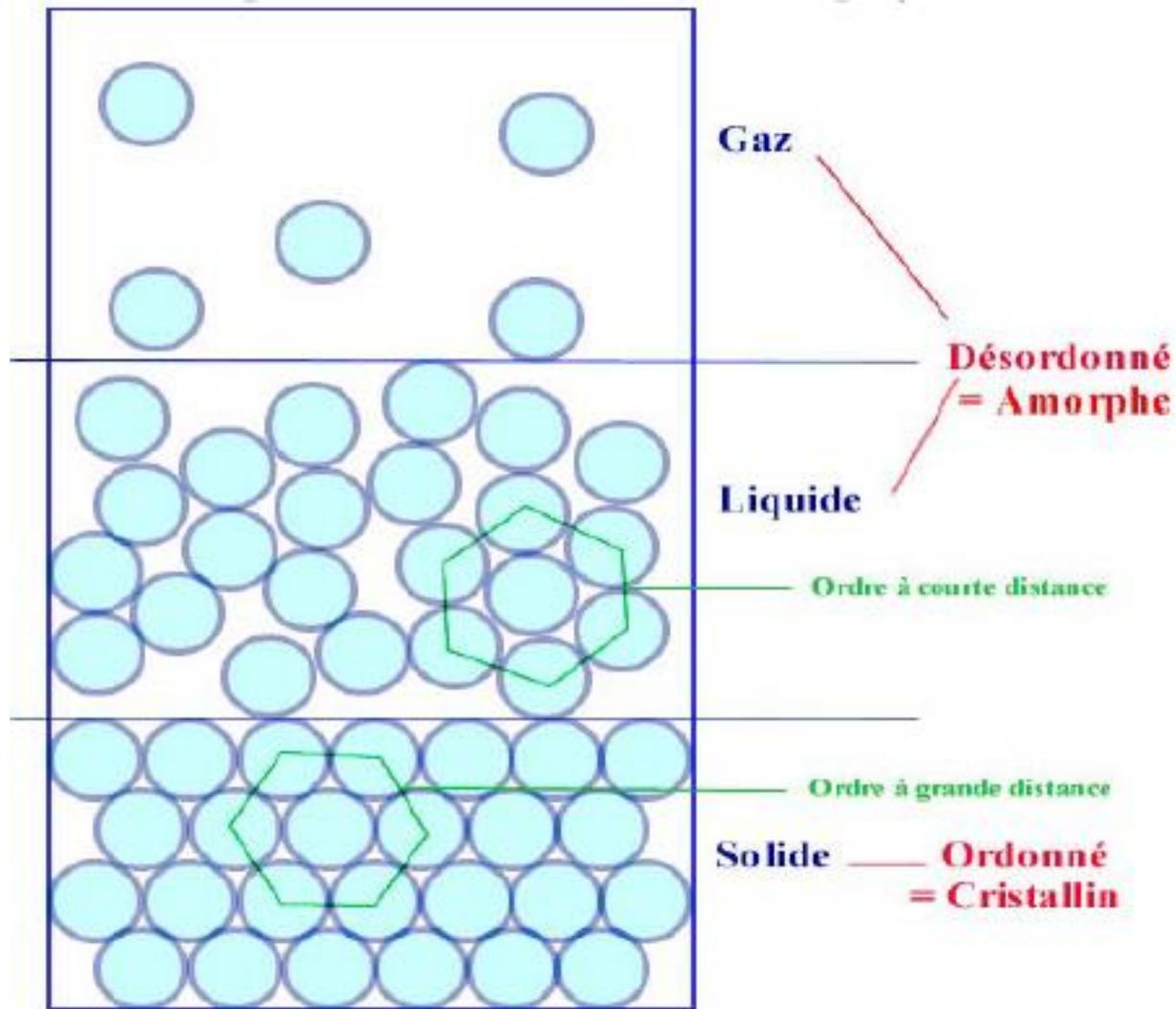
les atomes ou molécules constituant la matière sont disposés de façon essentiellement aléatoire.

EX: gaz , liquides et solides amorphes

les éléments constitutifs (atomes, ions ou molécules) sont répartis de façon régulière suivant les trois directions de l'espace.

Métallurgie

Liaisons et structure cristalline



Métallurgie

Liaisons atomique et structure cristalline

☉ Toutes les LIAISONS ont une origine commune : l'attraction électrostatique entre les charges positives du noyau atomique et les charges négatives des électrons.

IL Existe deux types de liaisons :

LIAISONS CHIMIQUES : elles donnent naissance à une nouvelle entité chimique. Cette liaison est très forte (énergie de liaison), de plusieurs électrons Volt. Ex : H (gaz) et O (gaz) donnent de l'eau H₂O (liquide).

LIAISONS PHYSIQUES : ce sont des forces mais qui se développent entre molécules. Le résultat est un « état physique » (et non une nouvelle entité chimique), conduisant à une variation des propriétés physiques. Ces forces sont faibles, quelques dixièmes d'eV.

Ex : (1) molécules d'eau à -10°C se rassemblent pour former de la glace.

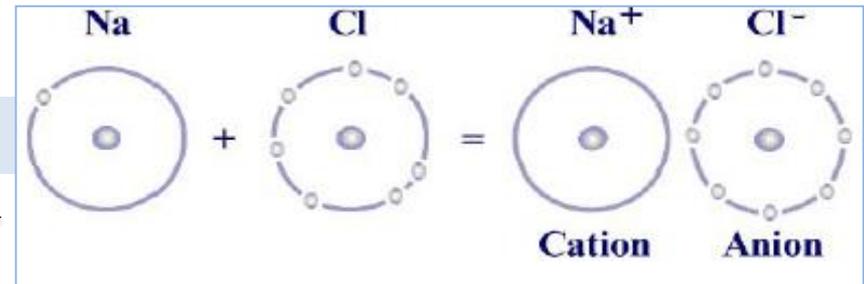
(2) à la t° ambiante (H₂O) devrait être un gaz (comme H₂S, H₂Se) or ce n'est pas le cas. Pourquoi ?

parce qu'il se développent des forces entre les molécules d'eau qui n'existent pas entre les molécules H₂S et H₂Se

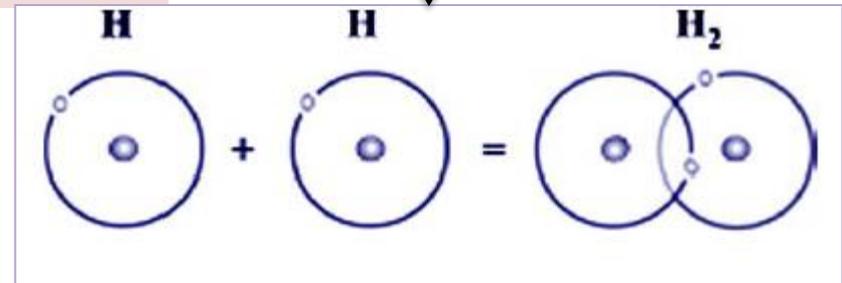
Métallurgie

Liaisons atomique et structure cristalline

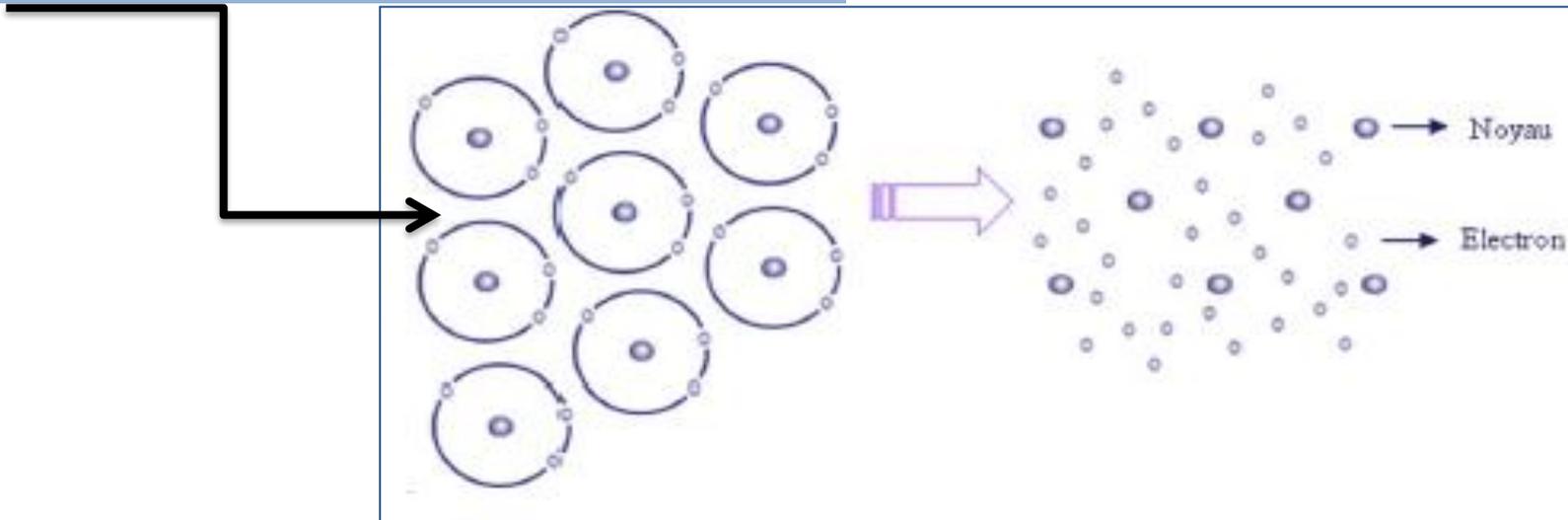
La liaison ionique = métal fort + non-métal fort



La liaison covalente = un non-métal + un non-métal



La liaison métallique
concerne des atomes possédant un faible nombre d'électrons sur la couche externe, situation rencontrée dans le cas des métaux.



Les liaisons chimiques.

Comparaison des propriétés selon la nature des liaisons.

Liaison	Exemple		Propriétés				
			T _f	E	α	ρ	D
Covalente	C	électrons partagés	e	e	f	m/e	0/f
Ionique	NaCl	électrons attirés	m/e	e	f	e	0
Métallique	Cu	électrons délocalisés	m/e	m	m	f	e
Liaisons faibles	H ₂ O	attraction dipolaire	f	f	e	e	m

Propriétés :

T_f = température de fusion
E = module d'élasticité en tension
 α = coefficient de dilatation linéaire
 ρ = résistivité électrique
D = ductilité

e = élevé
m = moyen
f = faible
0 = # nulle

Les métaux et alliages métalliques

<u>Propriétés physiques et mécaniques</u>	<ul style="list-style-type: none">•solides atomiques de grande densité•cohésion par liaisons métalliques•températures de fusion moyennes•tous cristallisés dans des systèmes simples•très bons conducteurs électriques et thermiques•rigidité moyenne à élevée•déformables plastiquement et tenaces•opaques à la lumière
<u>Propriétés chimiques</u>	<ul style="list-style-type: none">•sensibles à l'oxydation
<u>Caractéristiques économiques</u>	<ul style="list-style-type: none">•abondance et prix très variables•nombreux fabricants•recyclage possible•toxicité possible
<u>Mise en œuvre</u>	<ul style="list-style-type: none">•très nombreux procédés bien connus

Elles concernent la déformation d'un matériau soumis à une force

- La résistance
- La dureté
- La ductilité
- La rigidité
- La ténacité

- Quand un corps est soumis à l'action de forces extérieures  des contraintes internes s'établissent:
- À ces contraintes sont associées des déformations

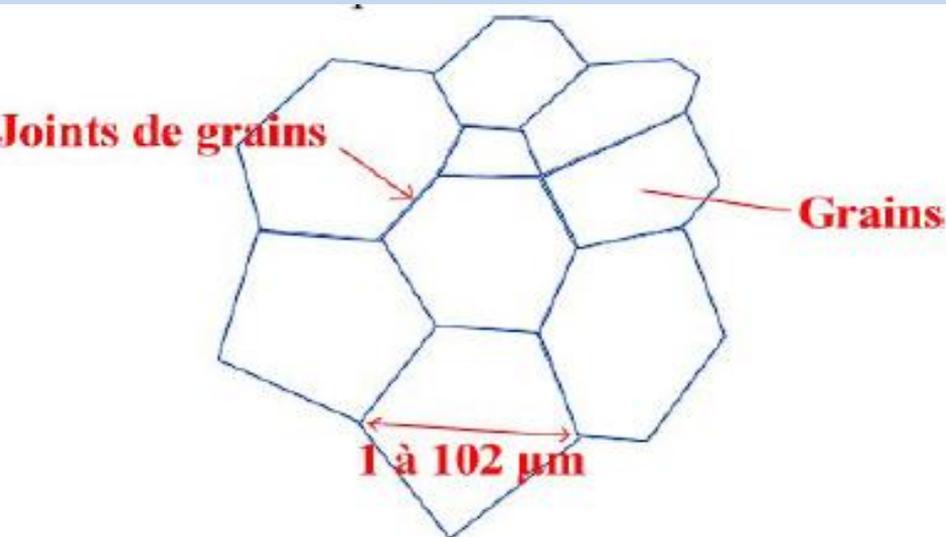
Métallurgie

Liaisons atomique et structure cristalline

Le Cristal parfait

Le cristal idéal ou parfait (le cristal réel diffère mais peu) est constitué d'une répartition régulière des atomes, des ions ou des molécules suivant les trois dimensions de l'espace et l'arrangement régulier des atomes s'étend pratiquement à l'infini.

les macro-cristaux caractérisés par leur aspect géométrique caractéristique : faces planes, arêtes vives, angles entre les faces bien déterminés



Métallurgie

Liaisons atomique et structure cristalline

Un cristal peut être décrit à l'aide:

d'une entité mathématique = **le réseau**,

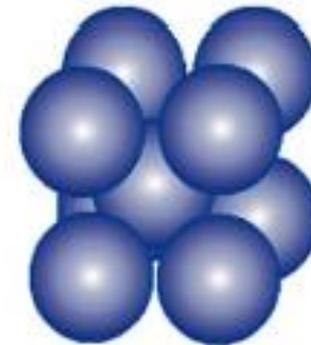
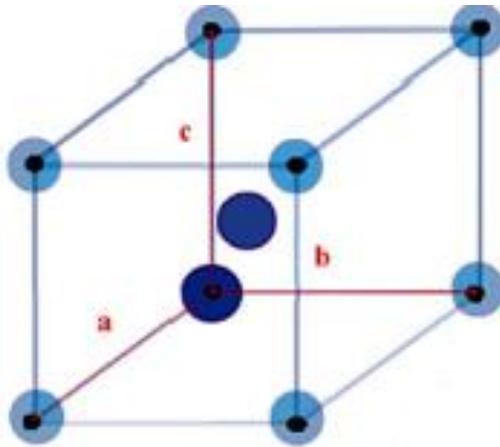
+

et d'un contenu matériel = **le motif**.

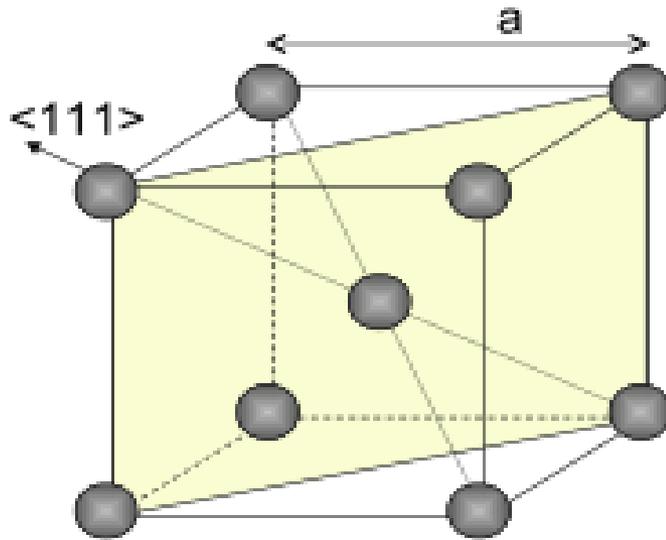
+

« L'assemblage » constitue le **cristal**.

Exemple de
métaux : fer
alpha et
chrome.

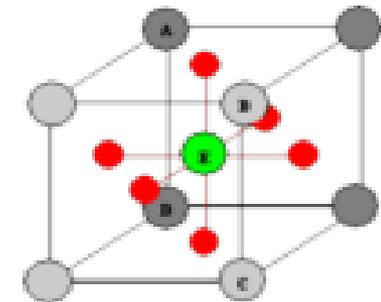
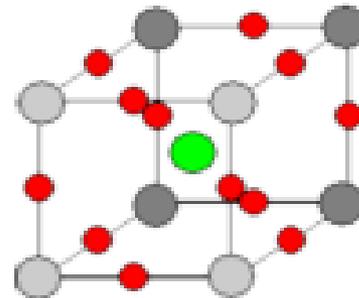


Structures cristallines



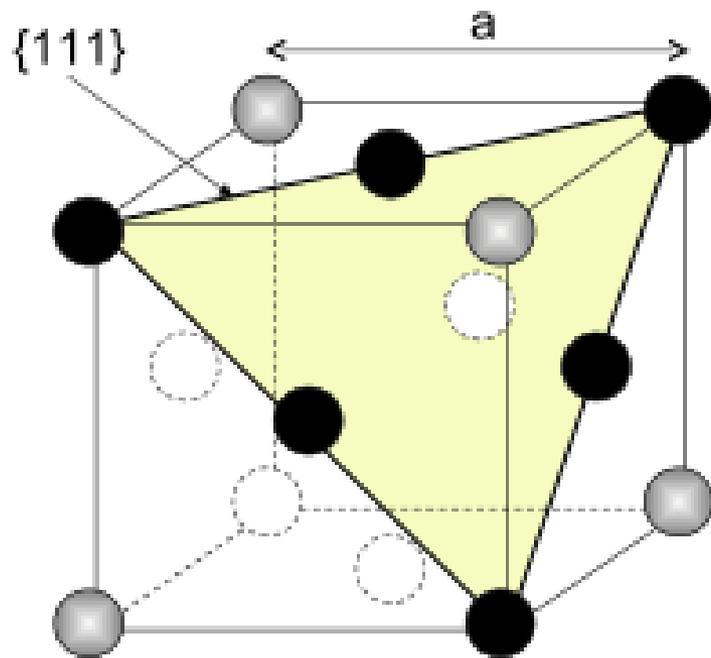
Cubique centrée

- 2 atomes par cellule
- compacité: 68%
- direction dense $\langle 111 \rangle$



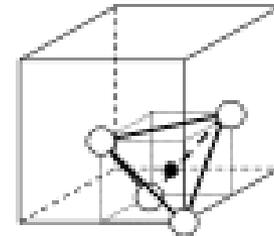
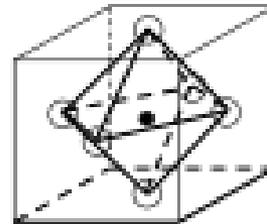
sites octaédriques: centre des faces et des arêtes
sites tétraédriques: sur les faces, à mi-distance des
sites octaédriques

Métaux CC: V, Cr, Nb, Mo, W, Ta (Fe α , Ti β , Zr β)



Cubique face centrée

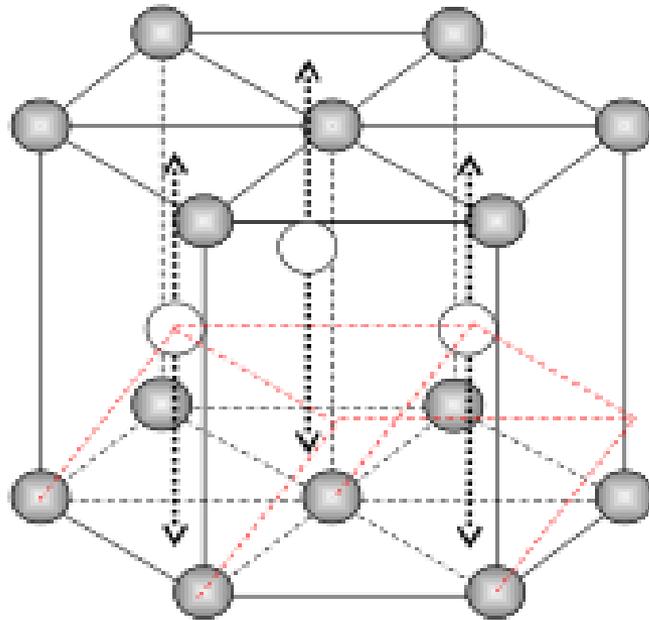
- 4 atomes par cellule
- compacité: 74% (valeur maximale)
- plan dense {111} (12 directions denses)



sites octaédriques: centre du cube et des arêtes

sites tétraédriques: centre d'un petit cube, 1/8 de la maille

Métaux CFC: Cu, Ag, Au, Al, Pb, Co, Ni, Rh, Pd, Ir, Pt, Fe- γ



Hexagonale compacte

- 6 (2) atomes par cellule
- compacité: 74% (valeur maximale)
- Empilement de plans compacts // au plan de base (0001): ABABABA...

Les sites interstitiels sont identiques à ceux de la structure CFC:

-Octaédriques: entre deux plans compacts

-Tétraédriques: 3 atomes d'un plan compact et un atome d'un plan voisin

Métaux HC: Mg, Co, Cd, Zn, Ti α , Zr α , Be

Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

Un cristal comporte des défauts (défauts de réseau) même s'ils sont peu nombreux. Ces défauts ont une importance considérable puisqu'ils déterminent un grand nombre de propriétés importantes des solides cristallins, telles que les propriétés plastiques.

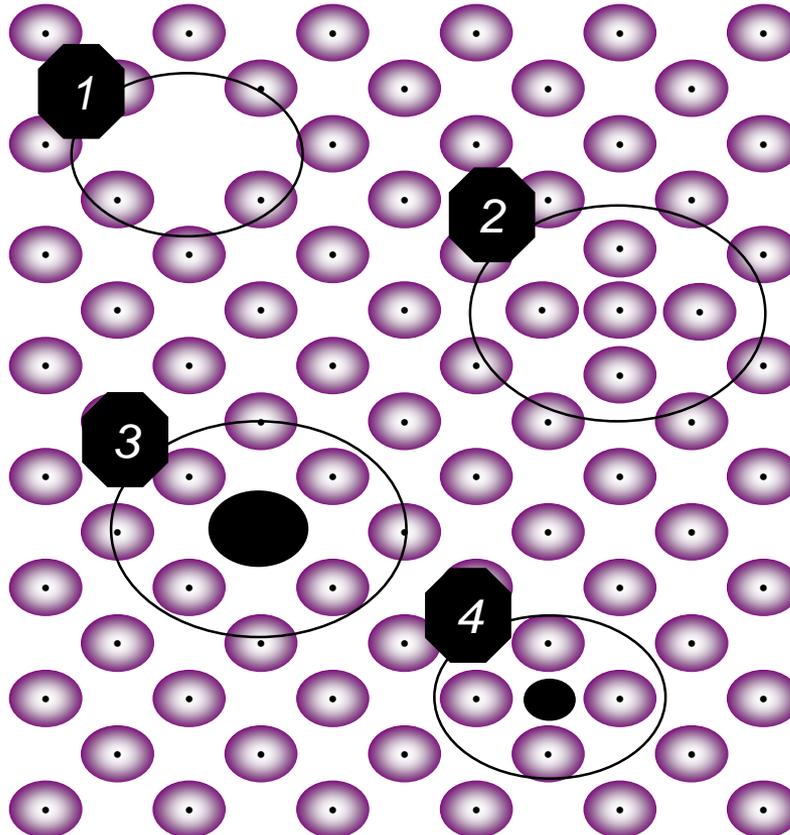
Il existe quatre sortes de défauts cristallins : défauts ponctuels, défauts linéaires, défauts plans et défauts à trois dimensions.

Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

défauts ponctuels

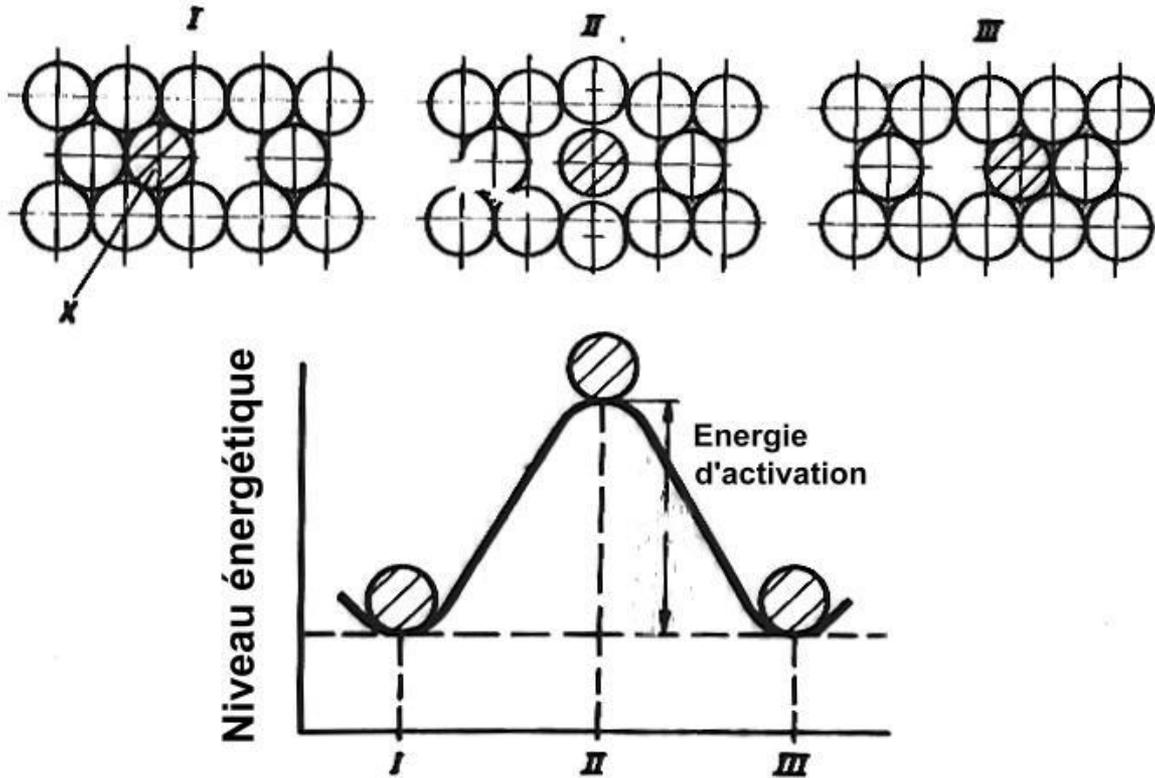
1. **Lacunes : 1 eV / lacune**
2. **Auto-interstitiel : 7 eV / auto-interstitiel**
3. **Atomes en substitution**
4. **Atomes en insertion**



Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

Effet des lacunes

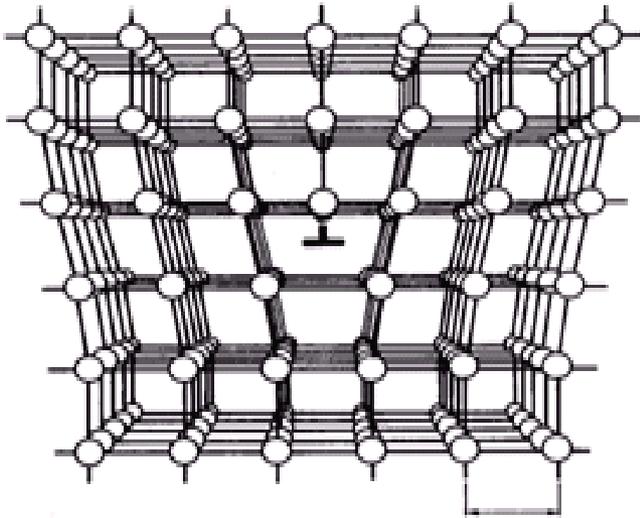


Métallurgie

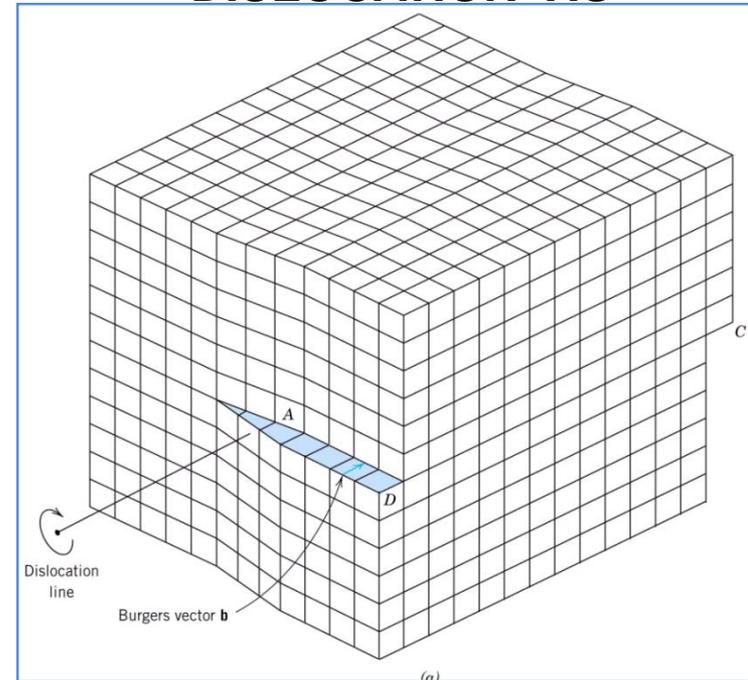
Défauts de la structure cristalline

Les défauts linéaires : les dislocations

DISLOCATION-COIN



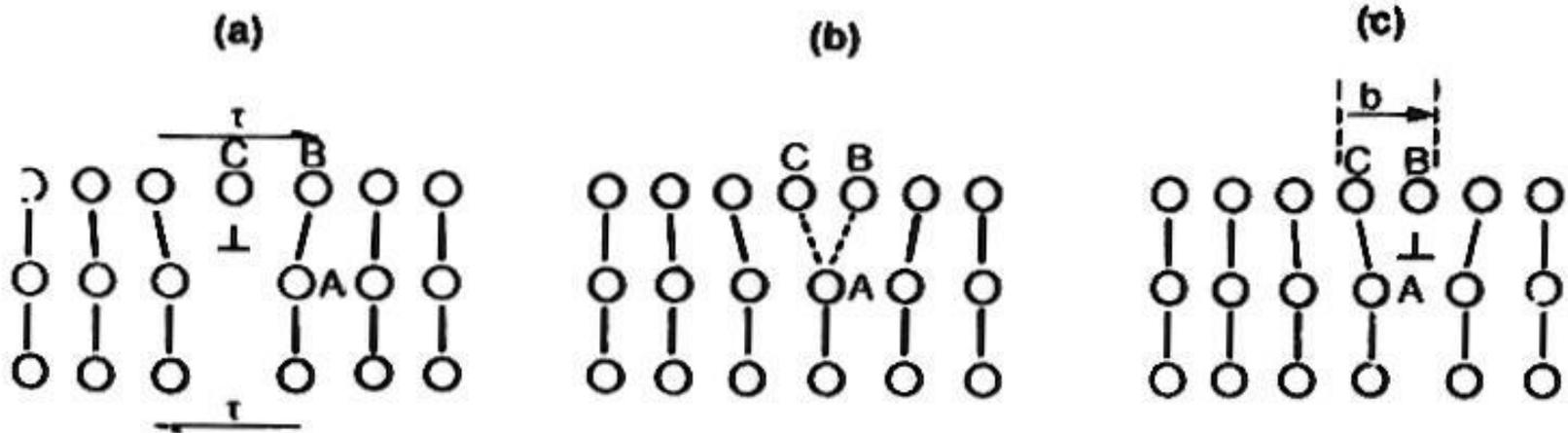
DISLOCATION-VIS



Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

Mouvement des dislocations : le glissement

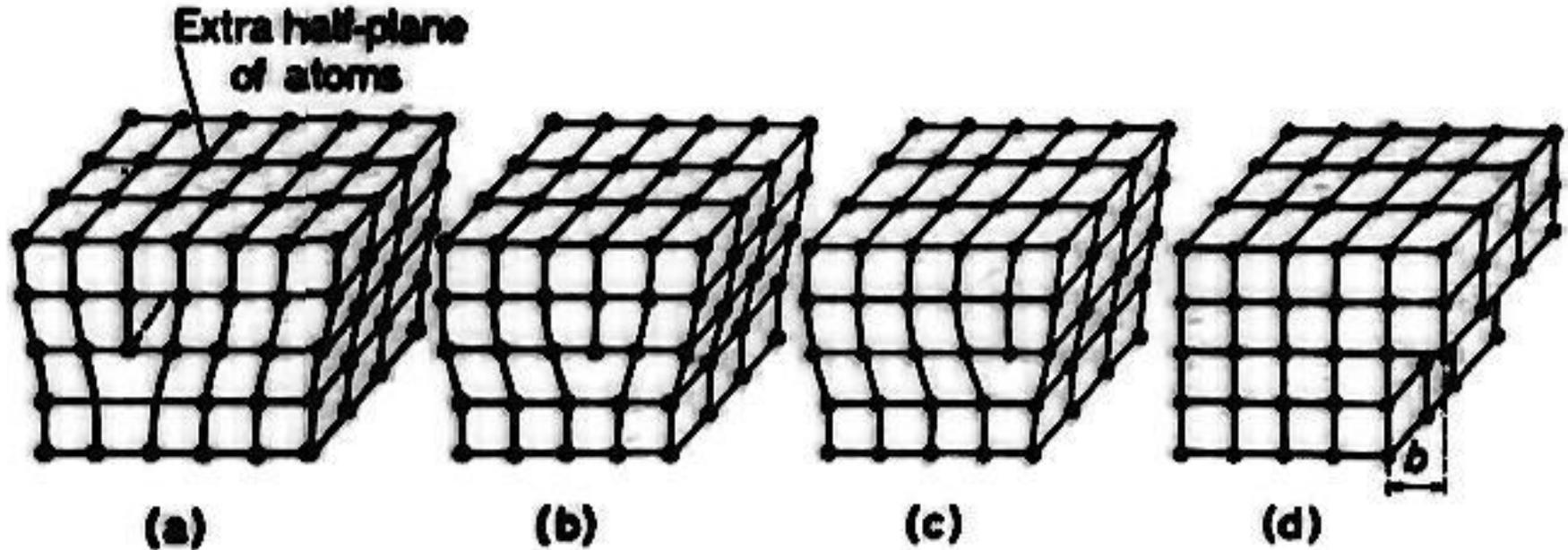


- Déplacement des dislocations, sous l'effet des contraintes extérieures : le glissement.
- Les plans et directions de glissement sont ceux définis pour les cristaux parfaits.

Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

Le glissement des dislocations



- Mais il conduit à un déplacement infinitésimal

Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

Conséquences du déplacement des dislocations dans les métaux

- **Les phénomènes des dislocations explique la grande ductilité des métaux.**
- **Cette ductilité présente de grands avantages.**
 - **Elle confère aux métaux une grande résistance au choc : ce que l'on appelle ténacité**
 - **Elle permet l'adaptation des structures aux surcharges**
 - **Elle facilite grandement la mise à forme**

Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

Les phénomènes des dislocations permettent d'expliquer bon nombre des comportements mécaniques des métaux :

La limite élastique, La déformation plastique, L'endommagement et la rupture

Métallurgie

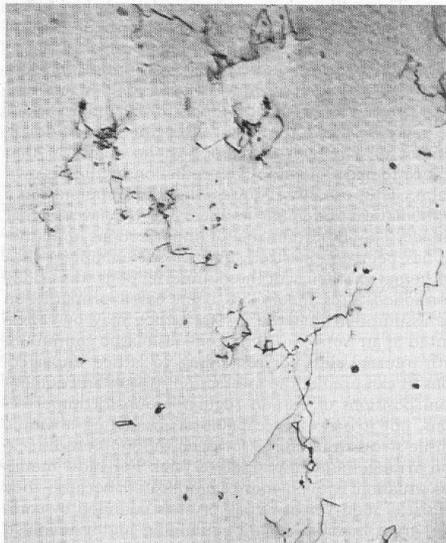
Défauts de la structure cristalline

Effet de la multiplication des dislocations

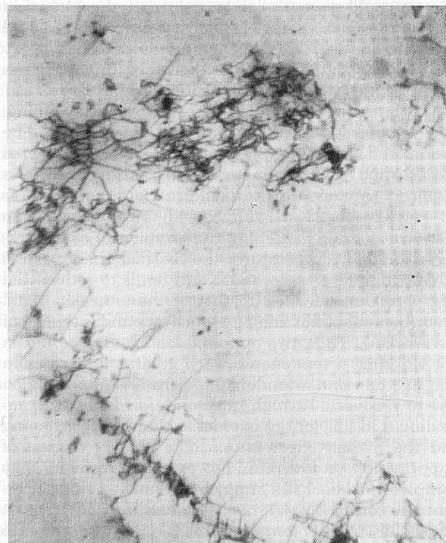
La multiplication des dislocations conduit à des accumulations à certains endroits du métal.

Ces accumulations peuvent conduire à la formation de microfissures, puis de fissures et enfin la rupture (ductile)

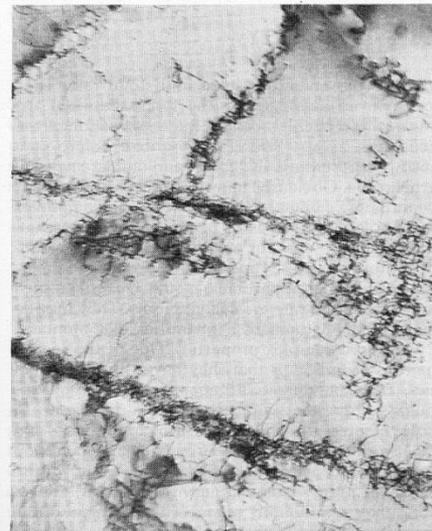
On appelle cela l'endommagement du métal.



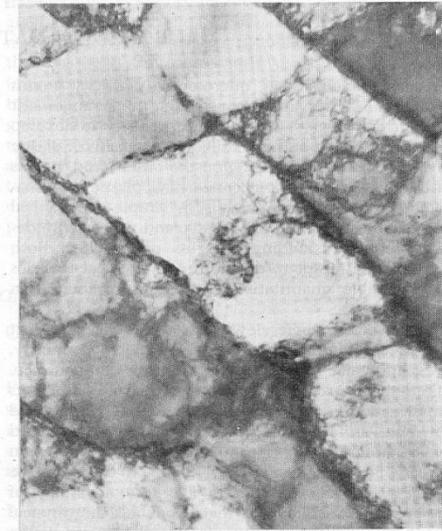
1% STRAIN



3.5% STRAIN



9% STRAIN



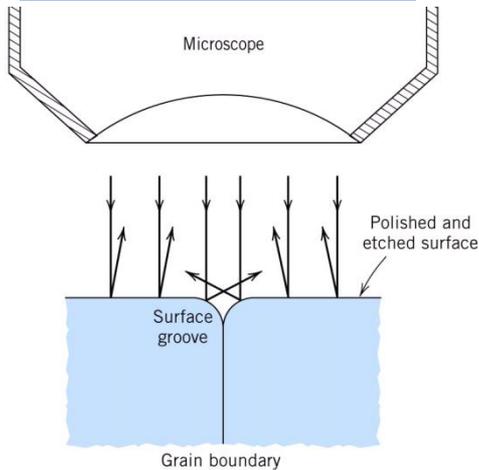
20% STRAIN

0.5 μ

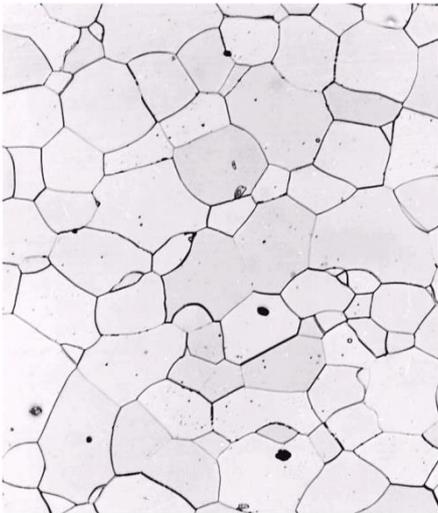
Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

Les défauts 2D



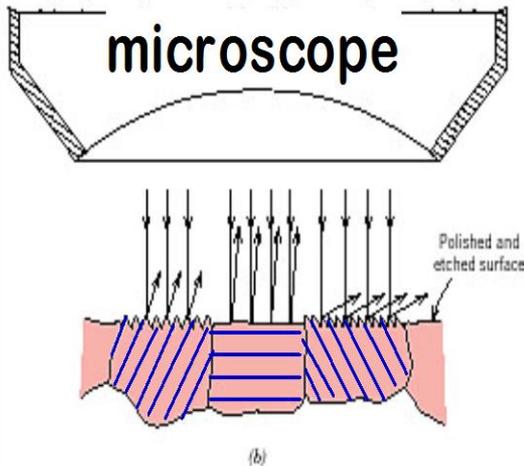
- **La surface des métaux réfléchit très bien la lumière. Elle apparaît brillante au microscope.**
- **En attaquant cette surface par un agent corrosif on peut mettre en évidence les défauts de surface, qui sont attaqués en premier lieu et ne réfléchissent plus la lumière.**



Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

Les défauts 2D



(b)



(c)

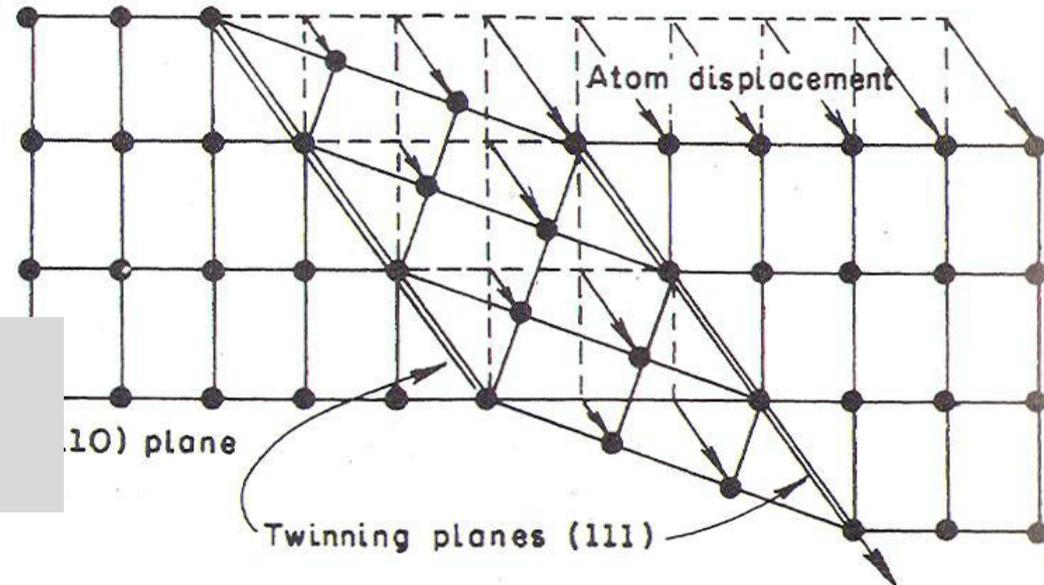
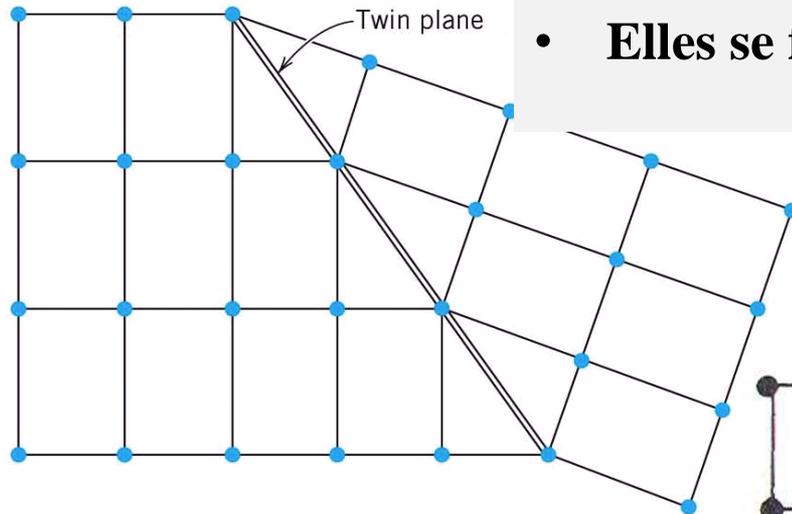
- L'attaque prolongée de la surface du métal peut révéler que certaines zones du métal sont plus attaquées que d'autres.
- C'est le révélateur que différents plans cristallographiques sont présents en surface.

Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

Les macles

- Les plans de macles sont des plans de symétrie.
- Elles se forment lors de la cristallisation.

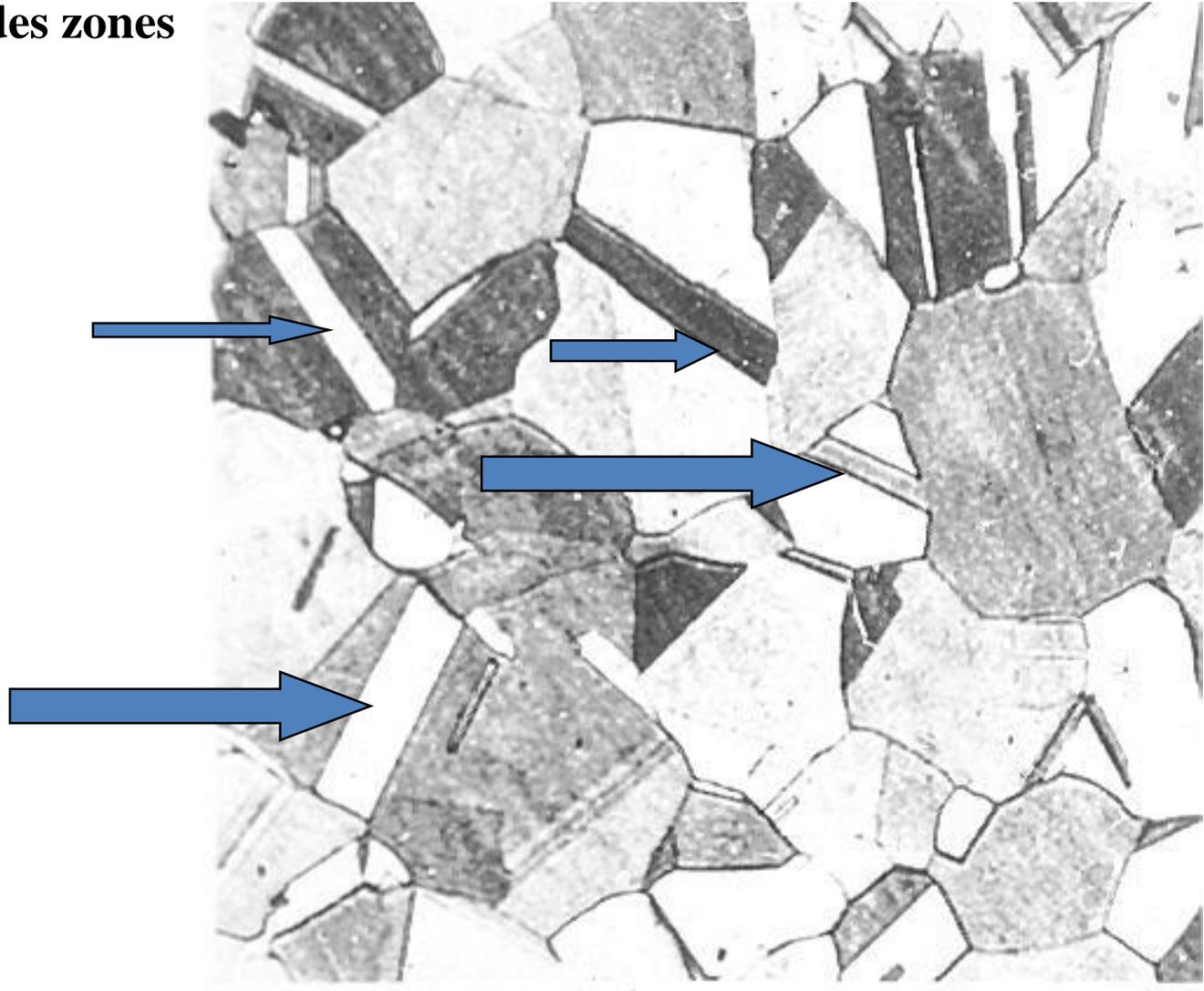


- Elles peuvent aussi résulter de déformations plastiques (mécanisme secondaire)

Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

- Illustration des zones maclées.



Métallurgie

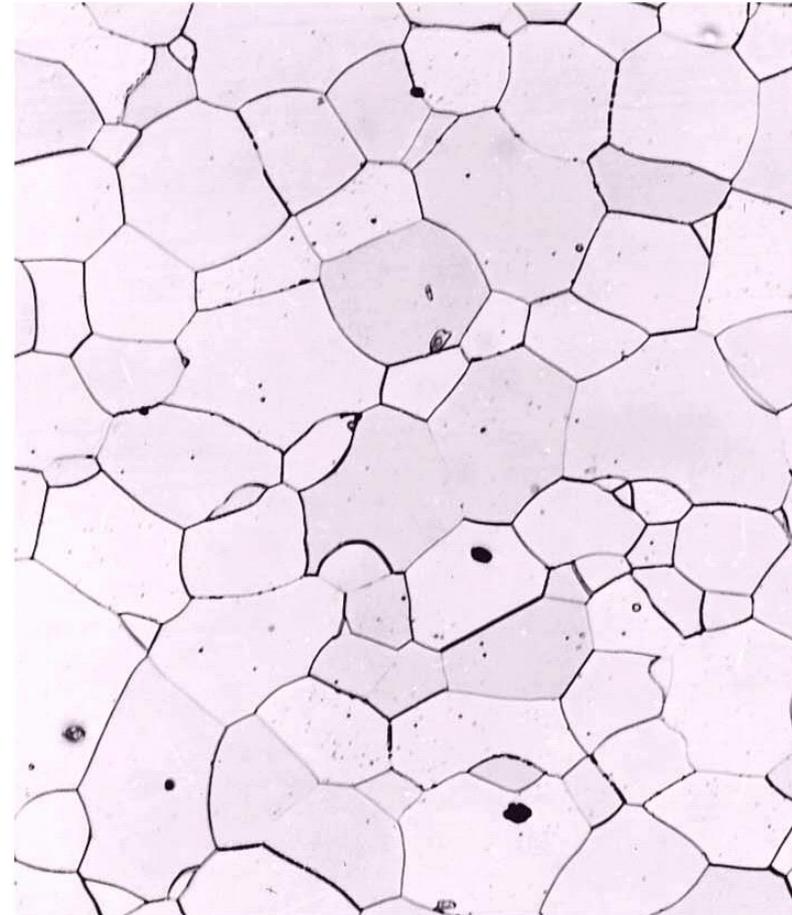
Défauts de la structure cristalline

Les joints de grains

- Les métaux réels sont généralement constitués de nombreux cristaux (ou grains) séparés par des joints de grains.
- On les appelle **polycristaux**.
- Tous les grains n'ont pas la même orientation.

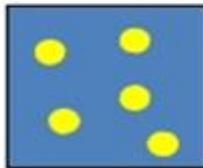


- Lors de la solidification des métaux, plusieurs cristaux se forment dans le liquide.
- A la fin de la solidification les différents cristaux se raccordent les uns aux autres via des interfaces appelés joints de grains.

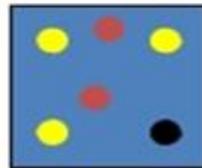


Phases et Diagrammes de phases

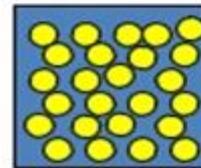
- Les substances se présentent sous trois états physiques distincts : la phase gazeuse, la phase liquide et la phase solide.
- Les trois phases se distinguent par l'espacement et la mobilité des molécules.



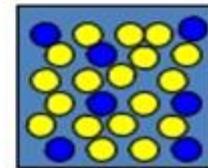
Substance
pure gazeuse



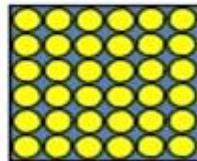
Mélange
homogène gazeux



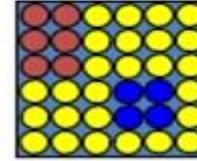
Substance pure
liquide



Mélange
homogène liquide



Substance pure solide



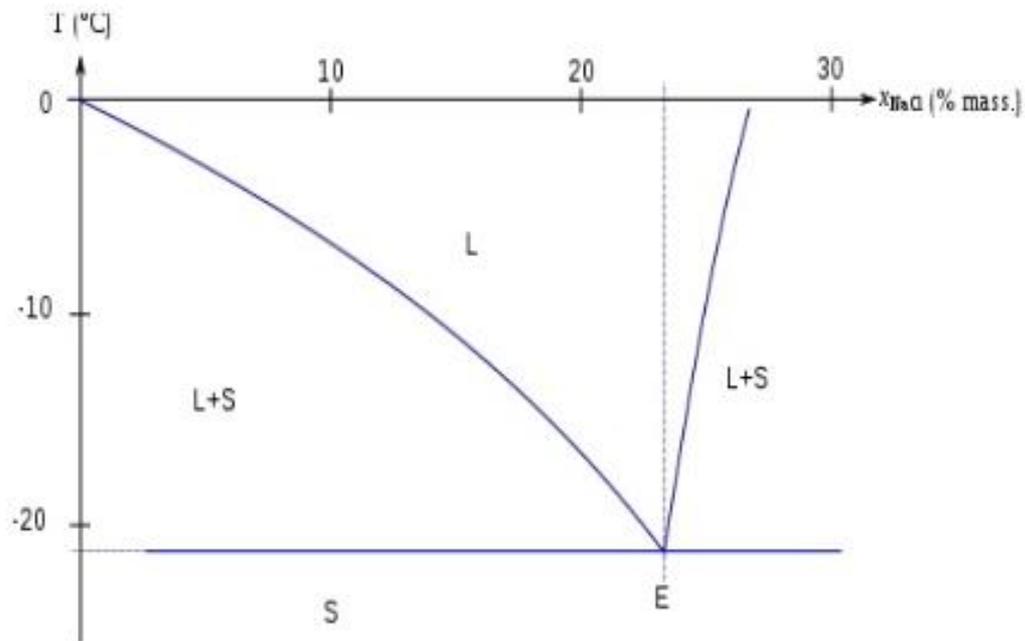
Mélange hétérogène solide

Phases et Diagrammes de phases

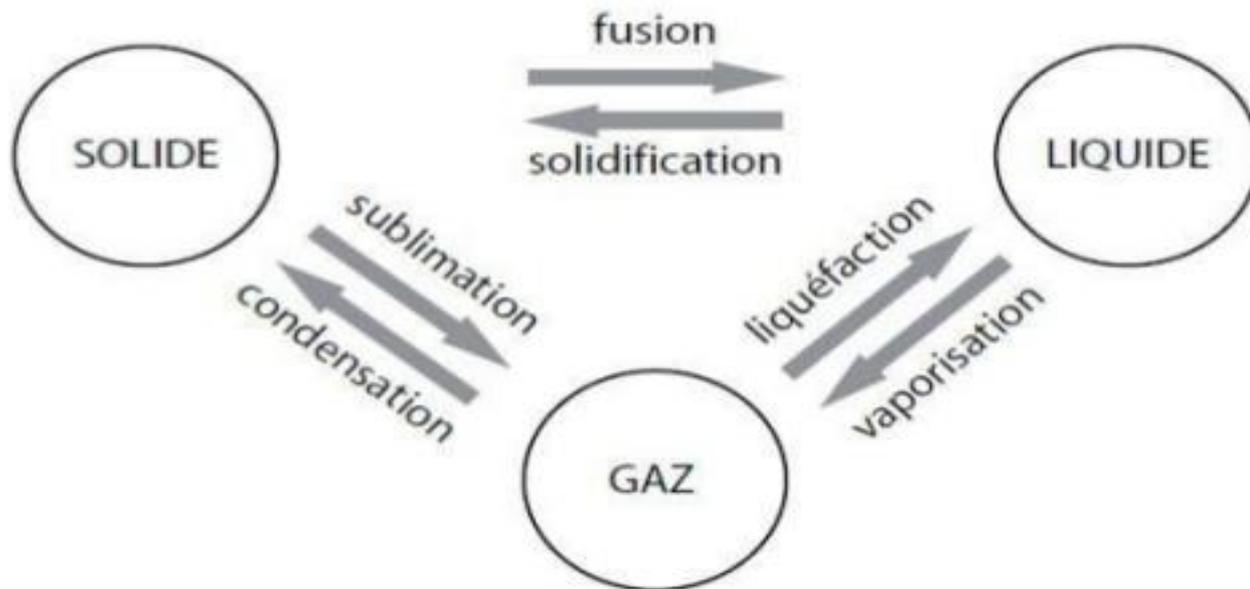
- On s'intéresse aux changements solide-liquide, mais aussi les transformations à l'état solide, toujours sous pression atmosphérique.
- Nous ne prendrons en compte que la température et la composition chimique de la matière.
- **Diagramme de phases**: c'est un diagramme d'équilibre.
- les variations de température sont infinies et lentes.

Phases et Diagrammes de phases

Exemple: eau et sel



Les transitions entre les phases



Les transitions entre les phases

L'état d'équilibre d'un corps pur est déterminé par le triplet (p, V, T) ou encore un point dans l'espace; l'ensemble des états d'équilibre forme alors une surface.

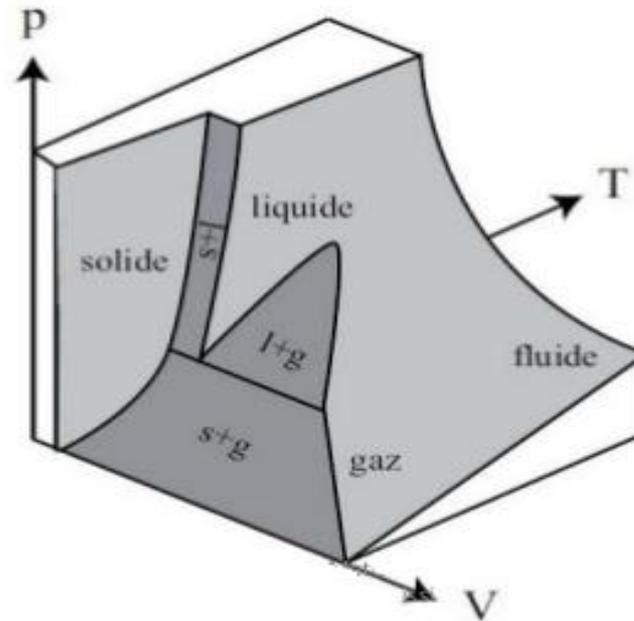


Diagramme de phase d'un corps pur

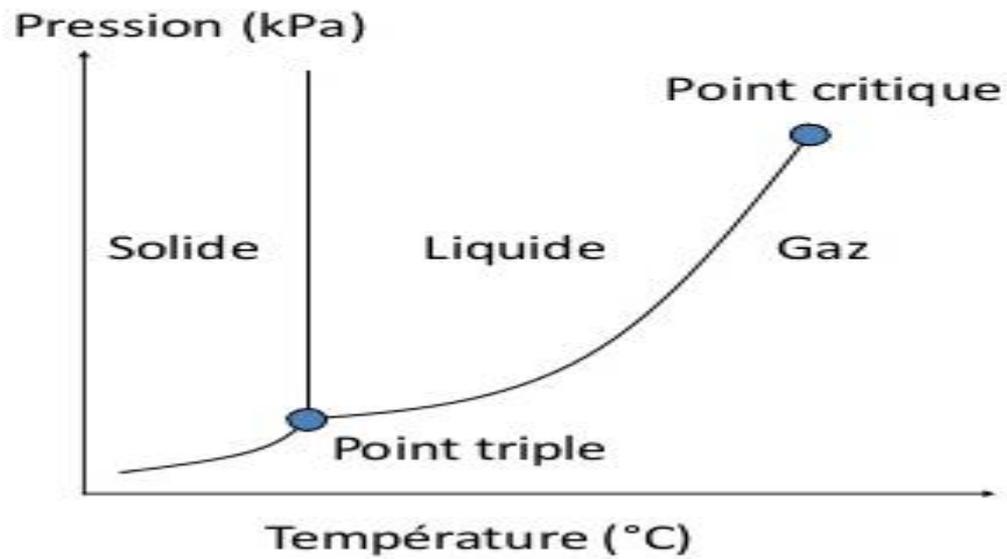


Diagramme de phase d'un corps pur

Etat physique:

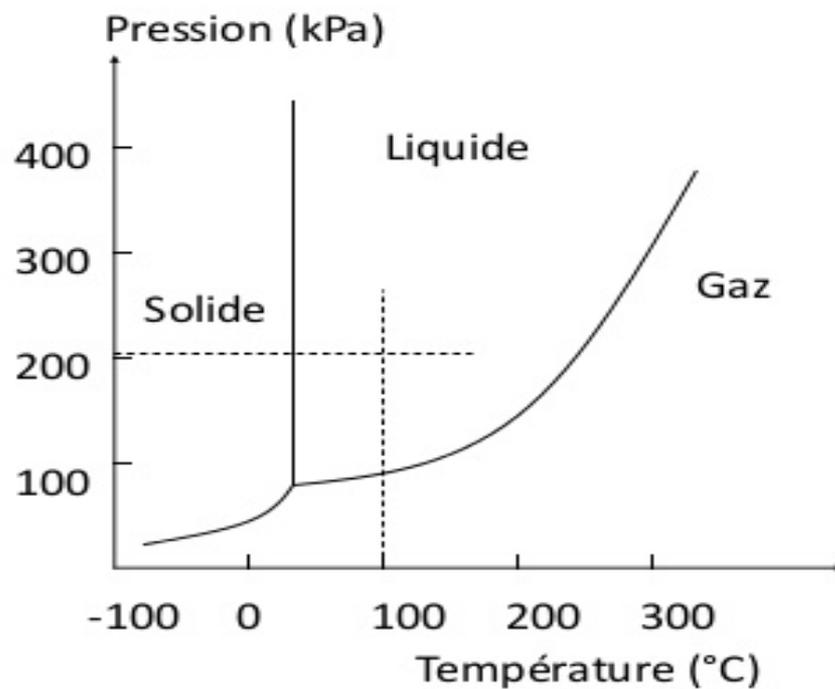


Diagramme de phase d'un corps pur

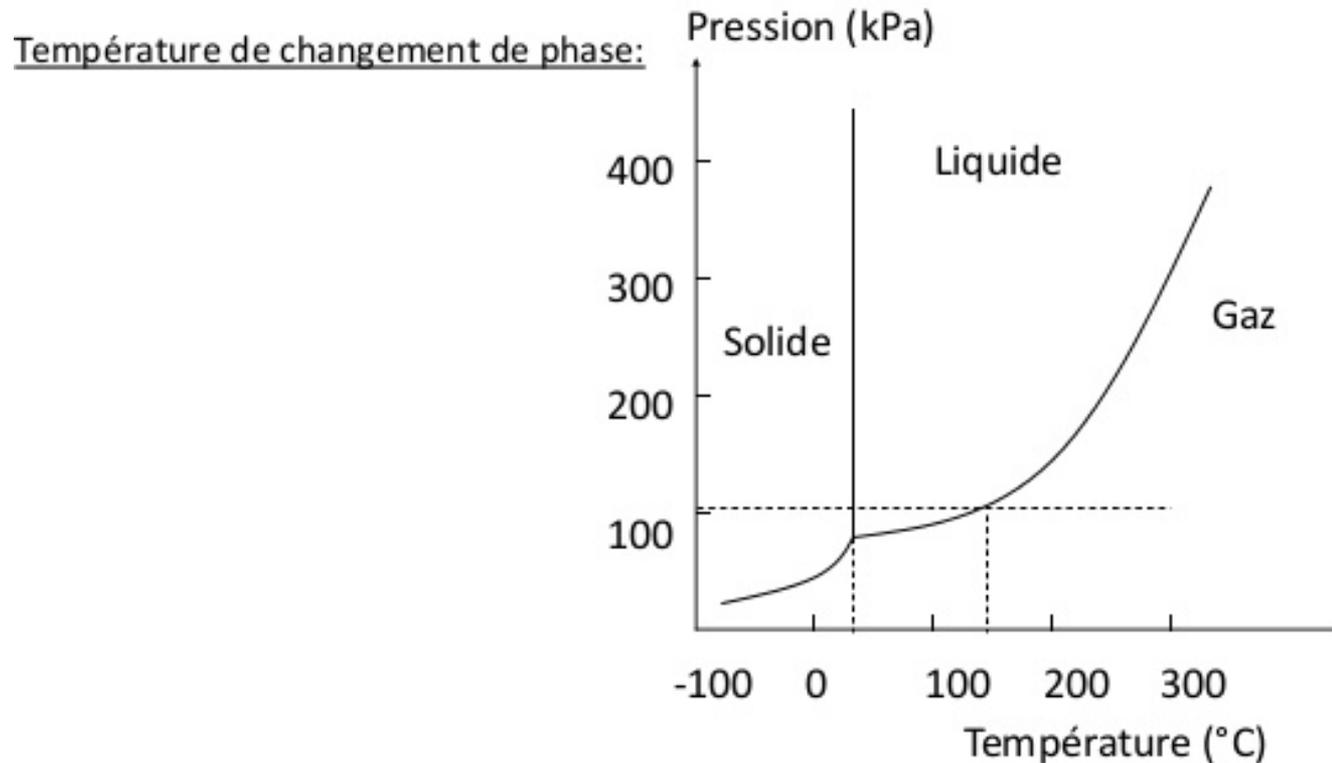


Diagramme de phase d'un mélange binaire

- Il existe une multitude de cas possibles, mais nous n'en verrons que les trois principaux :
 - Diagramme à fuseau unique, dit « à miscibilité complète » ;
 - Diagramme à eutectique unique ;
 - Diagramme à eutectique et à eutectoïde.

Diagrammes à miscibilité complète

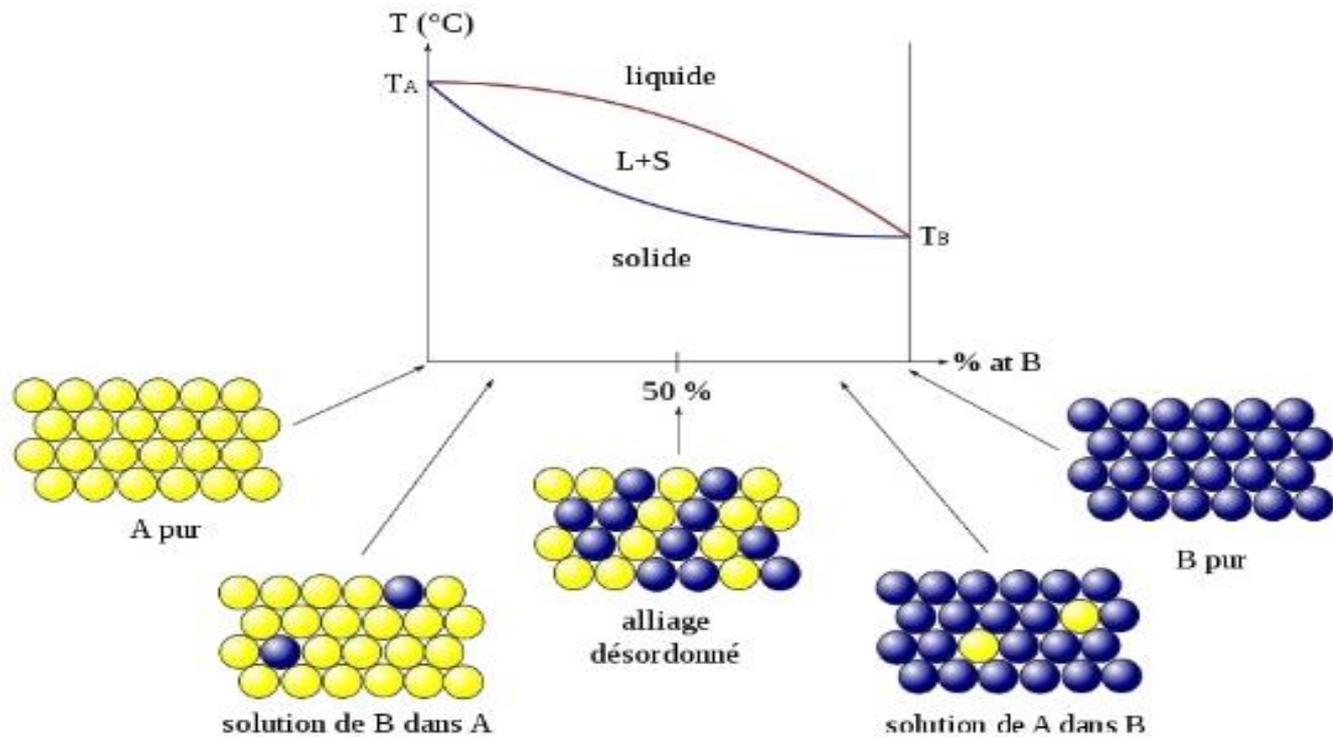


Diagramme à miscibilité partielle

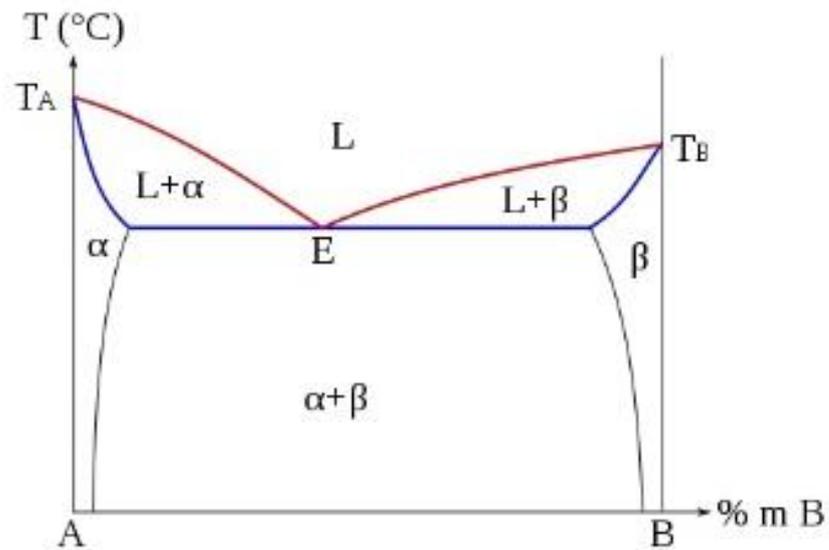
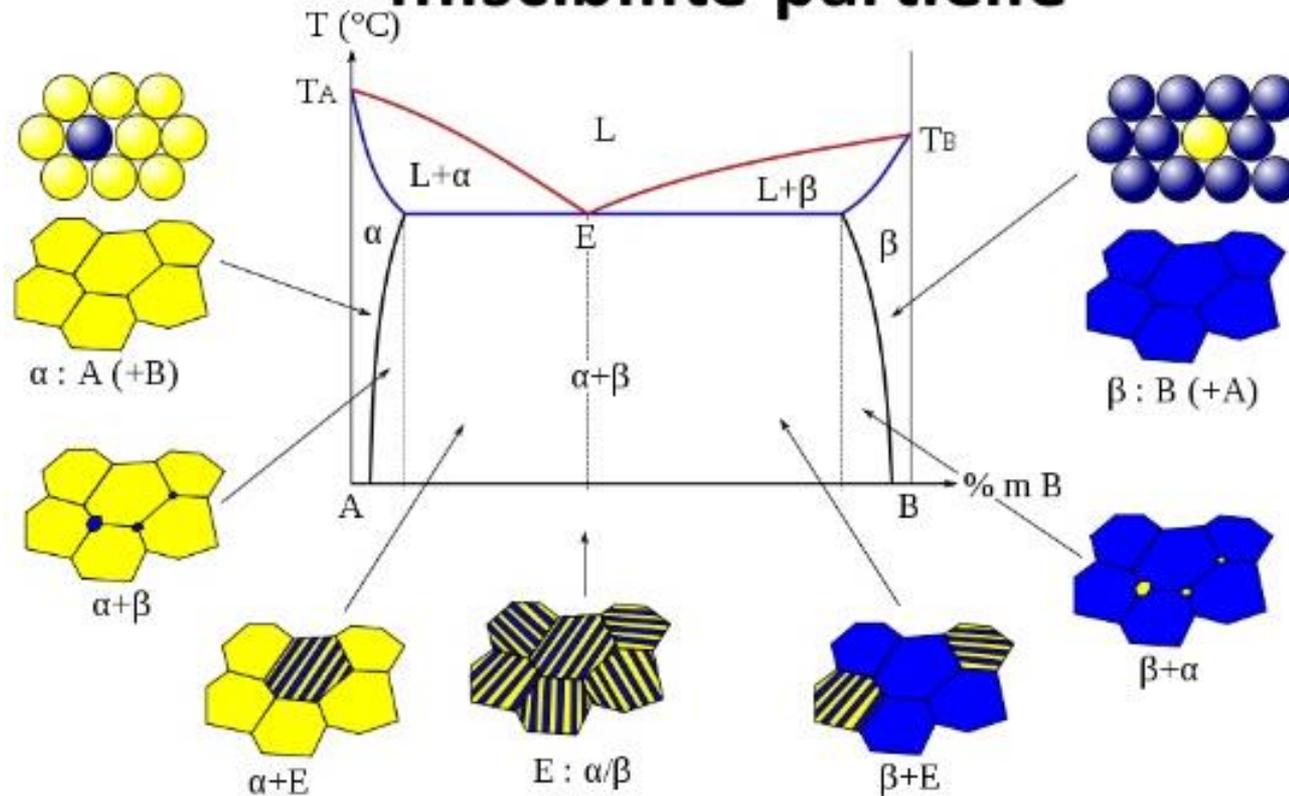
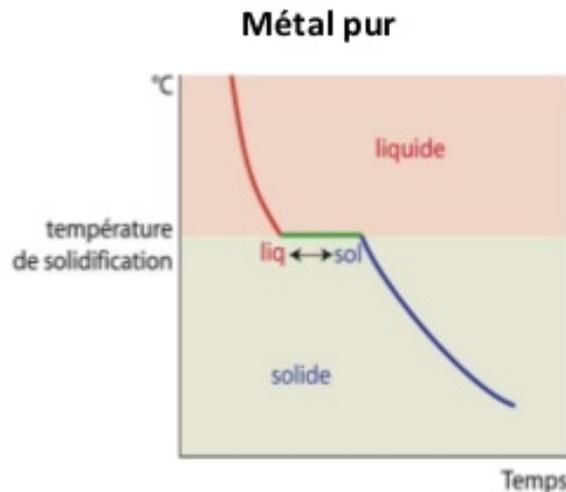


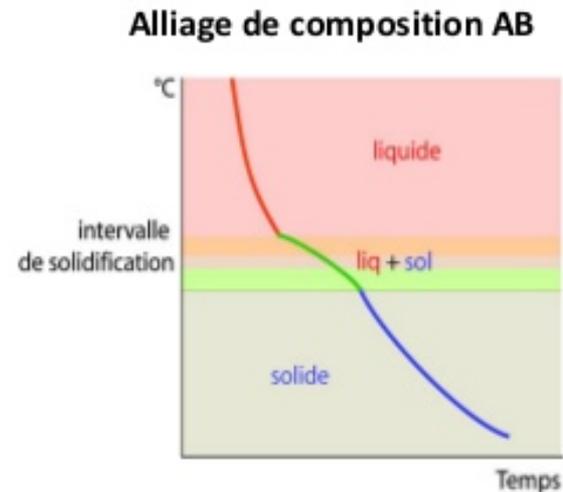
Diagramme à miscibilité partielle



Construction d'un diagramme de phases



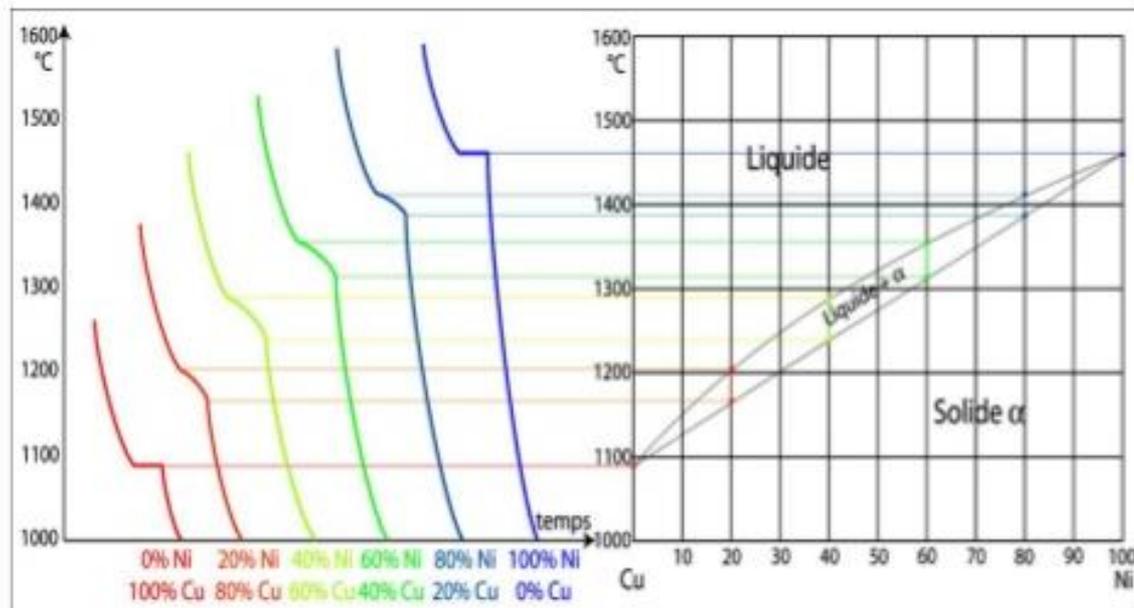
Lorsqu'un métal pur en fusion est refroidi, sous pression constante, le changement de phase s'effectue toujours à une température fixe : le point de fusion



Pour réaliser un alliage, des proportions définies de constituants différents sont fondues et mélangées, puis l'ensemble est refroidi.

Construction d'un diagramme de phases

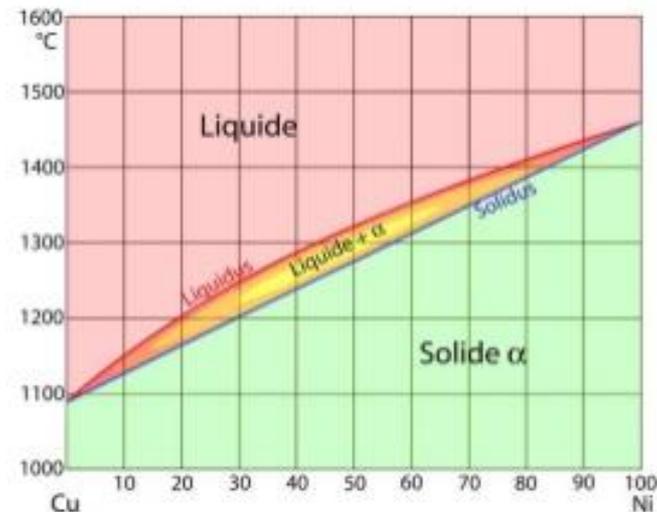
Pour construire le diagramme de phase d'un alliage binaire A-B, il suffit d'enregistrer les courbes de refroidissement pour chaque concentration de B dans A en partant de A, métal pur jusqu'à B, métal pur.



Construction d'un diagramme de phases

- Diagrammes de phases avec miscibilité totale à l'état solide

La courbe de refroidissement du cuivre avec un palier à 1084°C et la courbe de refroidissement du nickel avec un palier à 1453°C. Entre ces deux extrêmes, les alliages à différentes concentrations présentent un intervalle de solidification non isotherme. De 0% de nickel à 100% de nickel, les points d'inflexion supérieurs qui correspondent au début de la solidification forment une courbe appelée *liquidus*, les points d'inflexion inférieurs qui correspondent à la solidification totale forment une courbe appelée *solidus*.



Construction d'un diagramme de phases

Diagrammes de phases avec miscibilité totale à l'état solide

1° Composition des phases

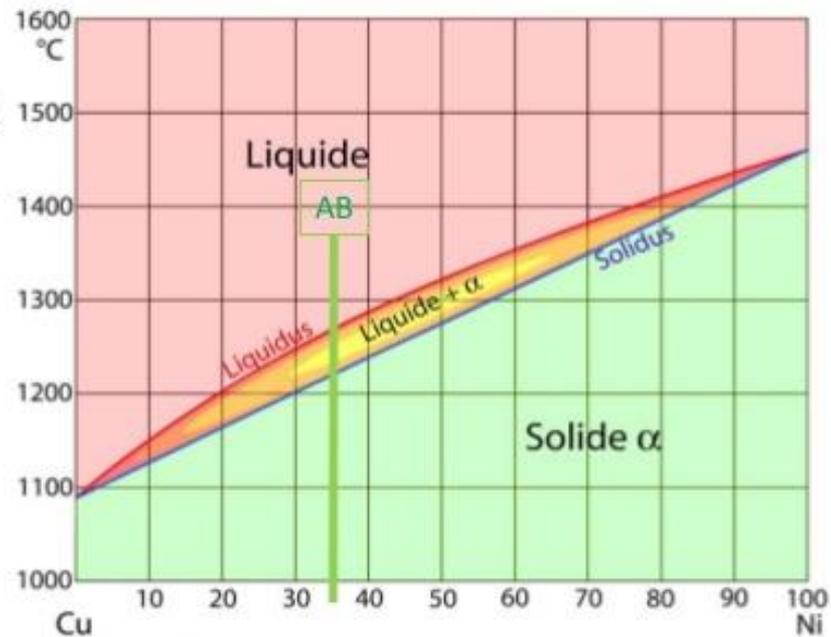
➤ La composition massique globale de l'alliage AB ?

➤ Composition de l'alliage AB :

Température > liquidus

liquidus > Température > Solidus

Température < Solidus



Construction d'un diagramme de phases

- Diagrammes de phases avec miscibilité totale à l'état solide
2° proportion en masse de chaque phase:

Soit :

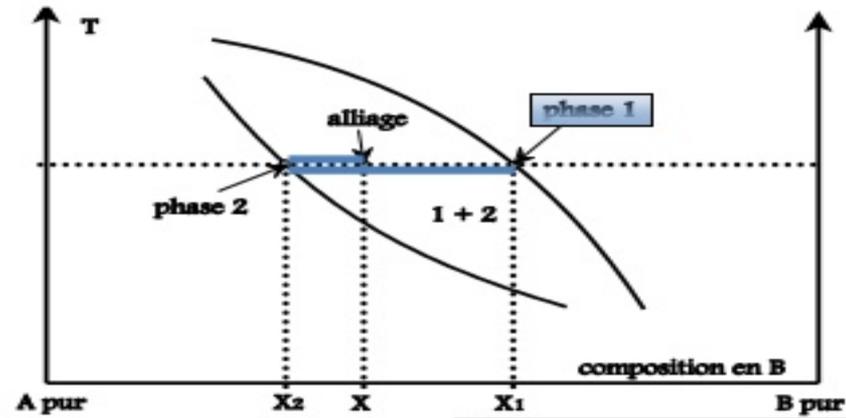
- f_s la proportion d'alliage solide
- f_l la proportion de l'alliage liquide
- C_s la composition de la phase solide
- C_l la composition de la phase liquide

Principe de conservation des masses  $f_s + f_l = 1$

Règle de bras levier ou des segments inversés:

Phases et Diagrammes de phases

Règle des segments inverses.

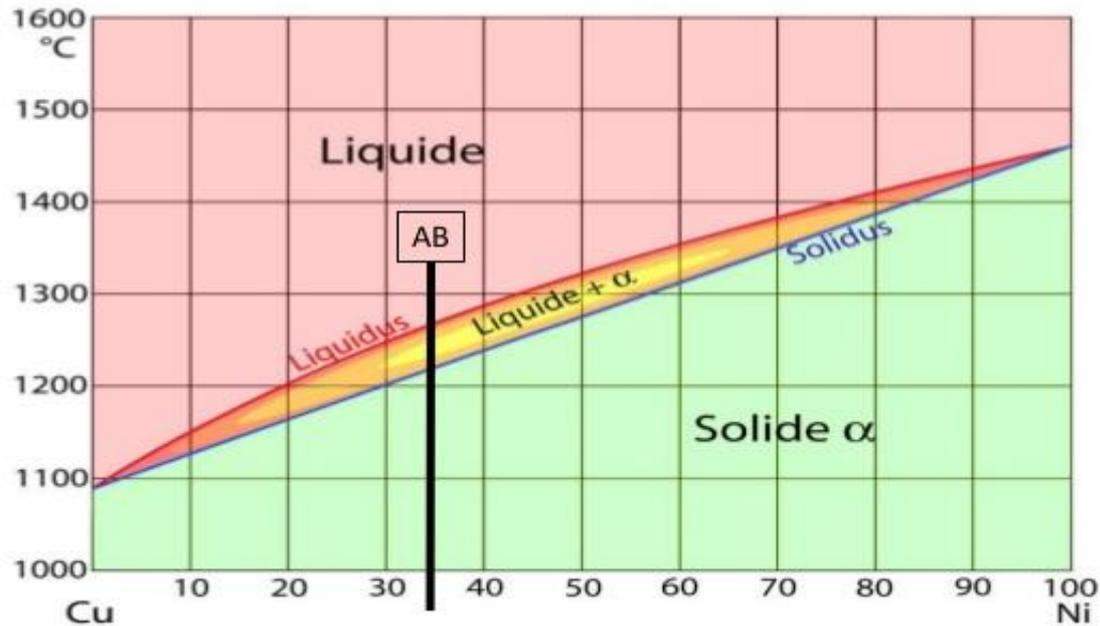


Fraction massique de la phase 1 =

$$f_{Phase1} = \frac{X - X_2}{X_1 - X_2}$$

Avec $f_1 + f_2 = 1$

Application 1



- Remplir le tableau suivant sachant que la composition de l'alliage est de l'alliage AB.

Température	Cs	Cl	fs	fl
>1267°				
1267°				
1250°				
1230°				
1218°				
<1218°				

Application 2

- Soit le tableau de solidus et liquidus du Ge-Si:

Composition en %m de Si	Température Solidus	Température liquidus
0	938	938
10	1005	1147
20	1065	1226
30	1123	1278
40	1178	1315
50	1232	1346
60	1282	1367
70	1326	1385
80	1359	1397
90	1390	1408
100	1414	1414

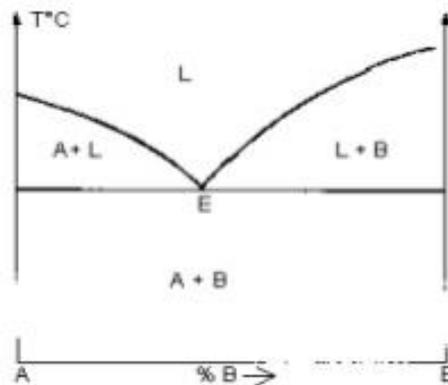
- Faire le diagramme d'équilibre
- Identifier chaque région
- On mélange 8.43g de Si et 14.52g de Ge
 - Déterminer la fraction massique globale du Si
 - Déterminer la nature et la composition massique de chaque phase à 1200°C
 - Déterminer les masses des phases en présence à 1200°C

Construction d'un diagramme de phases

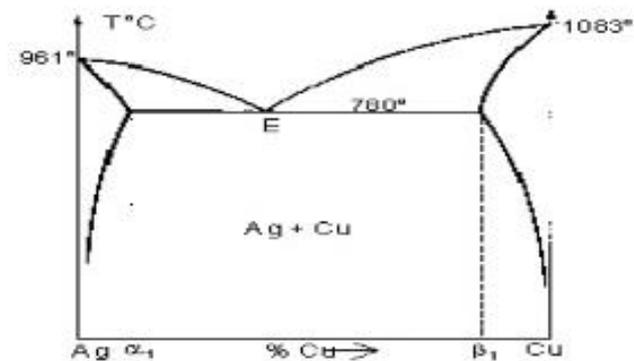
- Diagrammes de phases avec miscibilité partielle à l'état solide

Diagrammes avec point eutectique

Eutectique ($v=0$) en E: liquide « solide (A) + solide (B)



Eutectique simple

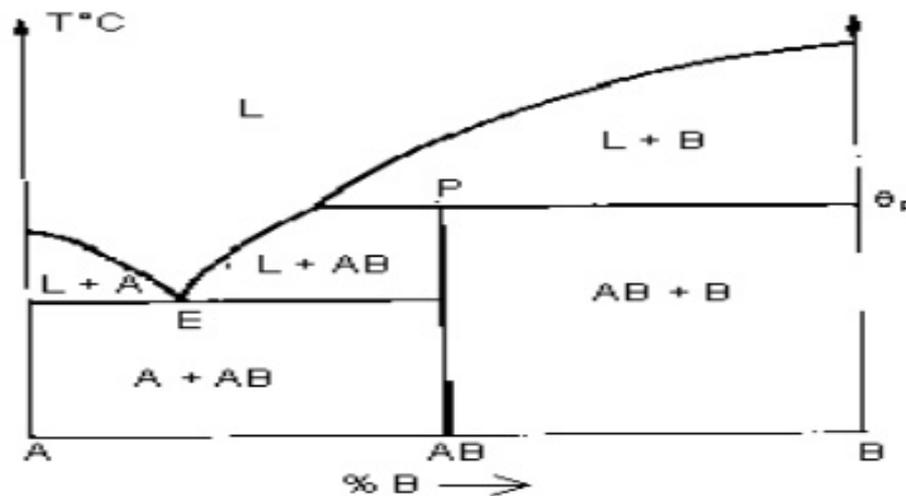


Eutectique avec solution solide partielle

Construction d'un diagramme de phases

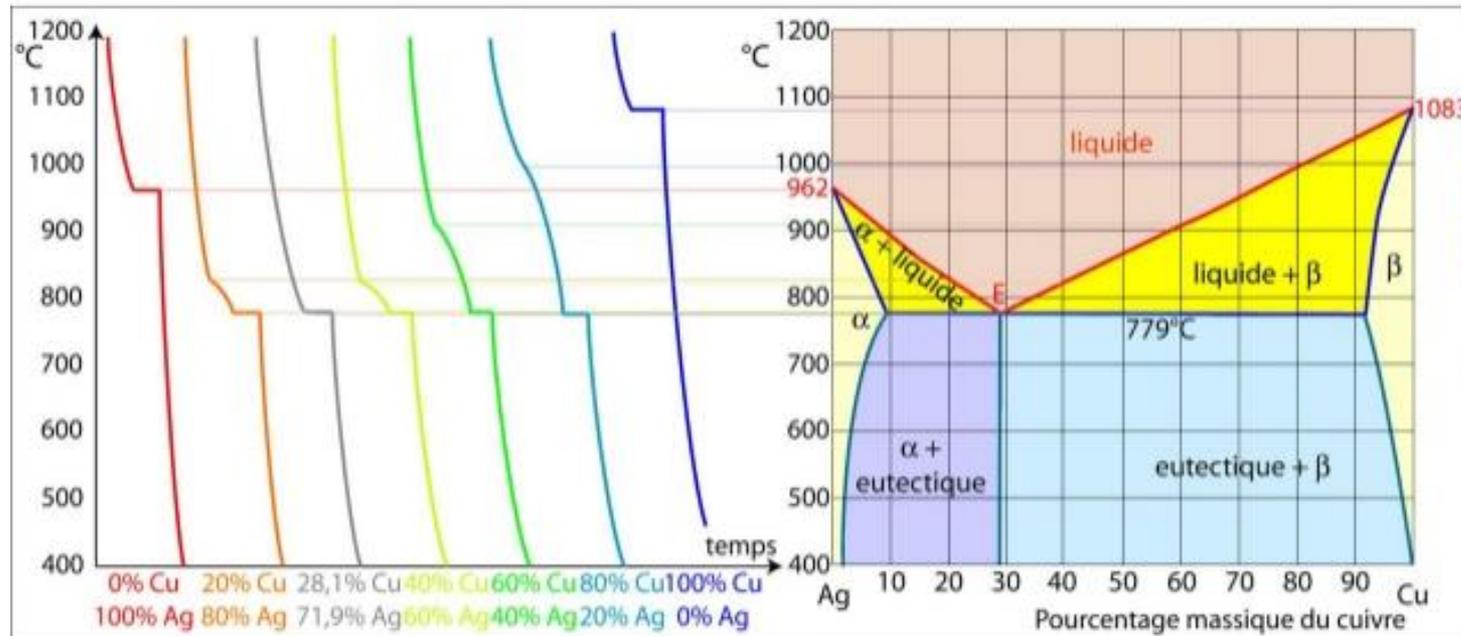
- Diagrammes de phases avec miscibilité partielle à l'état solide

Péritectique ($v=0$) en P: solide AB \rightarrow liquide (L) + solide (B)



Construction d'un diagramme de phases

- Diagrammes de phases avec miscibilité partielle à l'état solide



Construction d'un diagramme de phases

- **Diagrammes avec point eutectoïde**
- Le mécanisme de la transformation eutectoïde est très ressemblant à la transformation eutectique, mais au cours de cette transformation, c'est une phase solide qui se transforme simultanément en deux nouvelles phases solides (Le diagramme de phases Fer-Carbone est présenté en annexe). $\gamma \leftrightarrow \alpha + \beta$

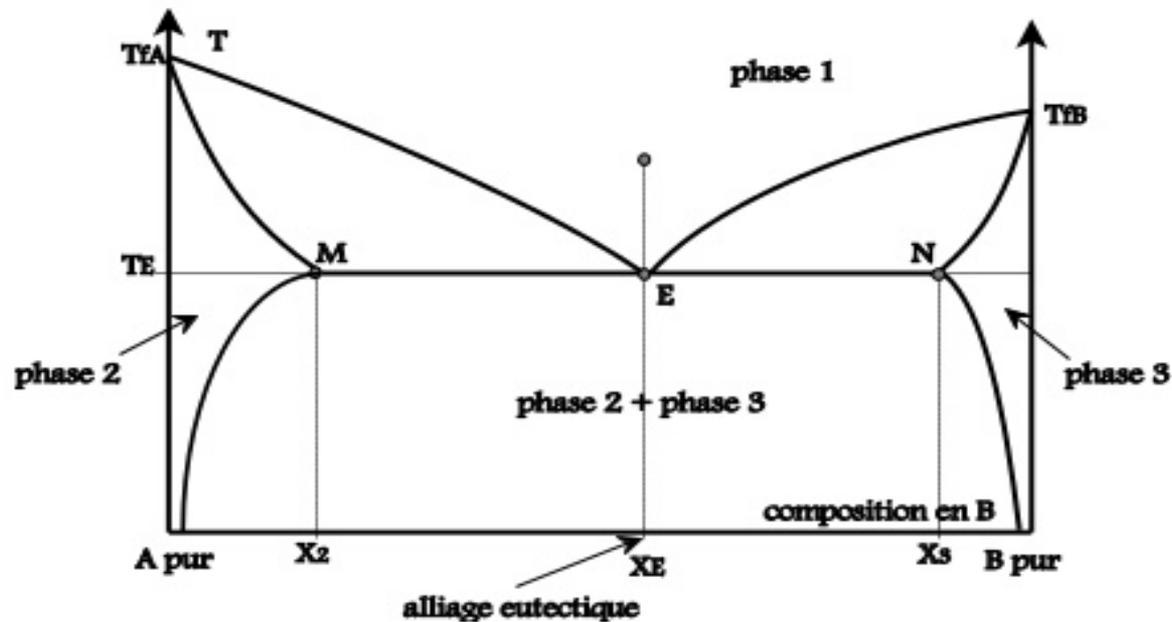
Construction d'un diagramme de phases

- **Diagrammes avec point péritectique**
- Dans une transformation péritectique, une phase liquide et une phase solide se transforment en une seule phase solide de composition définie. Le point péritectique (point P,) est invariant, à température fixe avec un équilibre entre les trois phases.



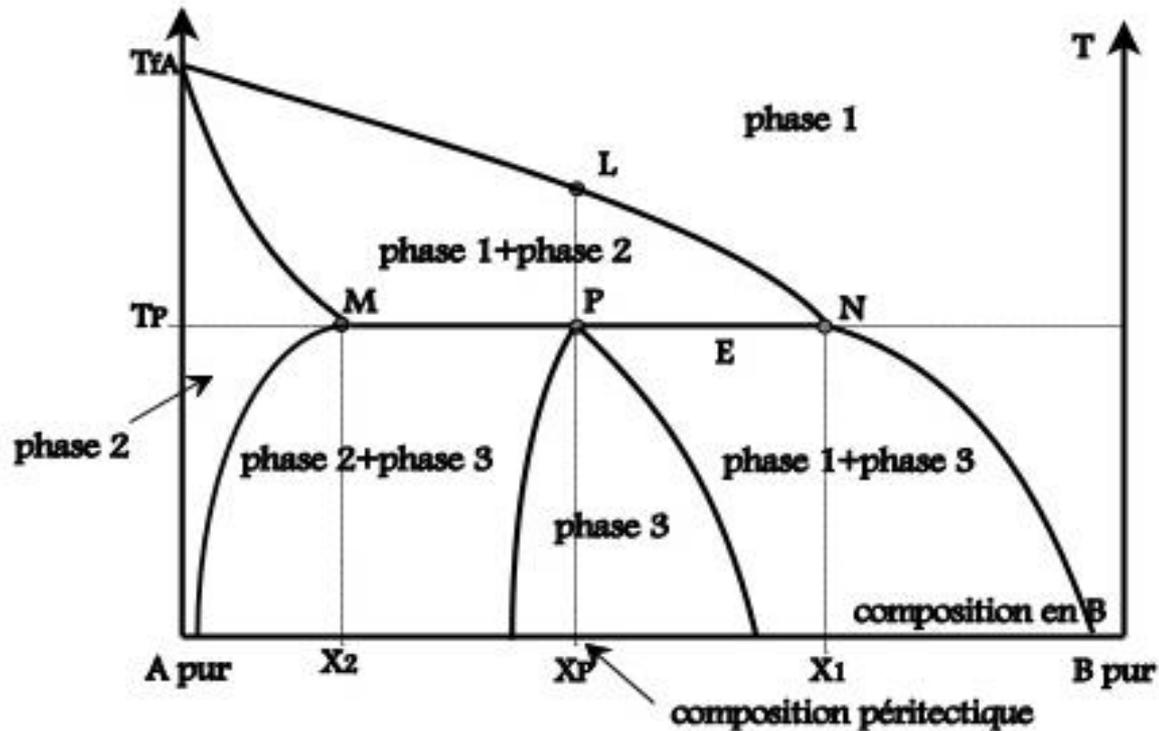
Cas de mélange à trois phases :

Diagramme à eutectique

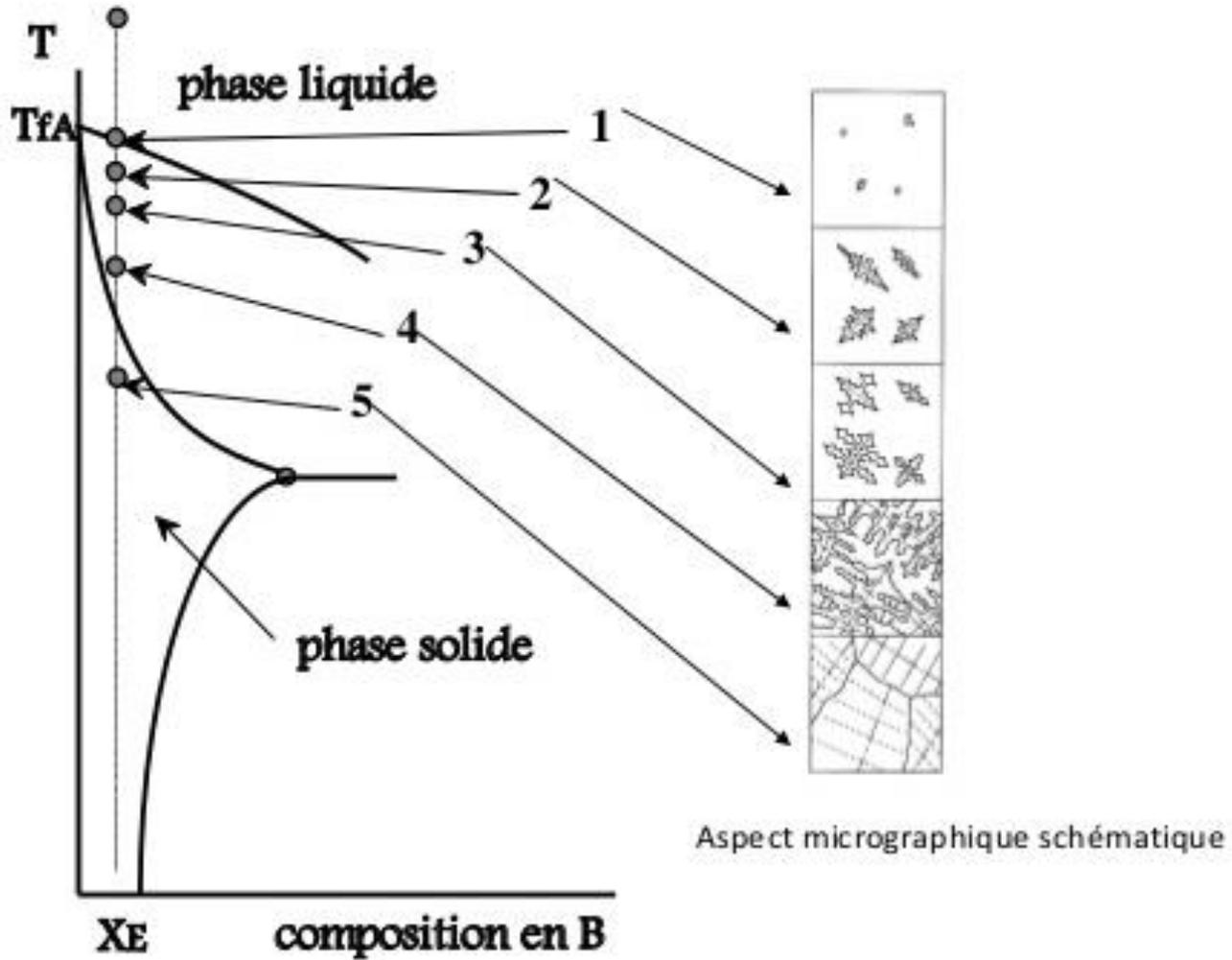


Cas de mélange à trois phases :

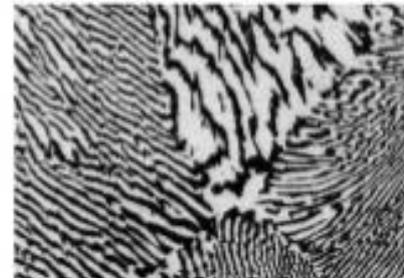
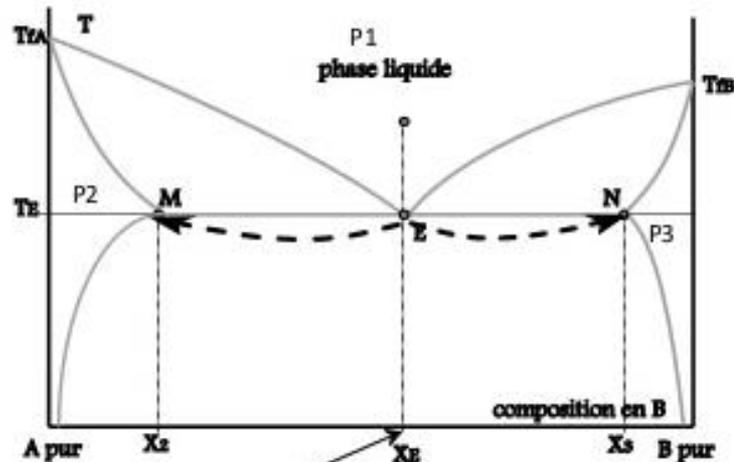
Diagramme à péritectique.



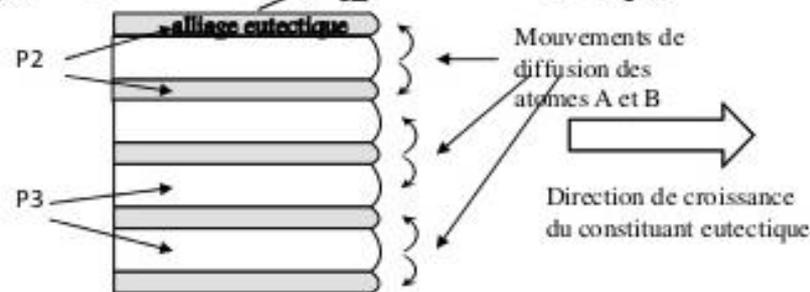
Formation de la microstructure :
Exemple de la cristallisation d'une solution solide terminale.



Formation de la microstructure :
Exemple de la cristallisation d'un eutectique lamellaire.



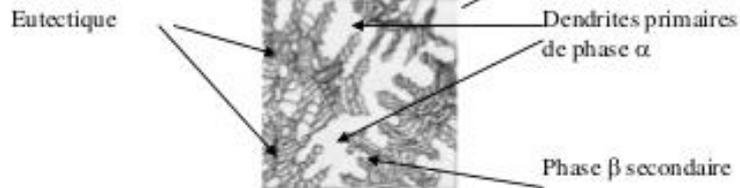
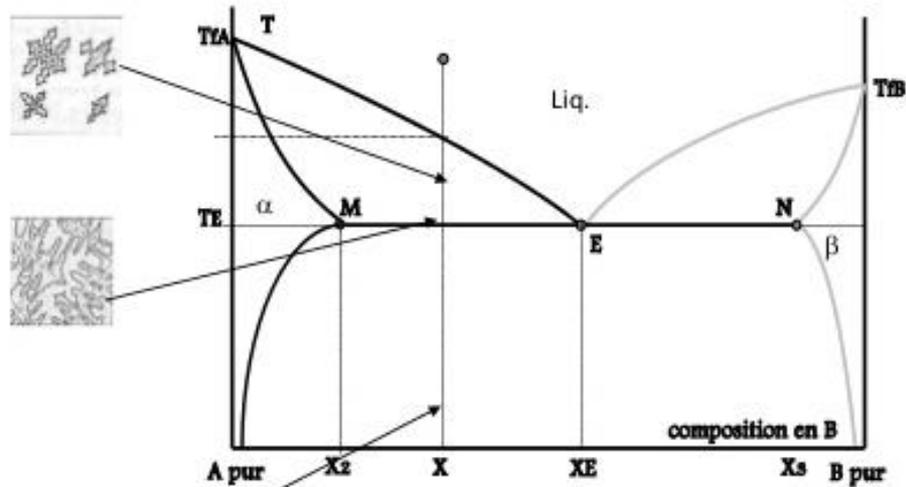
Grains d'eutectique Cu/P



Microstructure finale:

- deux phases : P2 et P3
- un constituant : l'eutectique

Formation de la microstructure :
Exemple de la cristallisation d'un alliage proche d'un eutectique.



Microstructure finale:

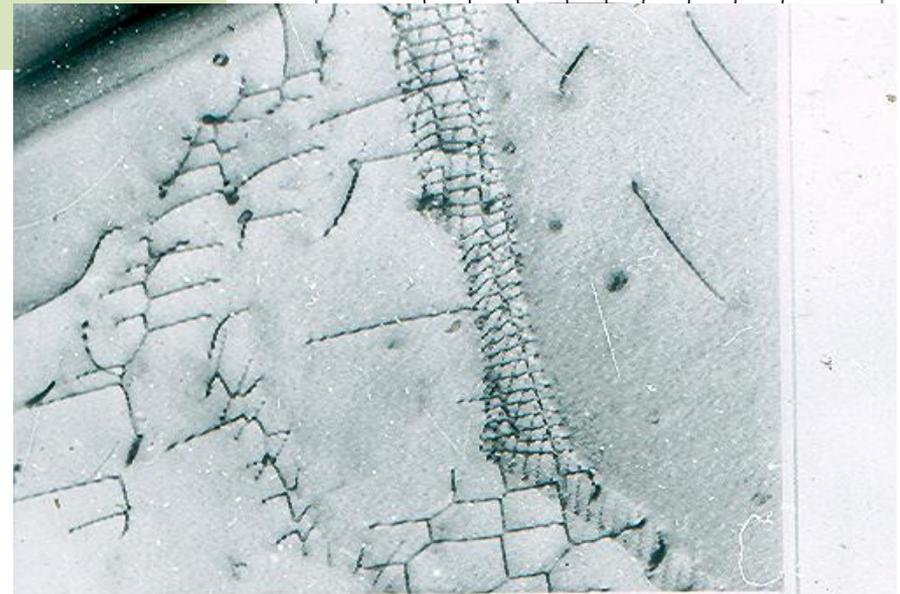
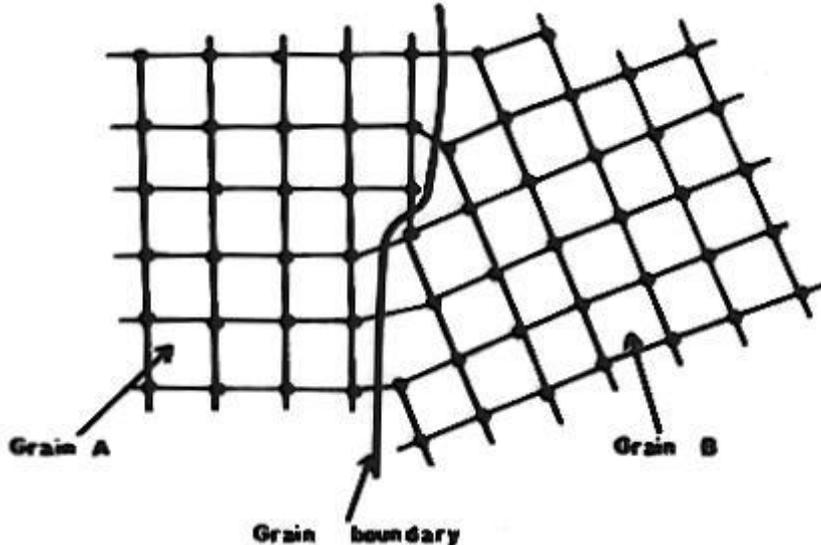
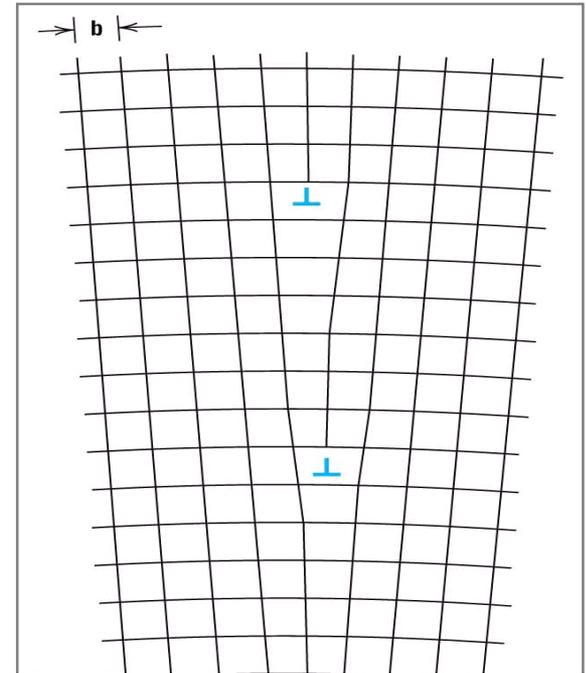
- deux phases : a et b
- trois constituants : α_p , eutectique et β_s

Métallurgie

Défauts de la structure cristalline

Nature des joints de grains

- Le joint de grain est un empilage de dislocations, dont la complexité dépend du décalage entre les cristaux voisins
- En cas de décalage faible suivant un seul axe, la distance entre dislocations vaut $D=b/\theta$
- Lorsque les décalages entre cristaux sont plus importants, les empilages de dislocations sont tridimensionnels



30.000X

Métallurgie

Notion d'alliage métallique

Alliage = solide obtenu par cristallisation d'un mélange de au moins 2 métaux liquides.

Après solidification, on obtient un solide polycristallin et dans ce réseau, on va trouver des atomes des deux métaux (ex : Au-Cu, Fe-C).

trois phases différentes peuvent former un alliage : un métal pur, une solution solide ou un composé intermétallique

Une solution solide est un mélange d'éléments à l'échelle atomique, et c'est analogue à un mélange de liquides qui sont solubles l'un dans l'autre. Il a deux types de solutions solides : solution solide de substitution et solution solide d'insertion.

Les phases intermédiaires (composés intermétalliques)

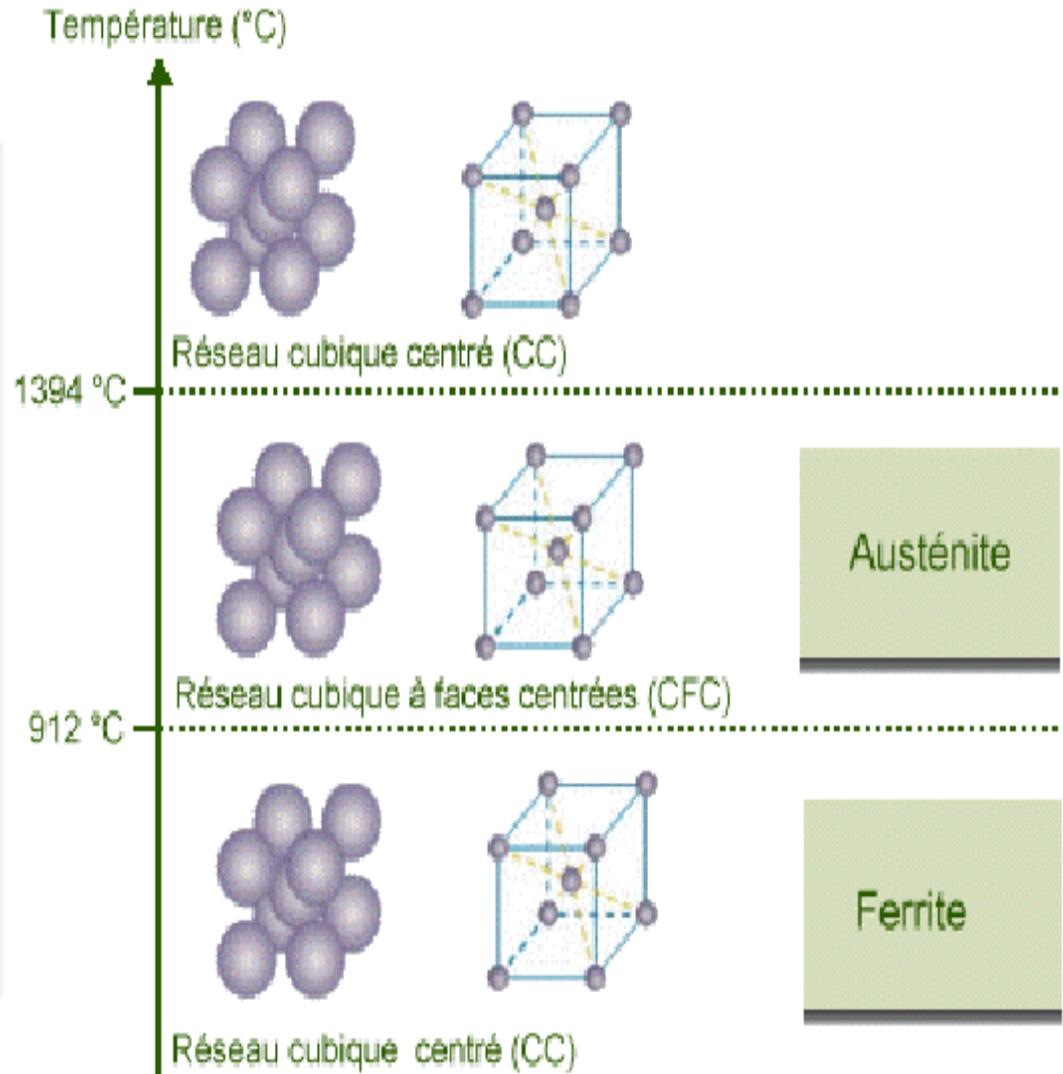
Lorsque l'alliage existe en une proportion très simple qui ressemble à une formule chimique, on observe également une solubilité limitée. Ces solutions solides forment des composés intermédiaires avec une stoechiométrie (composition atomique) définie. On parle dans ce cas de phases ou composés intermédiaires (ou composés intermétalliques dans le cas des métaux).

Métallurgie

Système Fer -Carbone

Fer

En fonction de la température, le fer pur présente différentes formes de réseaux cristallographiques. D'un réseau cubique centré CC (fer α ou ferrite) à basse température, le fer se transforme en réseau cubique à faces centrées CFC (fer γ ou austénite) à 912°C pour ensuite retrouver un réseau cubique centré à haute température avant la transformation solide -Liquide.



Le carbone et ses caractéristiques

C'est un élément non métallique peut abondant, (0,1% en masse dans l'écorce terrestre). Il est rare à l'état libre, on le rencontre à l'état combiné dans toutes les substances végétales et animales comme dans le pétrole, le charbon, le bois, etc.

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Numéro atomique : 6.**
- Masse atomique : 12.**
- Rayon atomique : 0,77 Å.**
- Masse volumique : 2,5 g/cm³.**
- Température de fusion : 3500°C.**

C'est un élément polymorphe et il existe deux variétés cristallines dans les conditions ordinaires, le diamant et le graphite. La variété du diamant est métastable à réseau cristallin C.F.C et il est classé comme le plus dur des corps solides, c'est aussi un isolant électrique.

Métallurgie

Transformation dans les aciers : Système Fer - Carbone

Il existe deux diagramme:

Diagramme *STABLE* (avec graphite) : Fe – C

Diagramme *METASTABLE* (avec cémentite) : Fe – Fe₃C

Caractéristiques :

Points particuliers :

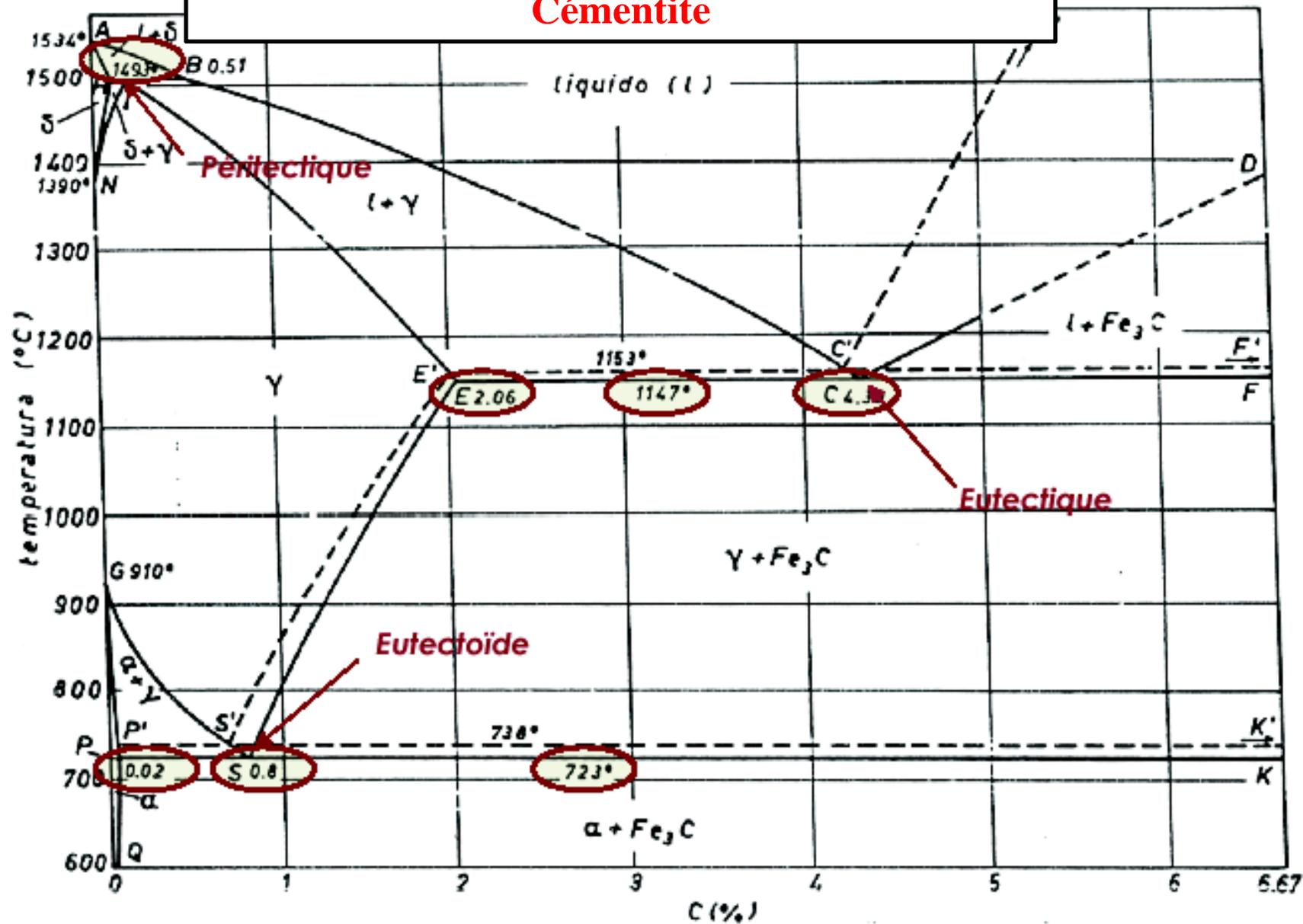
Eutectique (métastable : 1147°C, 4.3% de C)

Péritectique (métastable : 1493°C, 0.16% de C)

Eutectoïde (métastable : 723°C, 0.8% de C)

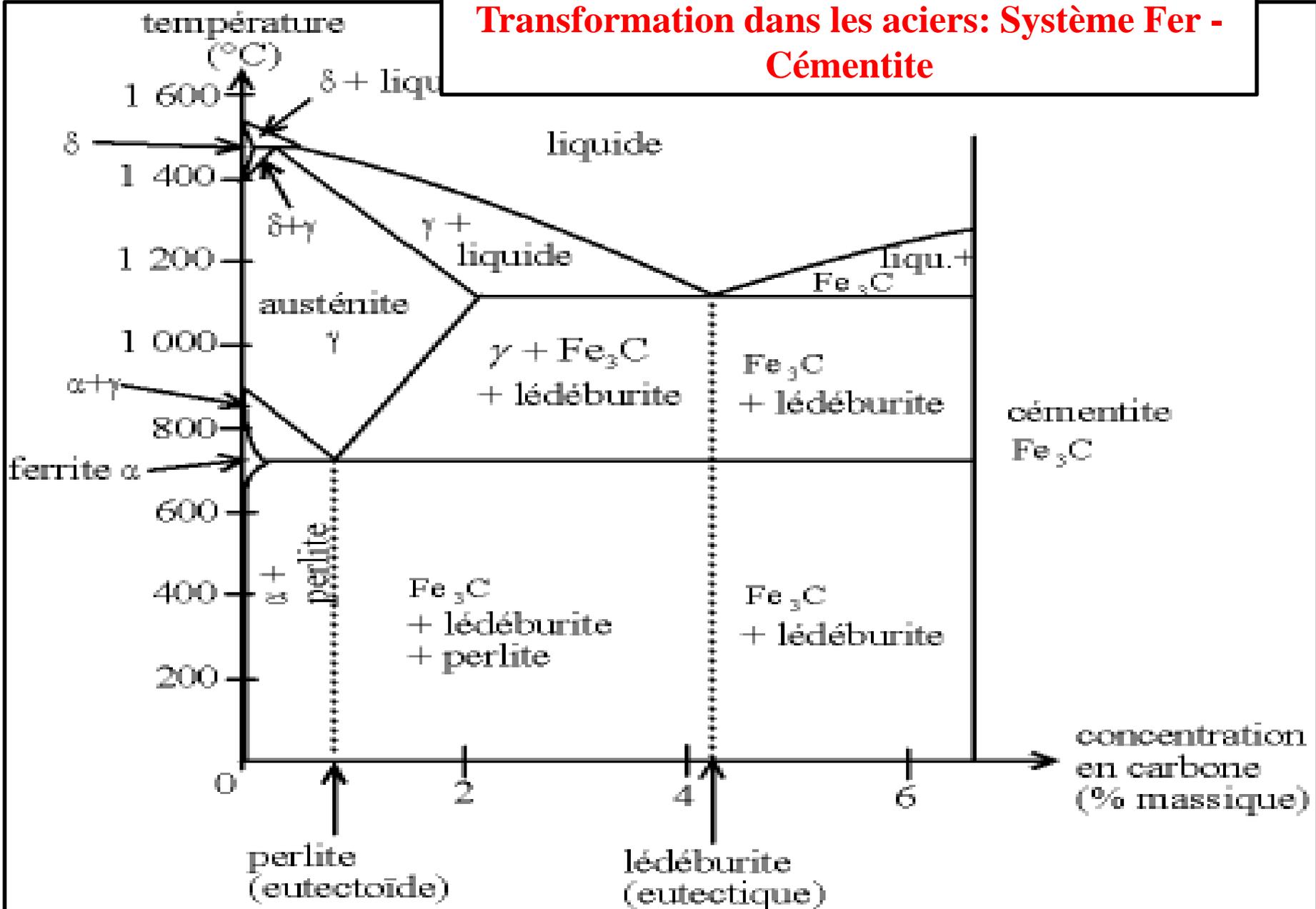
Métallurgie

Transformation dans les aciers: Système Fer - Cémentite



Métallurgie

Transformation dans les aciers: Système Fer - Cémentite



Transformation dans les aciers : Système Fer -Carbone

les phases solides possibles :

La ferrite

Solution solide de carbone dans le fer .(cc)

0.008% de carbone à température ambiante et environ 0.025% de

Ductile et malléable :

80 à 100 HV , $R_m \sim 300 \text{Mpa}$ et un $A\% \sim 35\%$.

La ferrite est magnétique jusqu'à 770 °C (point de curie).

L'austénite

Solution solide de carbone dans le fer gamma .Elle est très ductile entre 22 et 31 HRC. la quantité de carbone atteint 1.7% à 1145°C , ce constituant n'existe pas à la température ordinaire , il est stable qu'à haute température. il ne peut exister à la température ambiante que par un maintien hors équilibre à la faveur d'éléments d'alliages dit gammagènes (ex. Ni et Mn). C'est le cas des aciers austénitiques.

Transformation dans les aciers : Métallurgie

Système Fer -Carbone

Cémentite :

- composé défini : Fe_3C ;
- contient 6.67% de carbone

Graphite :

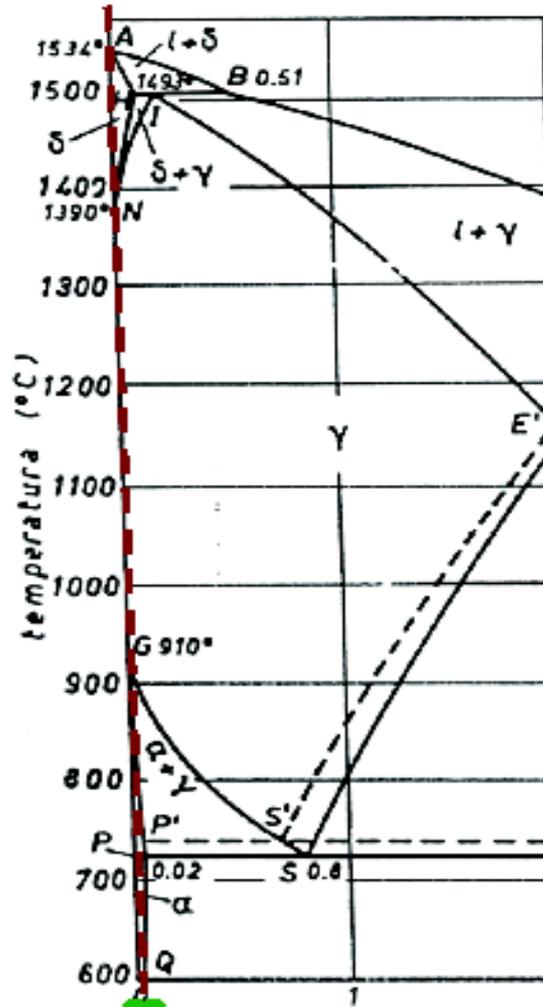
- carbone pur (100%)

Perlite :

- produit eutectoïde stable : *ferrite α + cémentite*;
- contient en moyenne 0.77% de carbone;
- structure lamellaire ou globulaire

- magnétique,
- moins ductile que la ferrite ($A\% = \sim 10$),
- dureté aux environs de 14 à 23.5 HRC,
- $R_m = \sim 830$ Mpa
- Facile à usiner,
- Offre une assez bonne résistance aux efforts statiques,
- Assez résistante à l'usure par frottements.

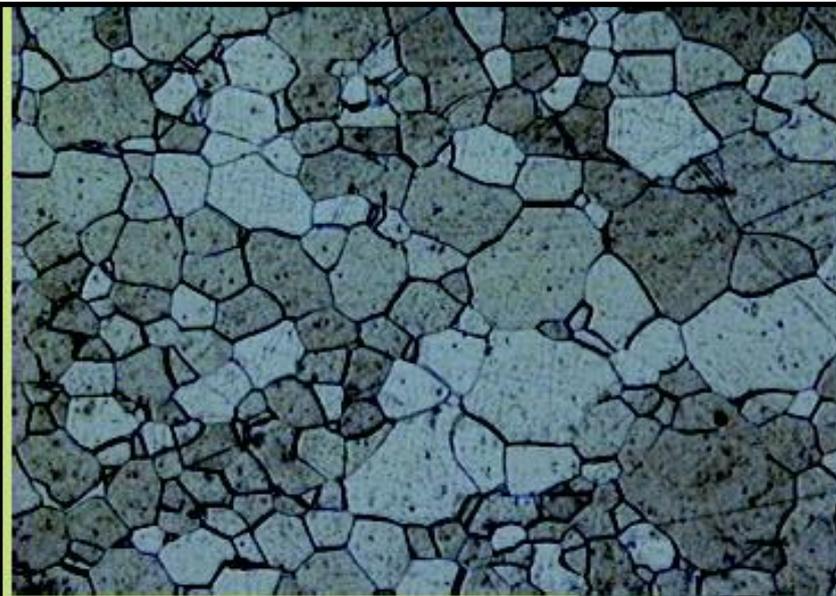
Transformation dans les aciers : Système Fer –Cémentite/ACIERS DOUX



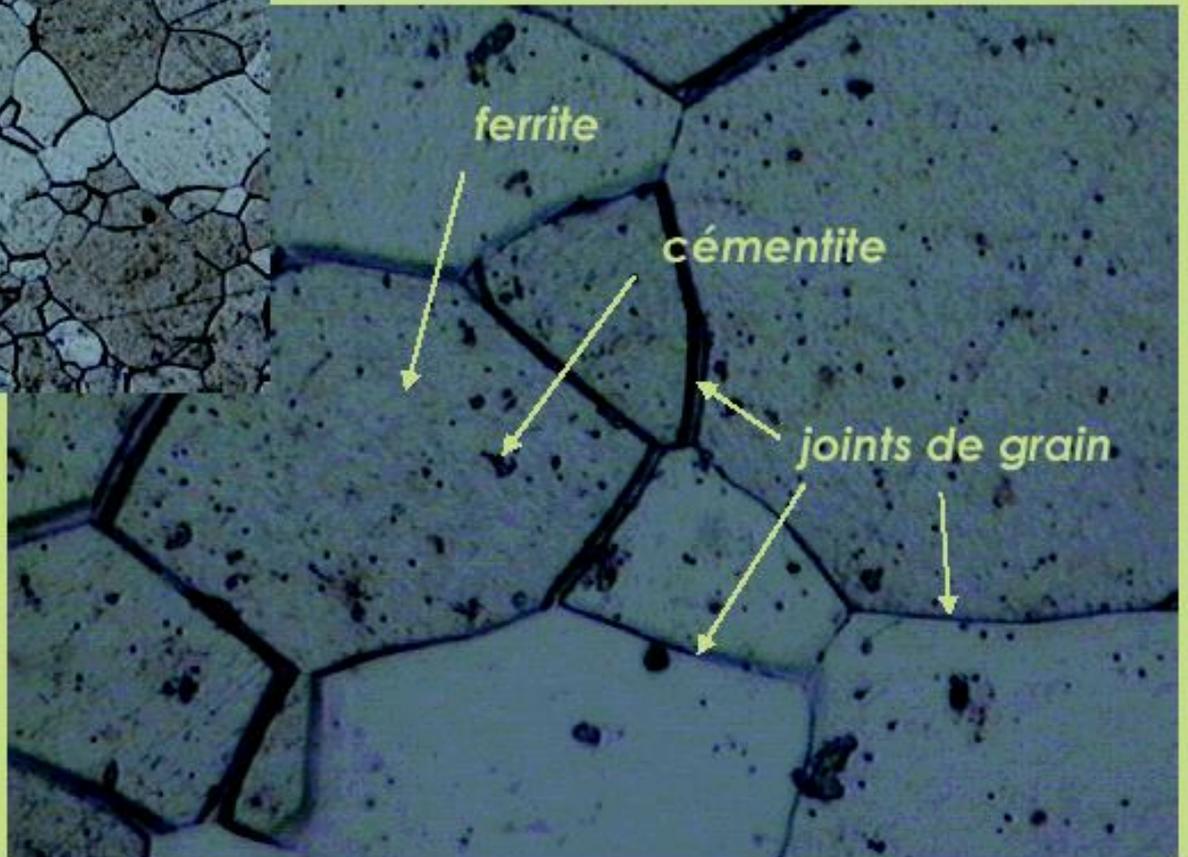
G-P : transformation allotropique
P-Q : limite de solubilité

- **ACIER :**
→ % de C < 2.06%
- **ACIER DOUX :**
→ % de C < 0.02%
- **Propriétés microscopiques:**
 - 1 phase = **Ferrite** (avec insertion de carbone 10^{-5} au max à 20 °C)
 - Précipités secondaires = **cémentite**
- **Propriétés mécaniques:**
 - **Très ductile** : Allongement ~40%
 - Limite élastique faible ~100-200 MN/m²
- **Utilisation :**
 - Emboutissage

Transformation dans les aciers : Système Fer – Cémentite/ACIERS DOUX



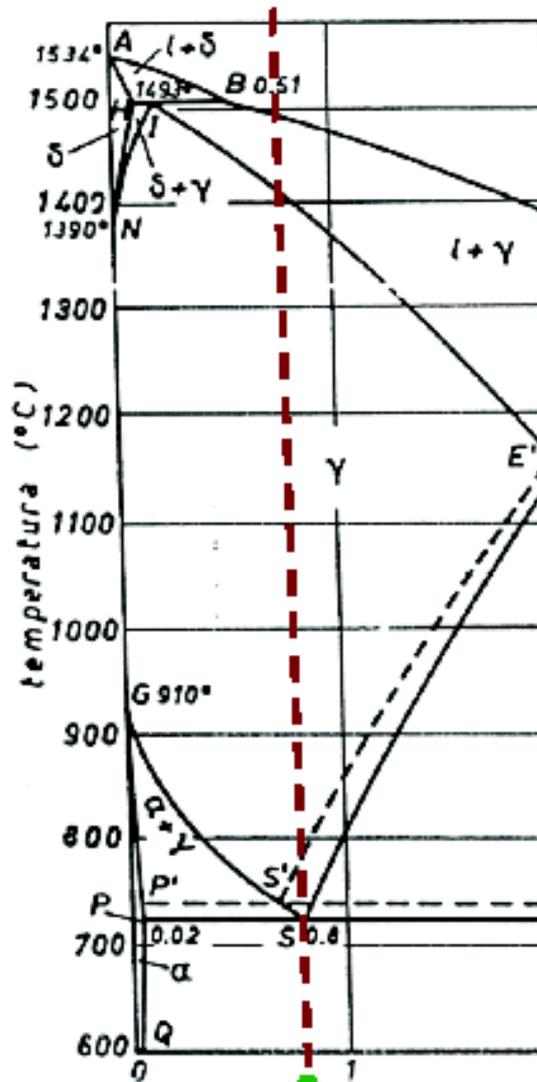
100x



500x

Métallurgie

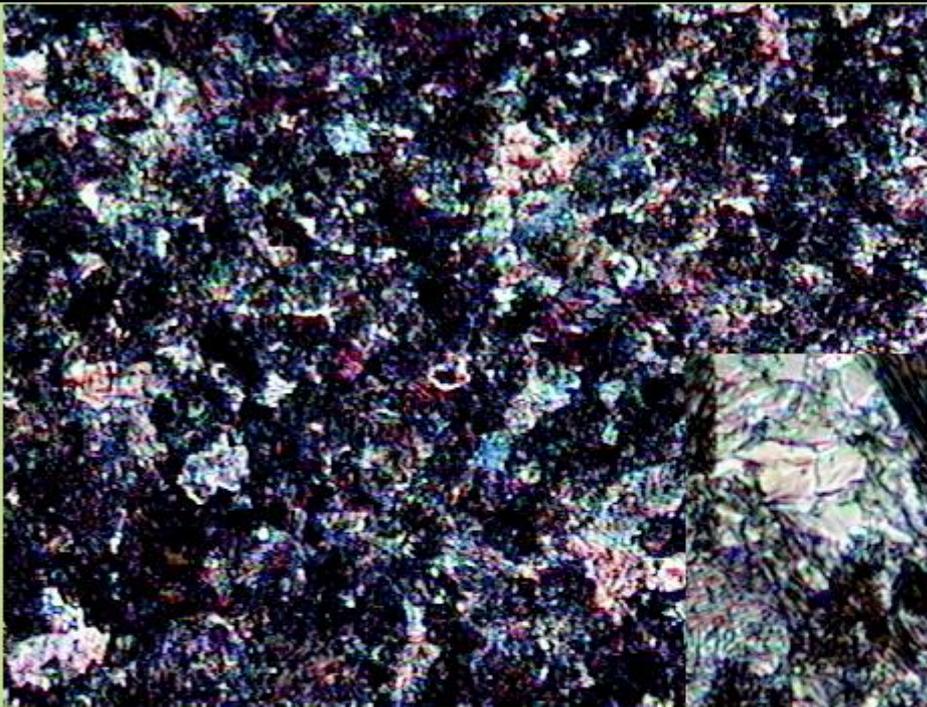
Systeme Fer –Cémentite/ACIERS EUTECTOÏDE



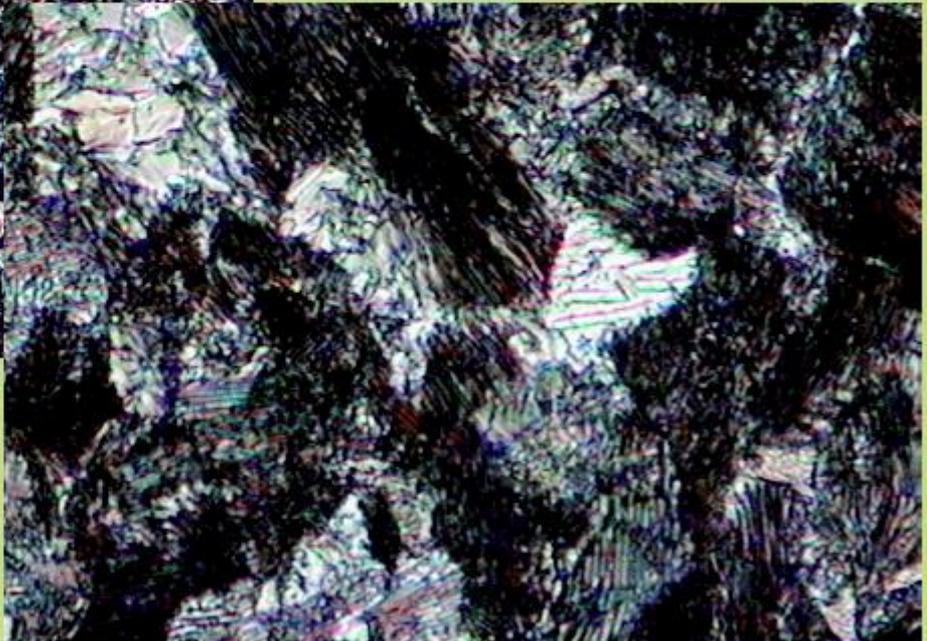
- **ACIER EUTECTOÏDE :**
 - % de C = **0.8%**
- **Etapes caractéristiques :**
 - Liquide → Austénite
 - → Perlite
- **Propriétés microscopiques :**
 - **Composition :**
 - **Perlite UNIQUEMENT = lamelles**
 - Ferrite (88.3%)
 - Cémentite (11.7%)
 - Précipité secondaire :
 - **Cémentite** (dans la ferrite)
- **Propriétés mécaniques :**
 - Fonction de la finesse
 - Très résistant
- **Utilisation :**
 - Câbles de précontrainte
 - Courroies transporteuses
 - Flexibles hydrauliques...

Métallurgie

Systeme Fer -Cémentite/ACIERS EUTECTOIDE



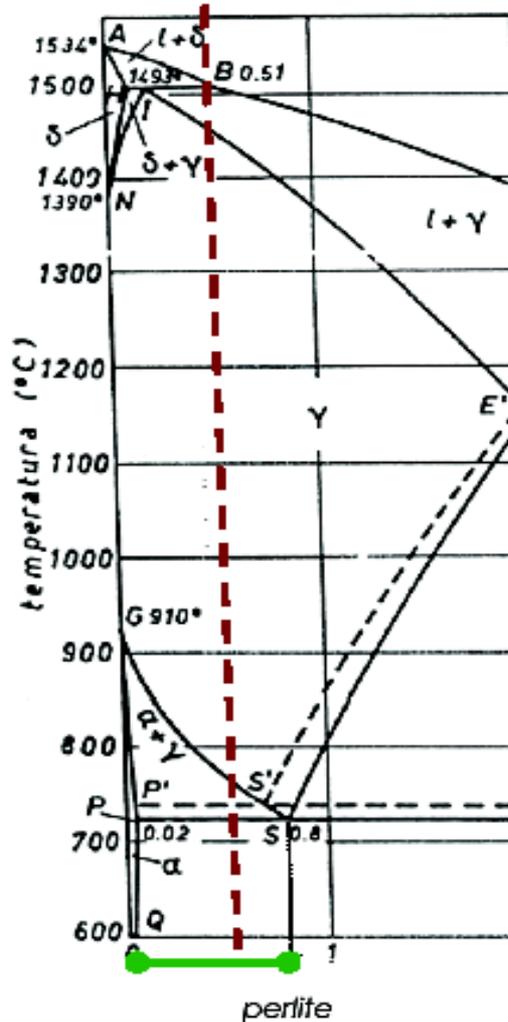
100x



500x

Métallurgie

Système Fer –Cémentite/ACIERS HYPOEUTECTOÏDE



■ ACIER HYPOEUTECTOÏDE :

→ **0.02 < % de C < 0.8%**

■ Etapes caractéristiques :

- Liquide → ...
- ... → Austénite
- → Ferrite (proeutectoïde) + Austénite
- → Ferrite (proeutectoïde) + Perlite

■ Propriétés microscopiques :

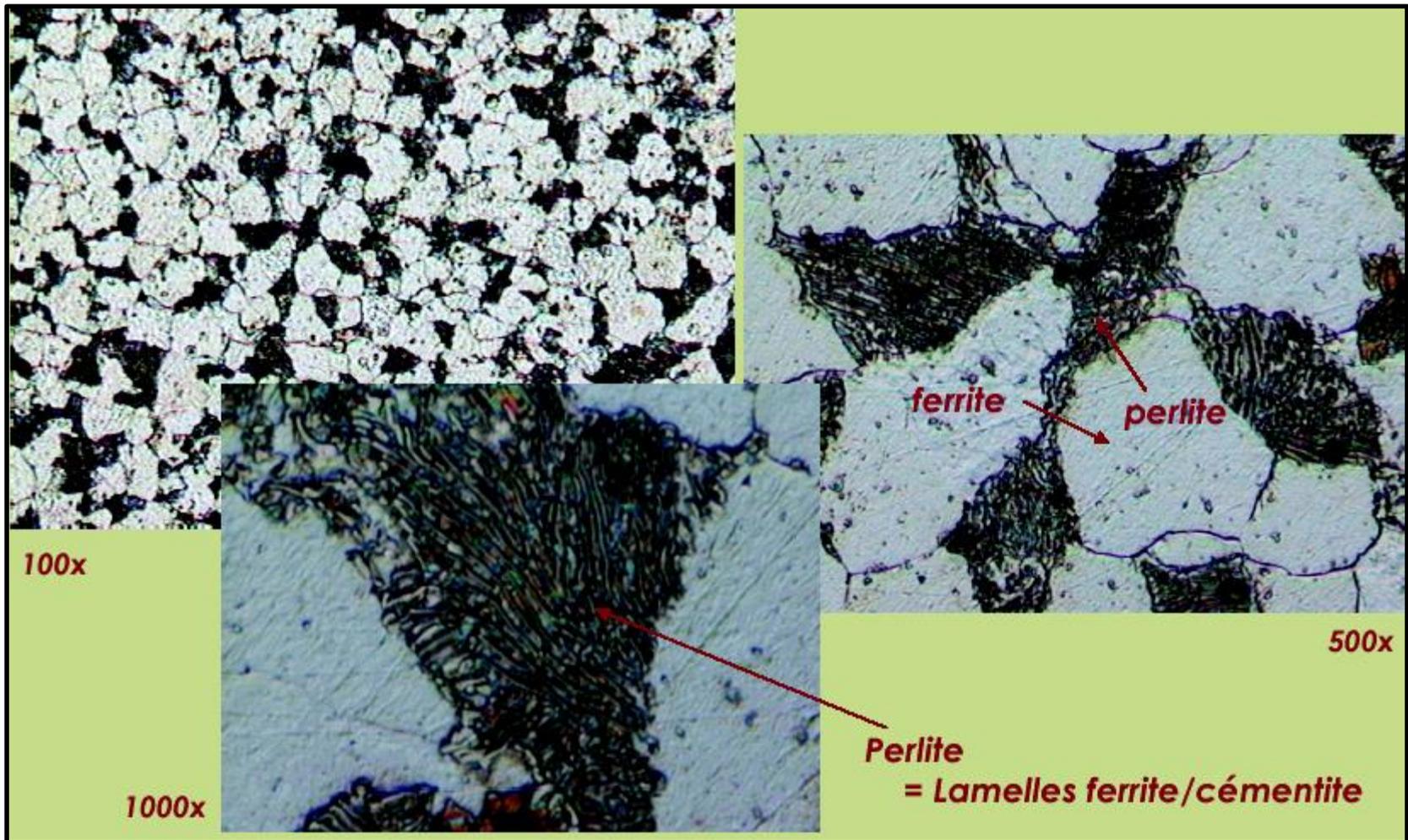
- Composition :
 - **Ferrite** (avec insertion de carbone 10^{-5} au max à 20 °C)
 - **Perlite** = lamelles ferrite/cémentite
- Précipité secondaire
 - **Cémentite** (dans la ferrite)

■ Propriétés mécaniques :

- **A CALCULER !**
- Sont fonction de :
 - Proportion
 - Propriétés } Perlite/Ferrite

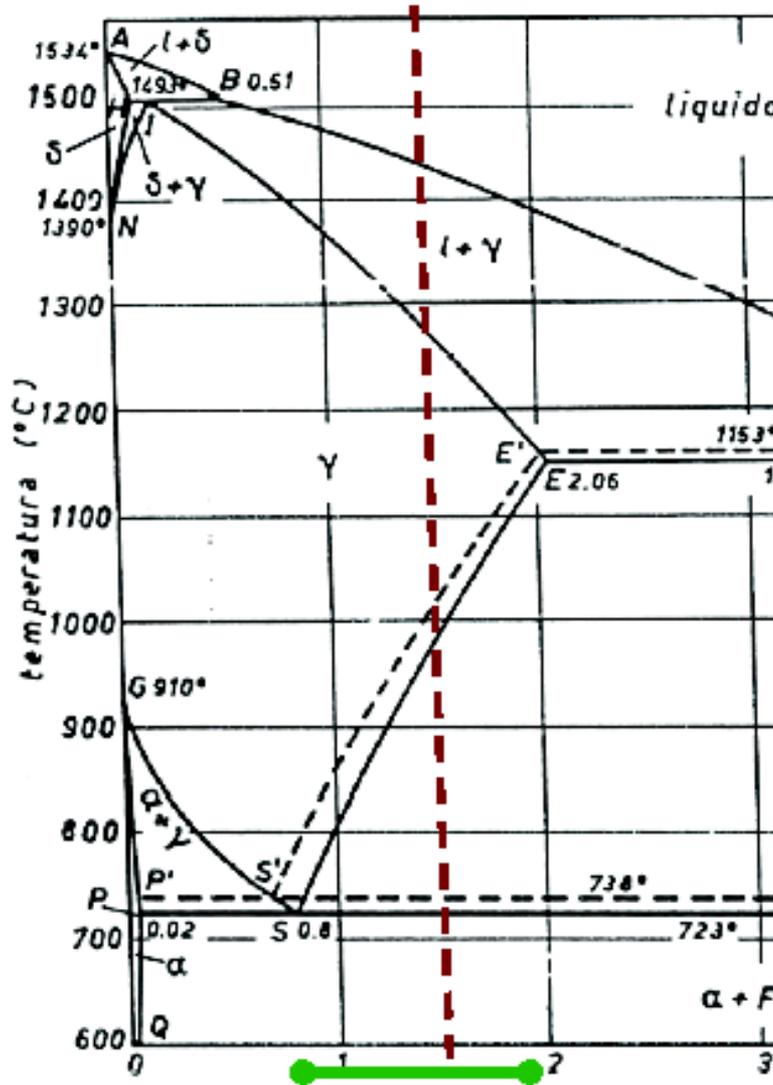
Métallurgie

Systeme Fer -Cémentite/ACIERS HYPOEUCTOIDE



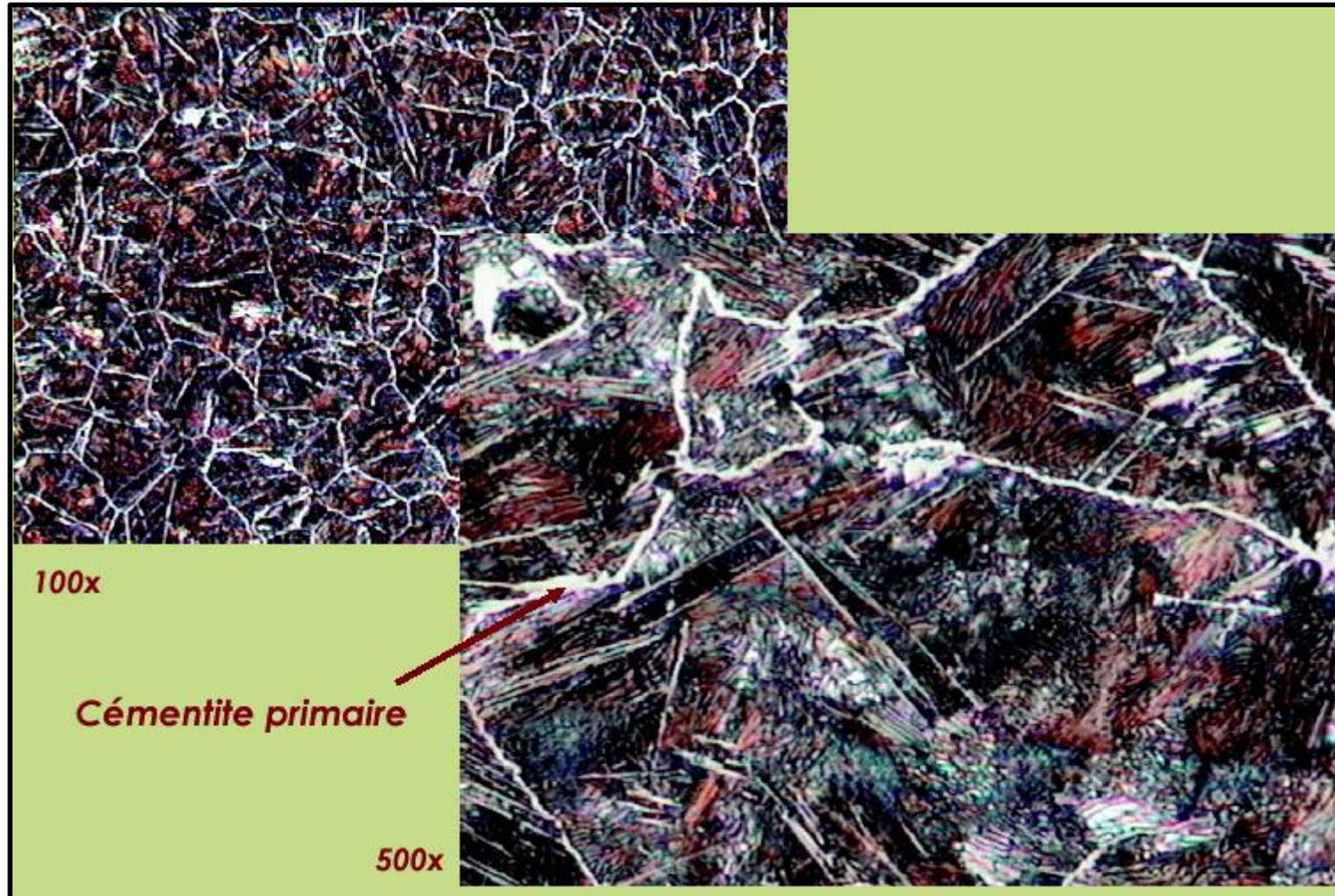
Métallurgie

Système Fer –Cémentite/ACIERS HYPEREUTECTOÏDE

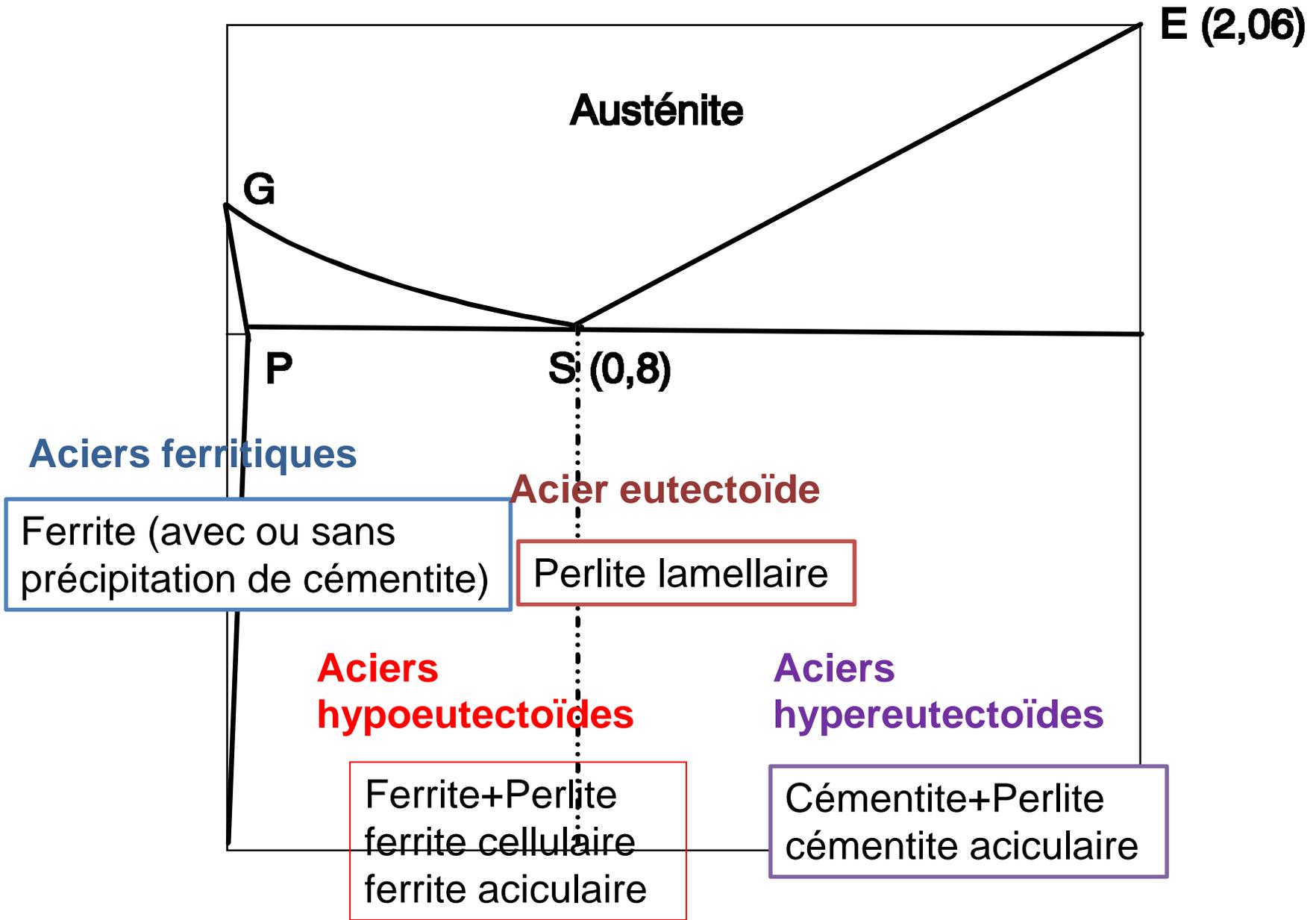


- **ACIER HYPEREUTECTOÏDE :**
 - **0.8 < % de C < 2.06%**
- **Étapes caractéristiques :**
 - Liquide → Austénite
 - → Cémentite (proeutect.) + Austénite
 - → Cémentite (proeutect.) + Perlite
- **Propriétés microscopiques :**
 - **Composition :**
 - **Cémentite** (primaire ou proeutectoïde)
 - **Perlite** (=eutectoïde)
= lamelles ferrite/cémentite
(88.3%) (11.7%)
 - **Précipité secondaire**
 - **Cémentite** (dans la ferrite)
- **Propriétés mécaniques :**
 - *Difficiles à évaluer !*
 - *Cémentite → propriétés inconnues*

Transformation dans les aciers : Système Fer – Cémentite/ACIERS HYPEREUTECTOIDE

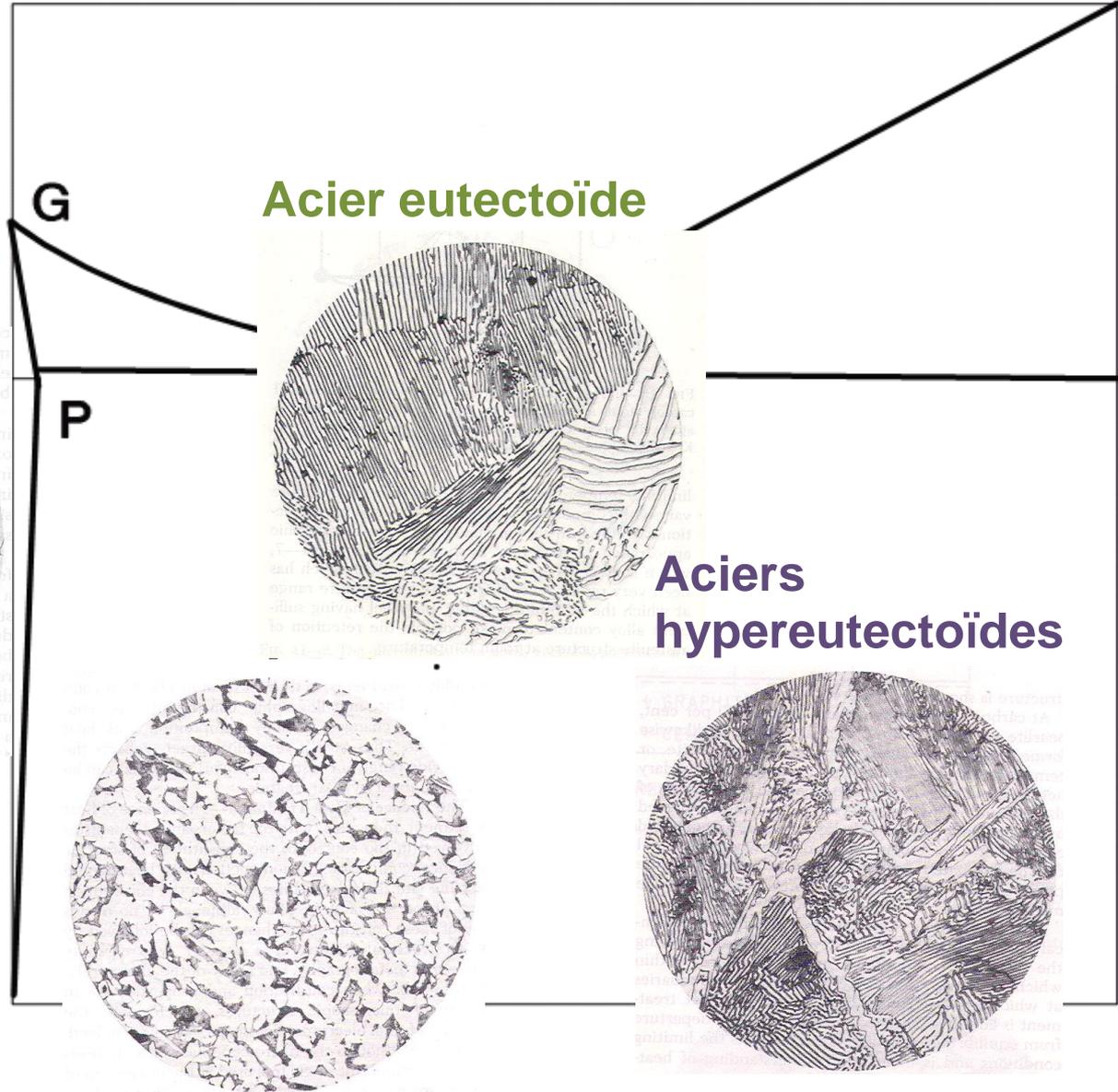


Transformation dans les aciers : Structure des aciers



Transformation dans les aciers : Structure des aciers

E (2,06)



Aciers ferritiques

Acier eutectoïde

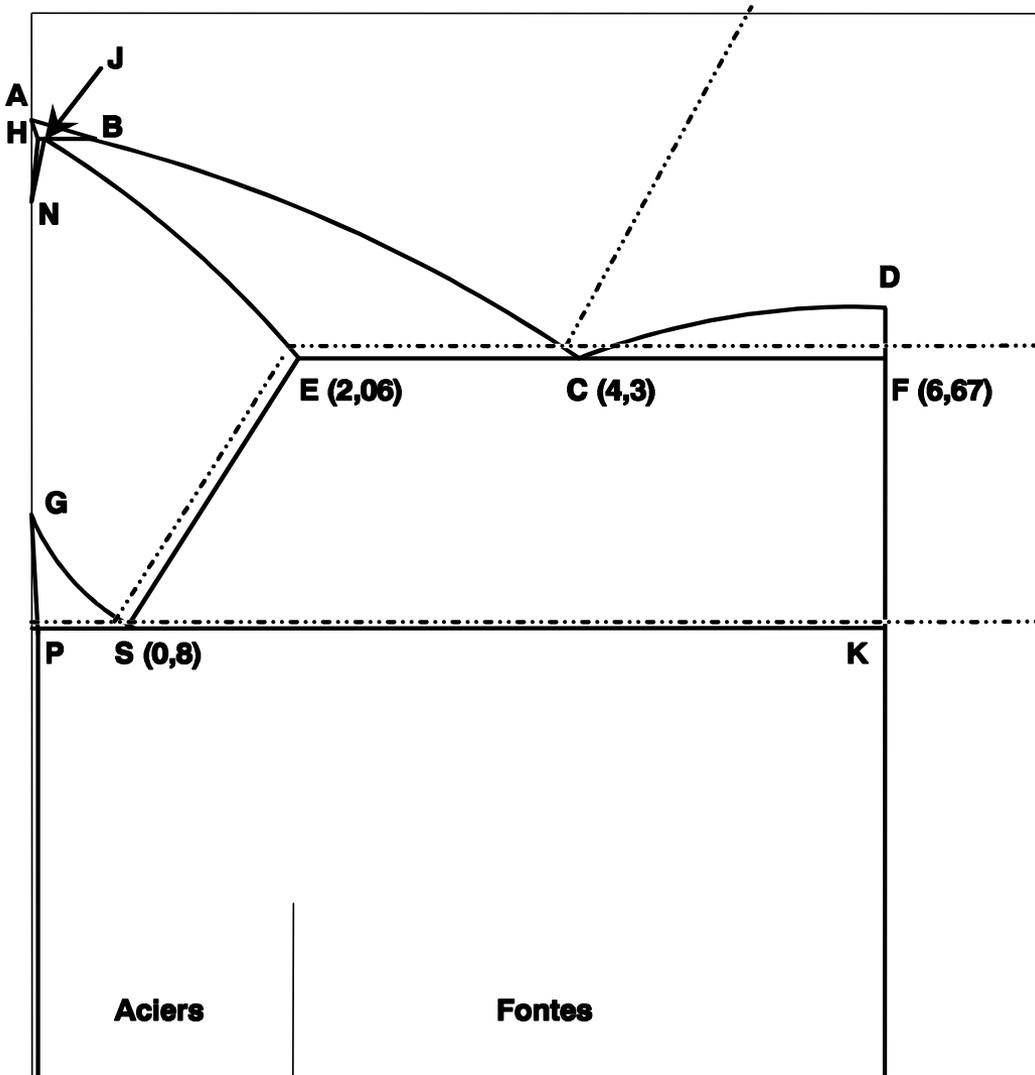
Aciers hypereutectoïdes

Aciers hypoeutectoïdes

Propriétés mécaniques des phases

	Re Mpa	Rr Mpa	Ar %	Dureté Brinell
• Ferrite pure	100	200	50	75
• Ferrite impure	200	300	40	80
• Cémentite				550
• Perlite grossière	350	625	20	185
• Perlite moyenne	450	850	15	205
• Perlite fine	550	1075	10	225

Les 3 types de fontes



1. Fontes blanches
fer-cémentite

2. Fontes malléables
fer-graphite

3. Fontes grises
solidification fer-graphite
transformations
allotropiques fer-cémentite

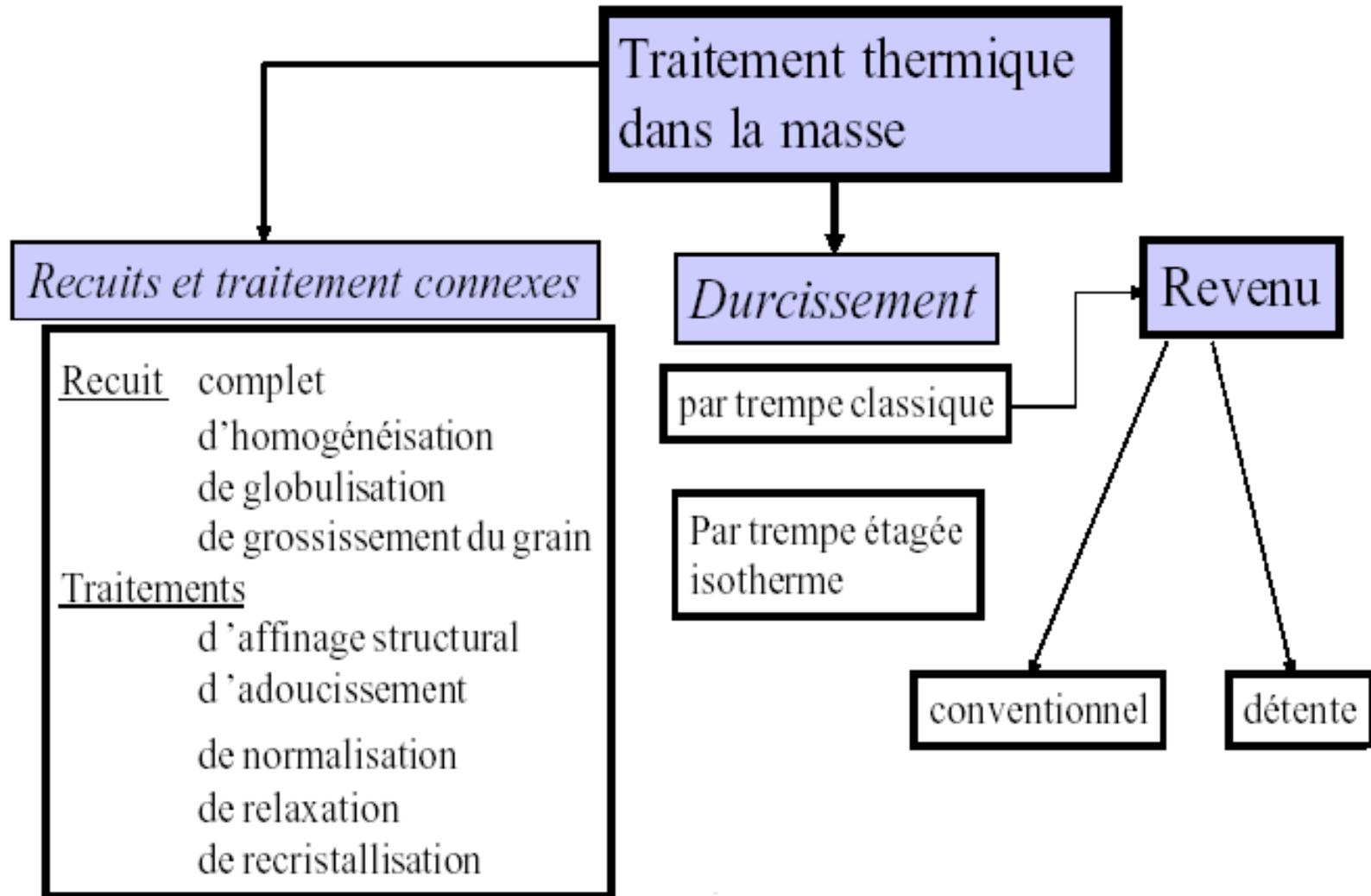
Traitements thermiques

Un traitement thermique est une opération qui a pour but de modifier la structure interne d'un acier, sans influencer sur sa composition chimique, afin de donner à cet acier les caractéristiques mécaniques convenables pour son emploi.

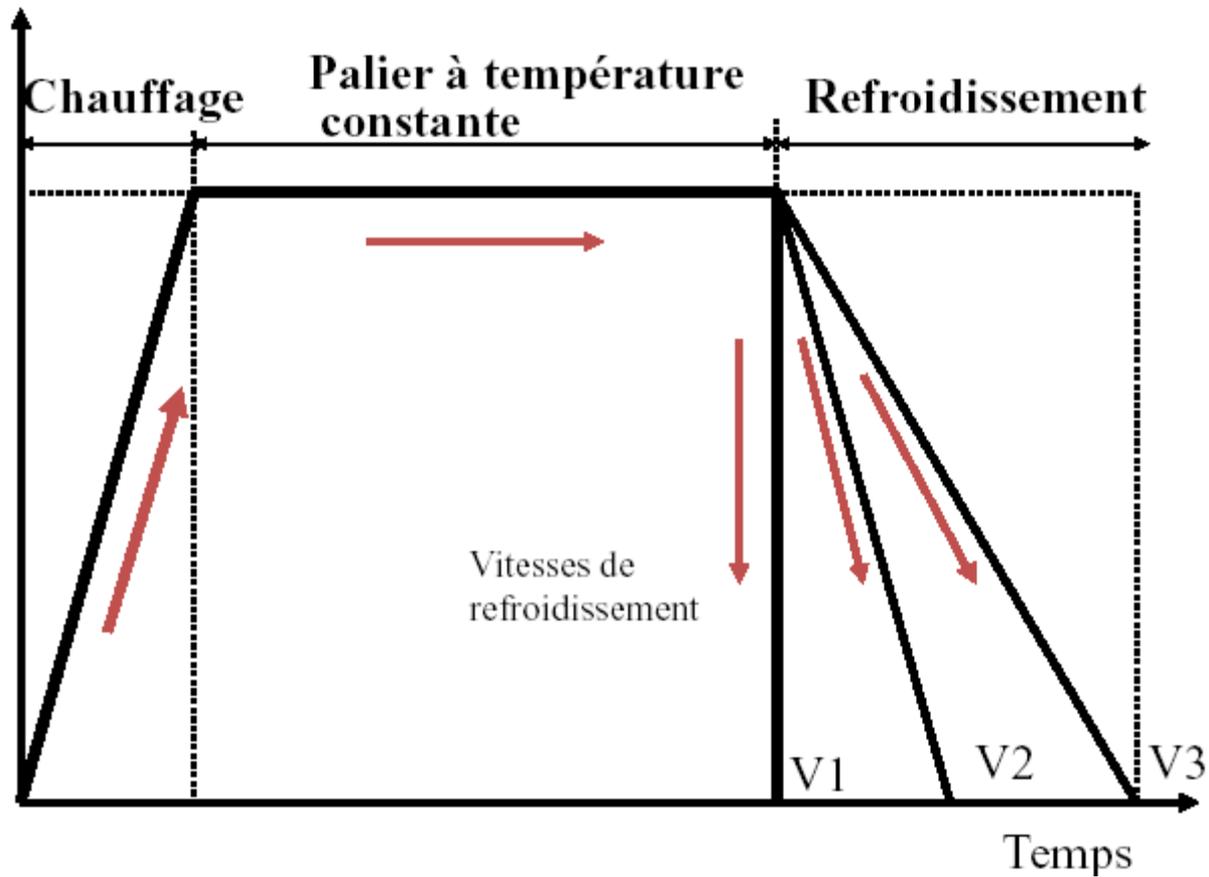
(Les traitements thermiques influent sur : R_r , R_e , H , K , $A\%$. On peut les subdiviser en trois groupes :

- 1) Les recuits ;**
- 2) Les trempes ;**
- 3) Les traitements d'amélioration (revenus).**

Traitements thermiques



Traitements thermiques



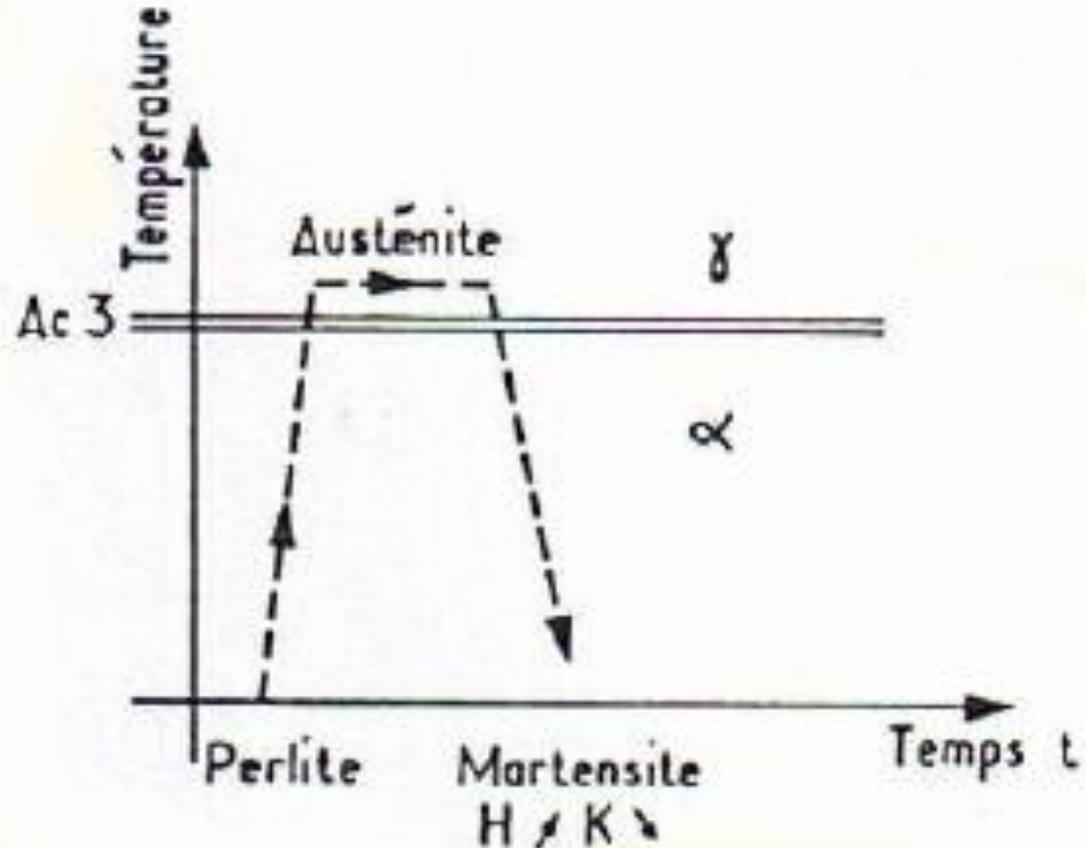
Cycle de traitement thermique

Traitements thermiques

La trempe : porter l'acier à température $A3+50^\circ$ puis refroidir rapidement.

Conséquences :

Rr = ↗
Re = ↗
H = ↗
K = ↘
A% = ↘



Traitements thermiques

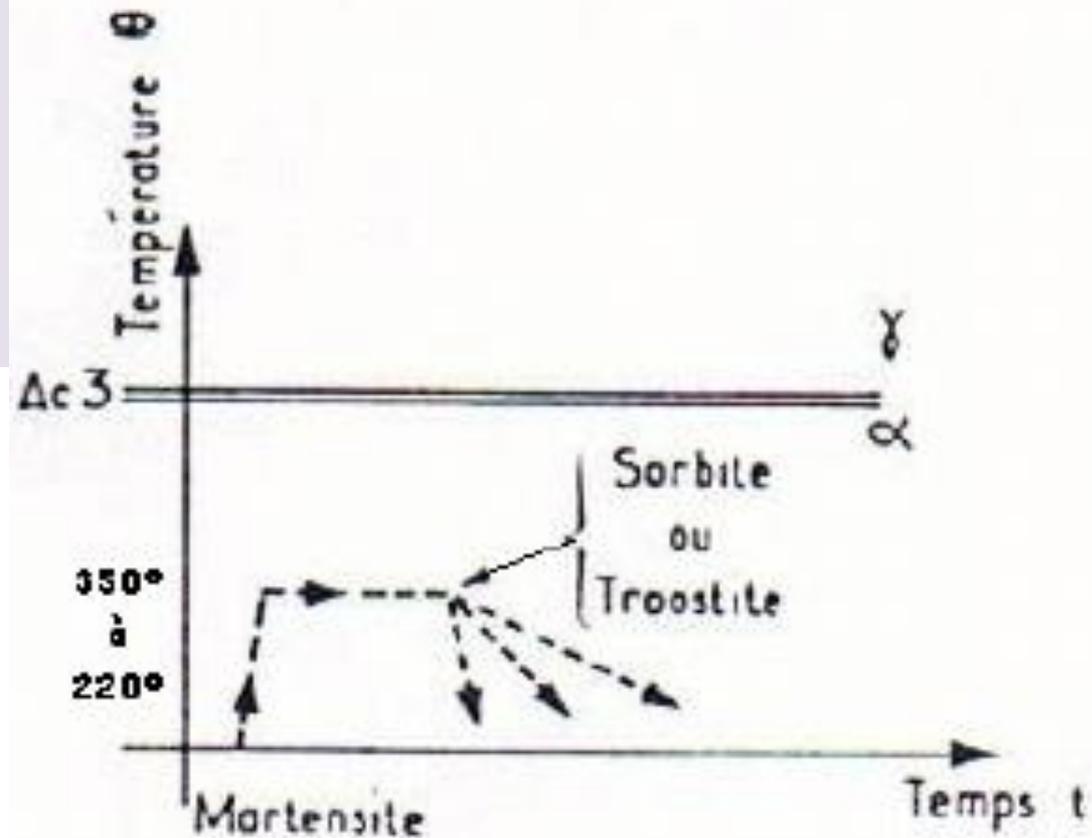
Le revenu : s'applique aux aciers trempés, il a pour but de rendre l'acier moins fragile.

Température du revenu = 220° à 350°

Conséquences :

H= ↘

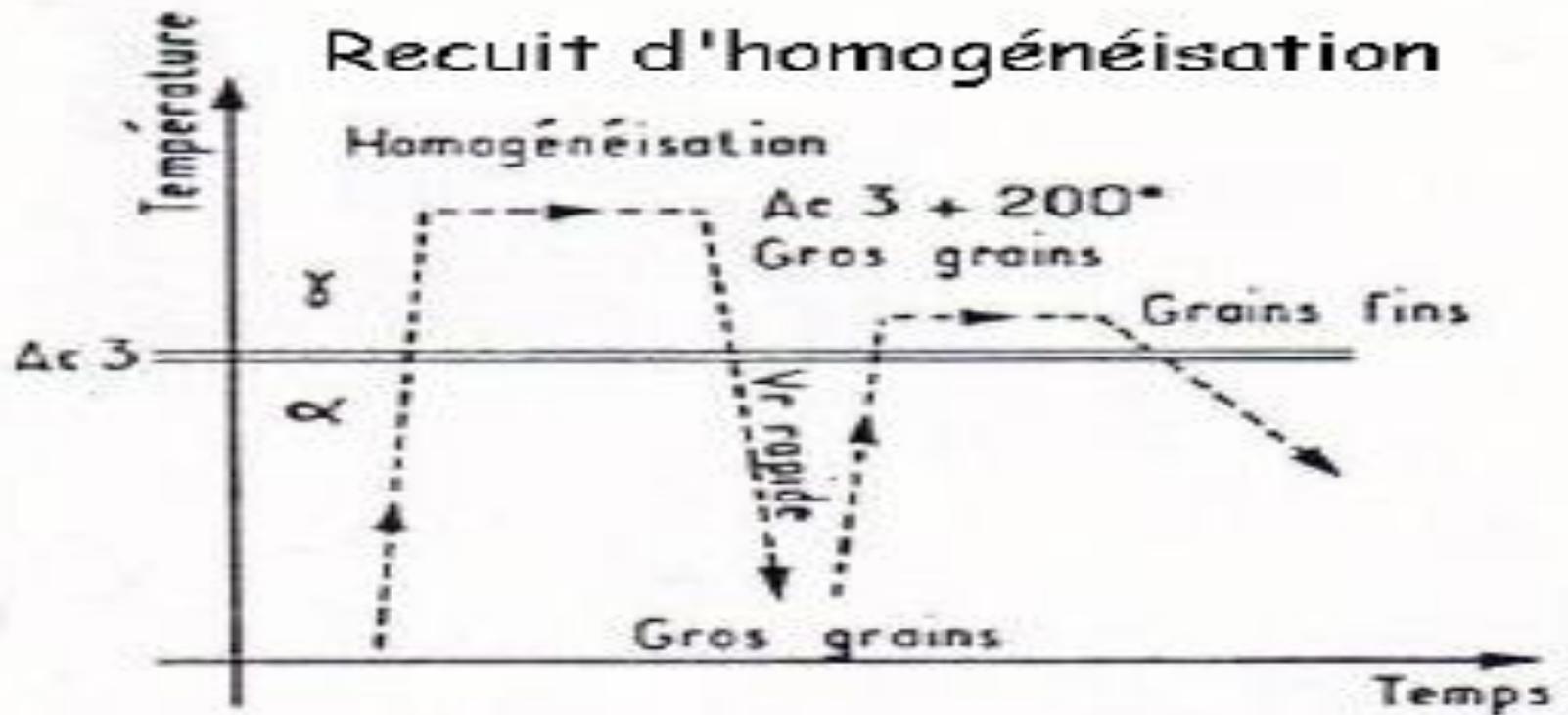
K= ↗



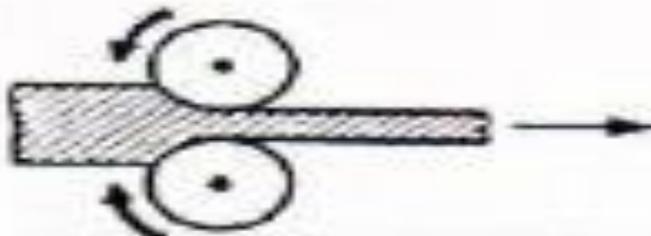
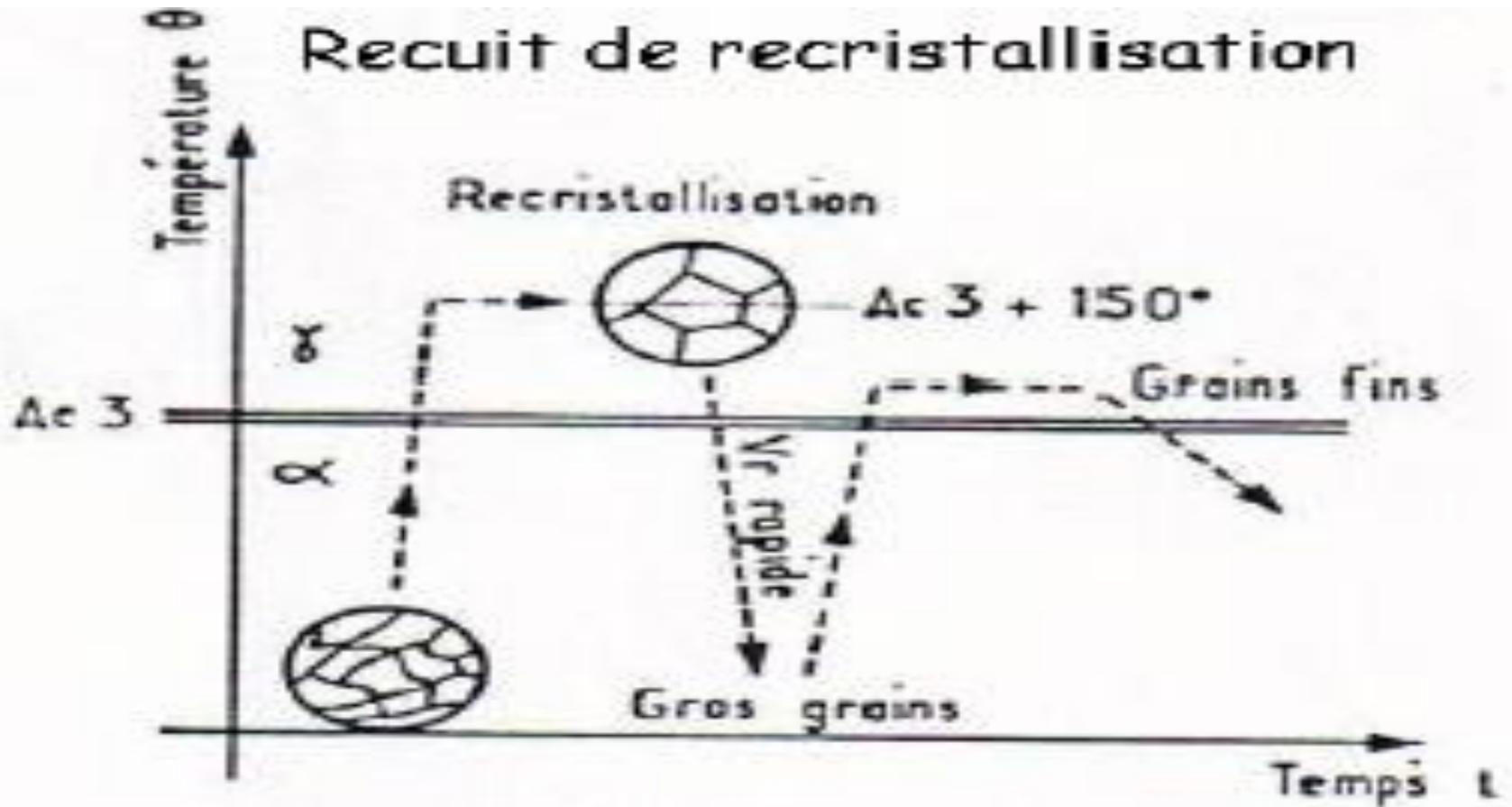
Traitements thermiques

Le recuit : annule les effets de la trempe.

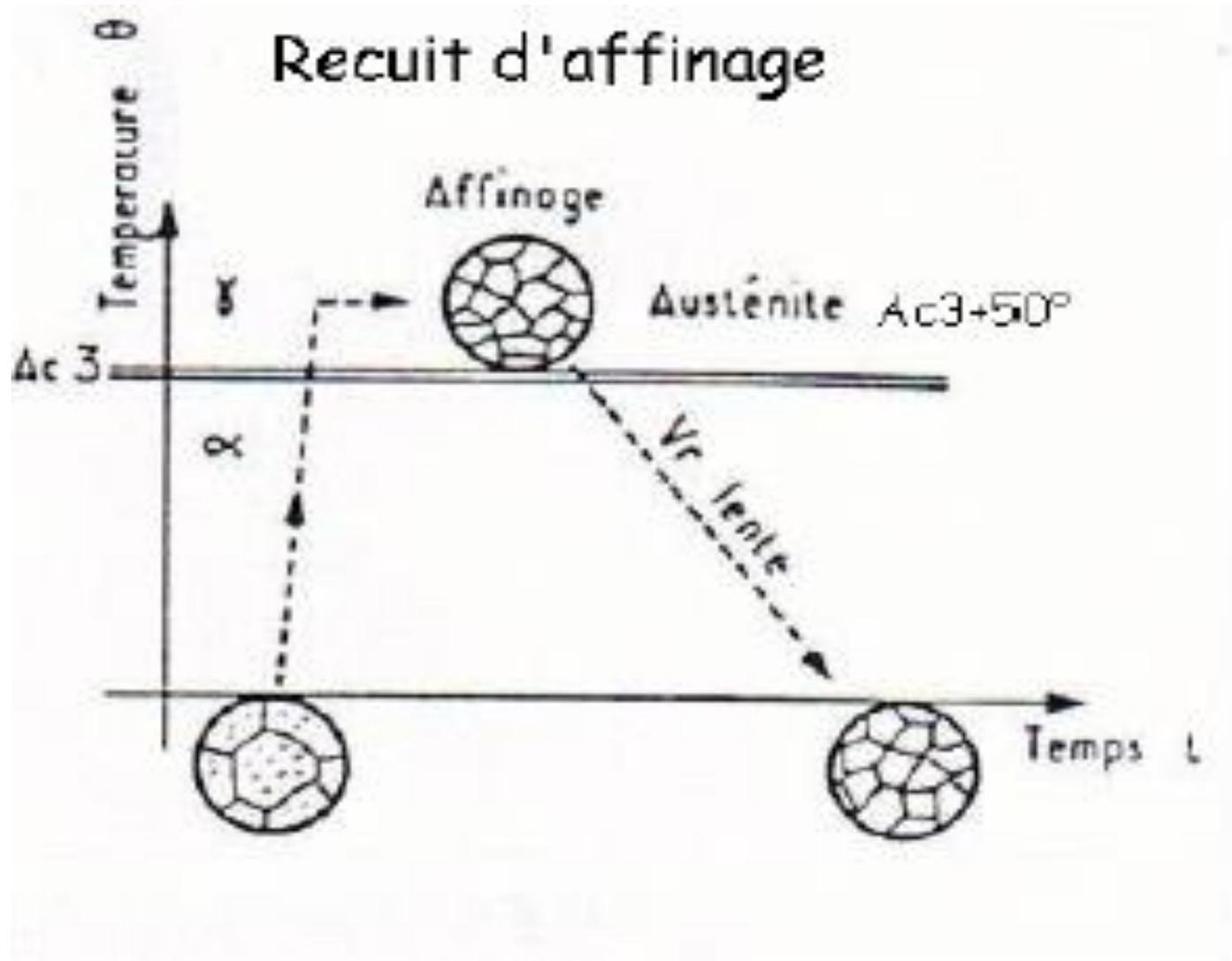
Le recuit de stabilisation appelé aussi traitement de détente est celui pratiqué sur les assemblages soudés



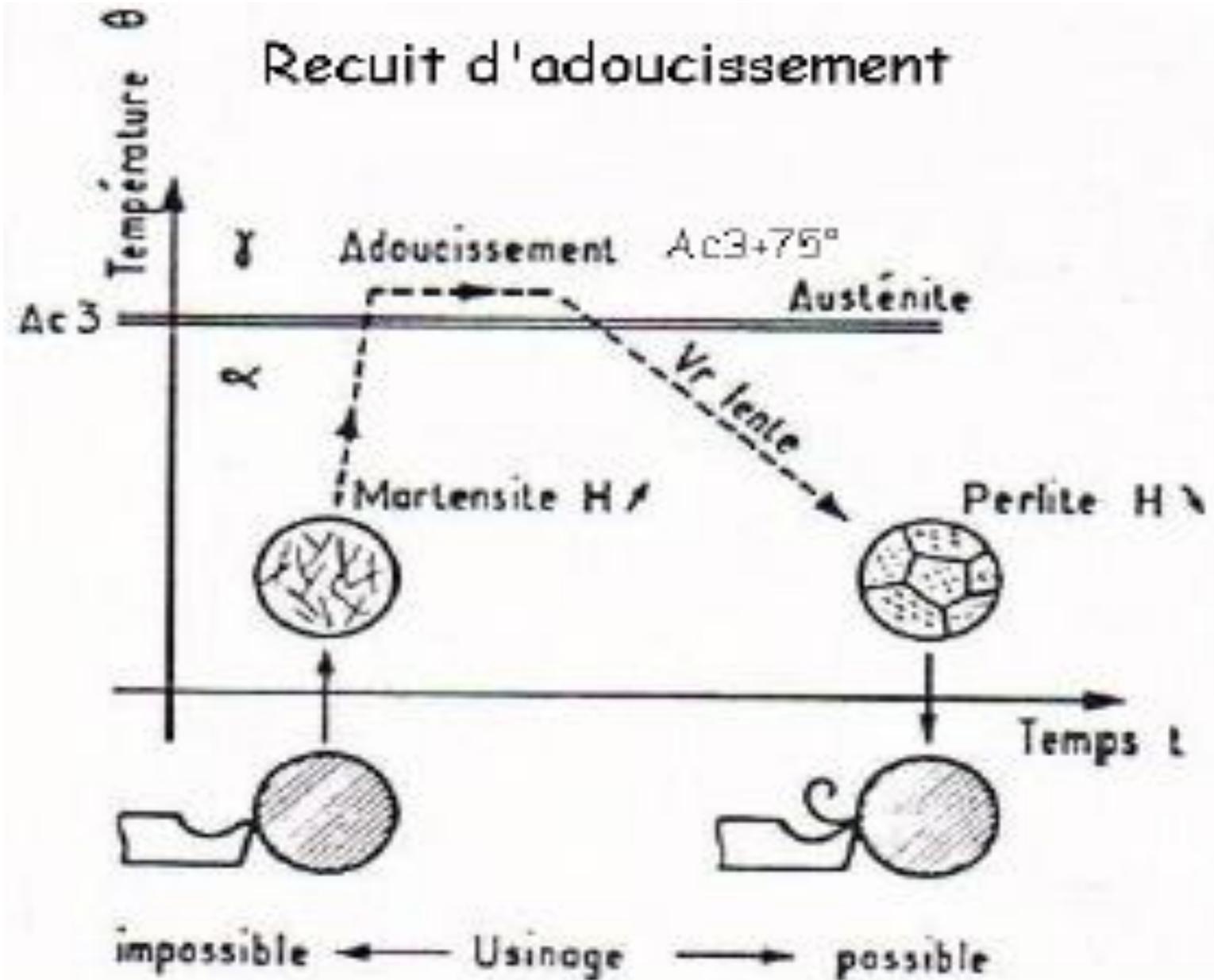
Traitements thermiques



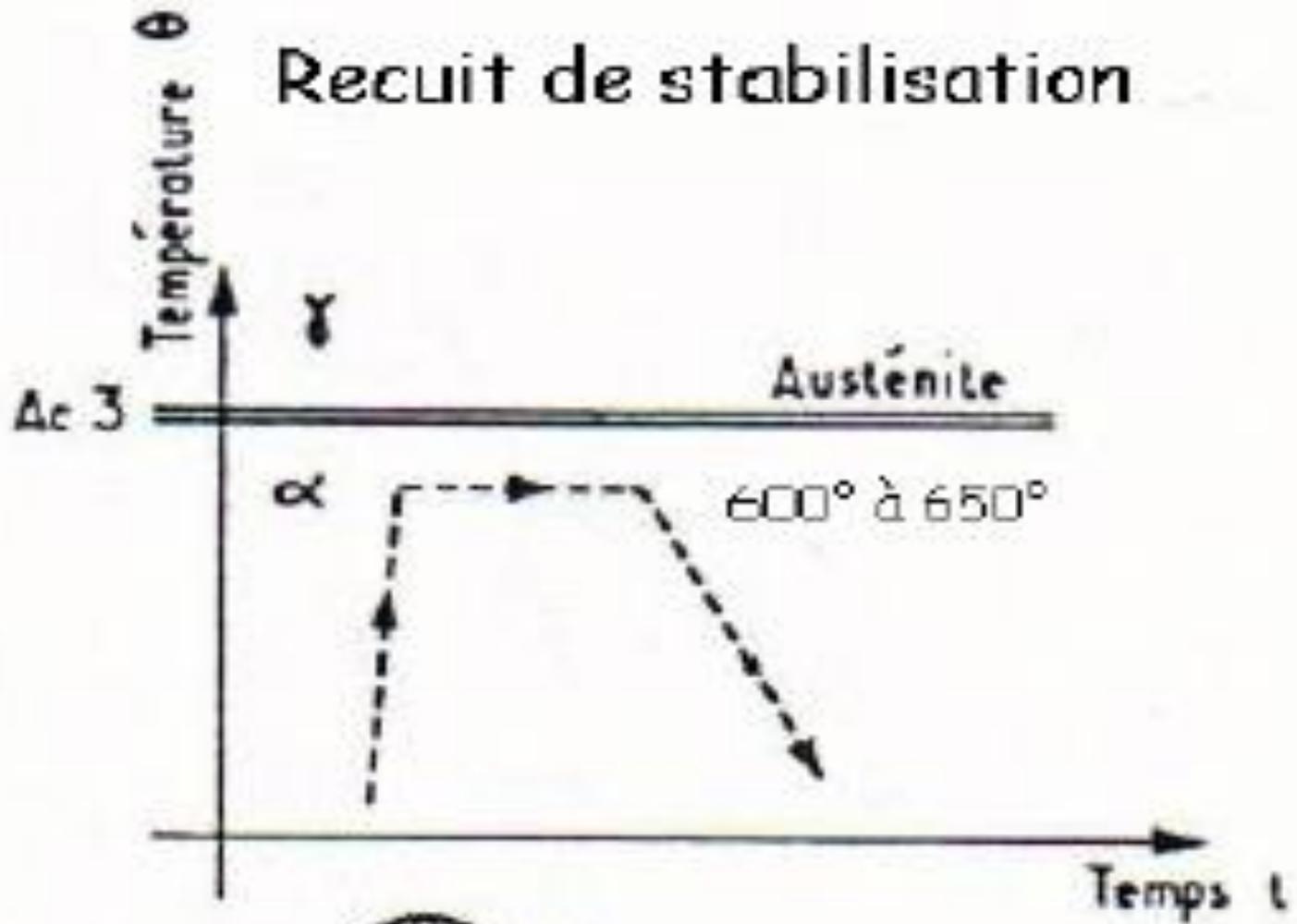
Traitements thermiques



Traitements thermiques



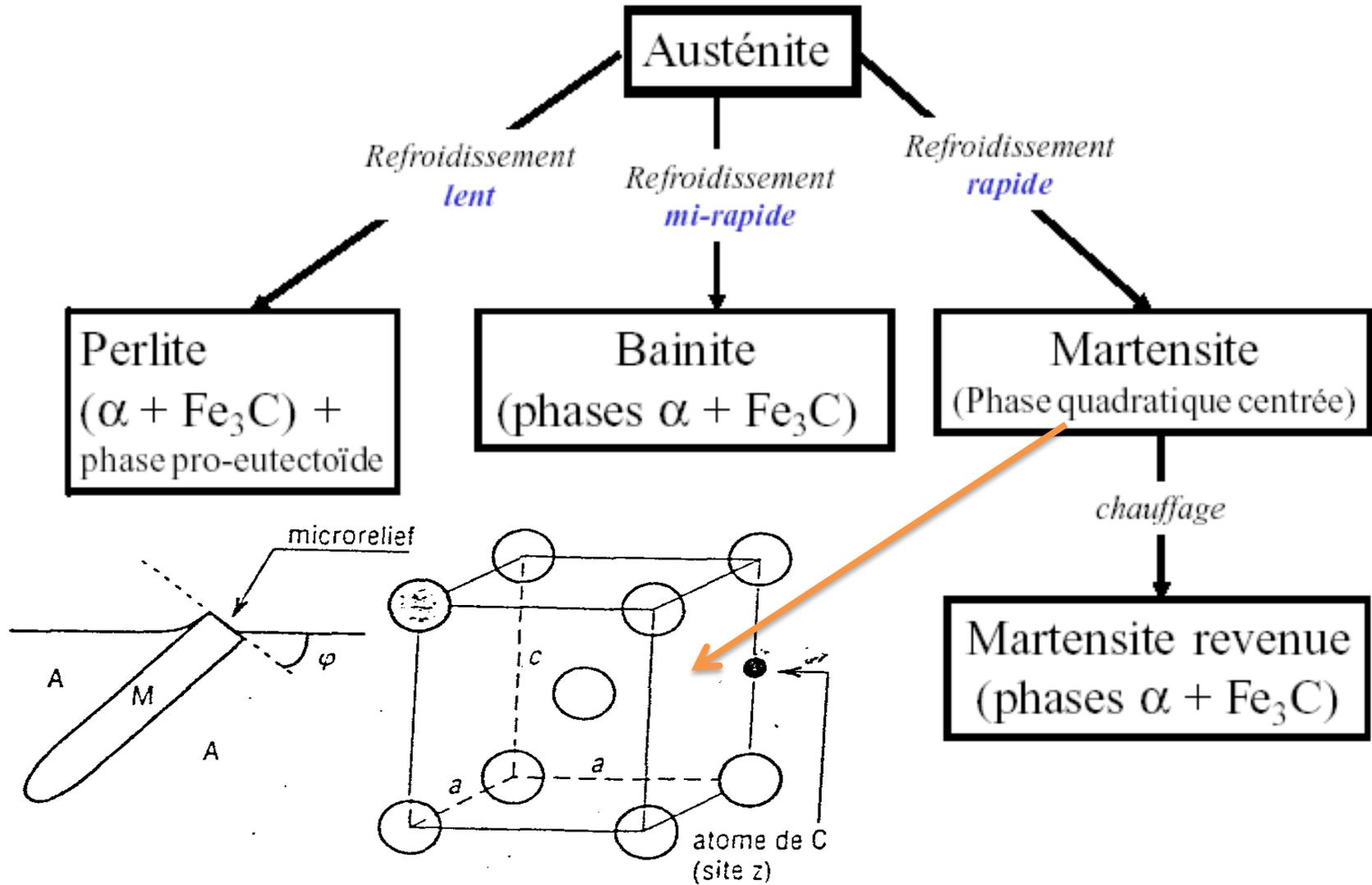
Recuit de stabilisation



Tensions d'usinage

Traitements thermiques

TRANSFORMATION DE L'austénite



a) schéma de formation d'une aiguille de martensite

b) maille de la martensite

Trempe

- **But** : changer la structure en détruisant «l'ordre » dans un métal
- **Cycle thermique** : Chauffage – maintien à une T° - refroidissement
Un refroidissement rapide!!!!
- **Loi de refroidissement** :
 - À l'air calme : vitesse $\sim 10^\circ\text{C/s}$
 - À l'huile : vitesse $\sim 100^\circ\text{C/s}$
 - À l'eau : vitesse $\sim 500^\circ\text{C/s}$
 - Au four : vitesse $\sim 100^\circ\text{C/h}$
 - À l'eau glacé ou à l'air liquide : vitesse $\sim 14000^\circ\text{C/s}$
- Courbe TTT
- Courbe TRC

Trempe: Suite

Martensite : produit de trempe d'un acier

Solution solide d'insertion sursaturée de carbone dans le fer α .

Structure observable : en aiguilles ou en lattes

Caractéristiques mécaniques :

- très dure (HV=800, HB=650)
- très fragile

Propriétés :

- se développe autour de martensite des contraintes internes
 - > durcissement de l'acier
- elle n'est pas stable : décomposition en fonction de temps et de température
 - > revenu

Structure de Trempe

Produit de Trempe : *martensite*

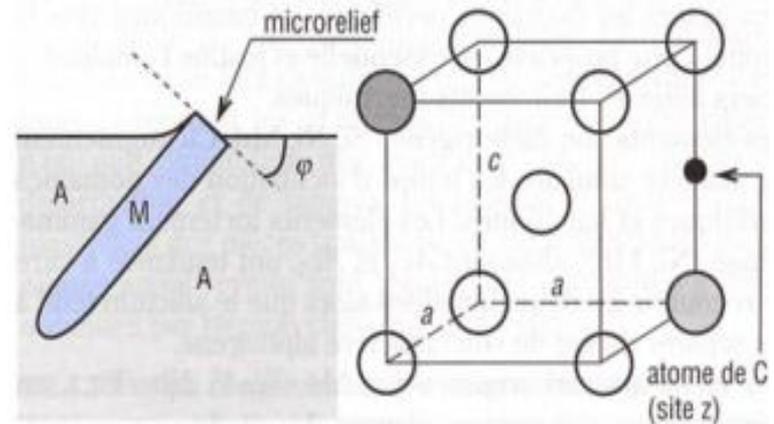
Une phase hors d'équilibre très dure et très fragile!



en aiguilles



en lattes



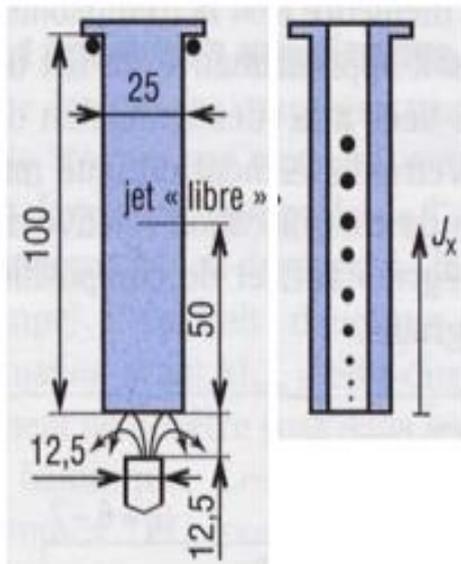
a) schéma de formation d'une aiguille de martensite

b) maille de la martensite

Trempeabilité des aciers: Essai de Jominy

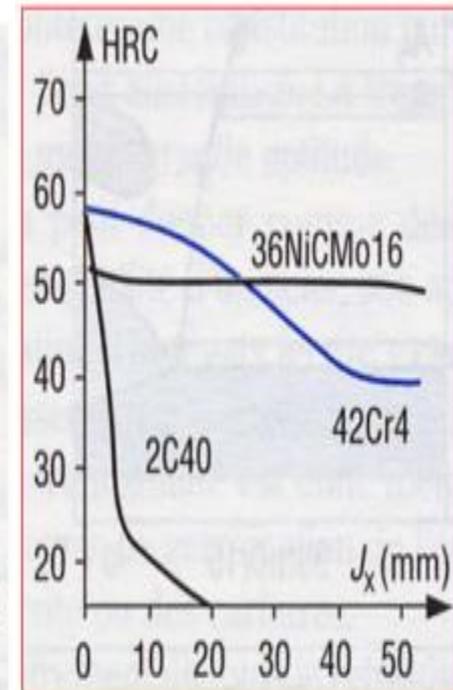
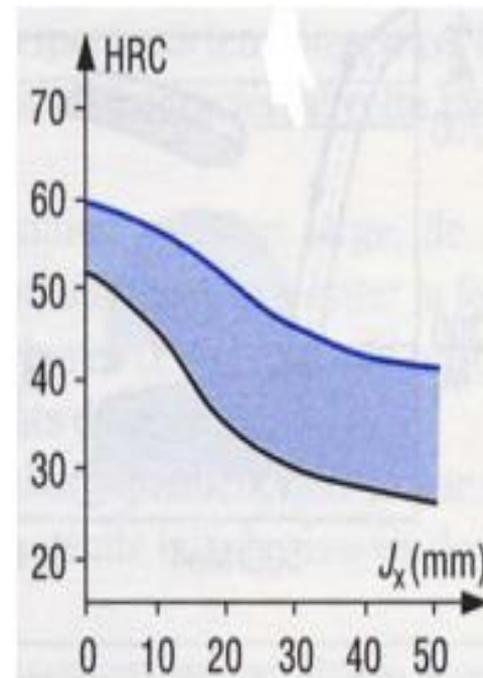
Pour évaluer la réponse d'un acier à un TT de tremp, on utilise l'essai de Jominy.

La variation de la composition chimique pour une même nuance d'acier entraînera une variation de la vitesse critique de trempe V_c et en retour une modification de la réponse de l'acier à un traitement thermique.



bande Jominy
de l'acier 34CrMo4

J_x (mm)	HRC min	HRC max
1,5	51	59,5
5	49	58
9	45	56,5
11	43	55,5
15	39	53,5
20	35	51
25	32	48
30	30	46
40	28	43
50	26	41



Durcissement par trempe martensitique

- La **martensite** = est une solution solide sursaturée de carbone en insertion dans une structure quadratique centrée
- Après un refroidissement brutal comme la trempe, la martensite apparaît microscopiquement comme une structure en **aiguilles ou aciculaire**

Durcissement par trempe martensitique: caractéristiques de la martensite

- Transformation est **sans diffusion** et il n'y a aucun changement de composition chimique. de petites volumes d'austénite changent de structure cristalline sous **l'action conjointe de deux cisaillements**.
- Transformation se produit seulement pendant le refroidissement et cesse si le refroidissement est interrompu. C'est une transformation **athermique** car elle ne dépendent que de la température

Diagramme de transformation isotherme de l'austénite (courbes T.T.T.)

- La meilleure façon d'apprendre les diagrammes de transformation isotherme est d'étudier la manière dont ils sont déterminés.

CAS de l'acier 0,8% de carbone

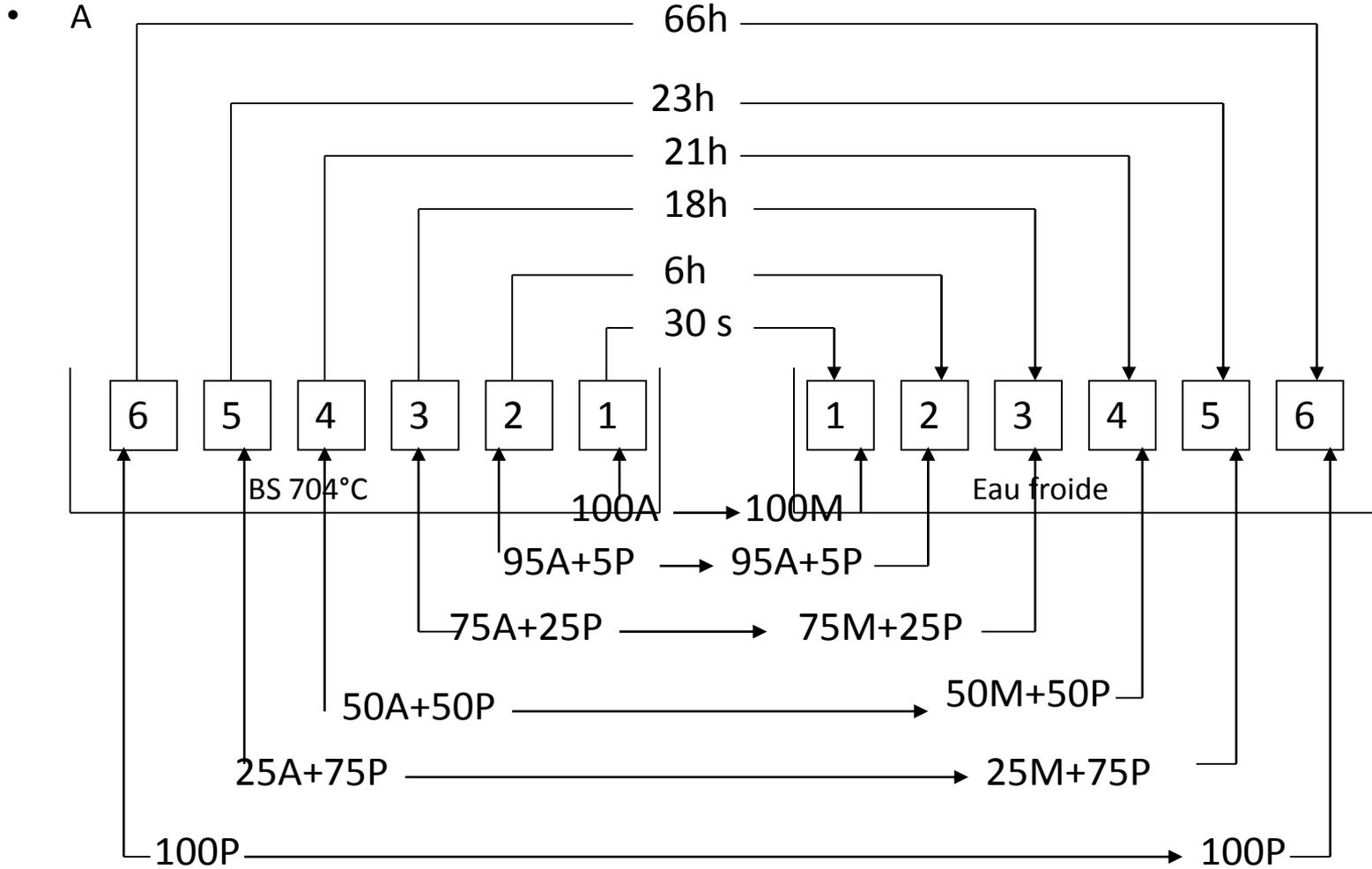
Pour déterminer le diagramme TTT de l'acier eutectoïde on va suivre les étapes suivantes:

- E1:** prélever dans une même barre un grand nombre de petits échantillons
- E2:** placer les échantillons dans un four ou un bain de sel fondu maintenu à la température d'austénisation convenable.
- E3:** placer les échantillons dans un bain de sel fondu maintenu à une température constante donnée (inférieure à A_{e1}).
- E4:** Après différents temps de maintien dans le bain de sel chaque échantillon est trempé dans de l'eau froide.
- E5:** Après refroidissement, chaque échantillon est soumis à un contrôle de dureté et observé microscopiquement.
- E6:** Les opérations différentes températures inférieures à A_{e1} jusqu'à ce qu'il ait un nombre de points suffisants pour tracer les lignes sur le diagramme

Durcissement par trempe martensitique: caractéristiques de la martensite

- **Pour un alliage donné, la transformation martensitique ne peut être supprimée ni la température M_s (début de la formation de la martensite) en modifiant la V_r .**
- **$M_s(^{\circ}F) = 1000 - (650x\%C) - (70x\%Mn) - (35x\%Ni) - (70x\%Cr) - (50x\%Mo)$**
- **Théoriquement, la transformation austénite-martensite n'est jamais complète et des petites quantités d'austénite résiduelle subsistent à base température**

Cas de la transformation à 704°C



Traitements thermiques

Transformation isotherme de l'austénite

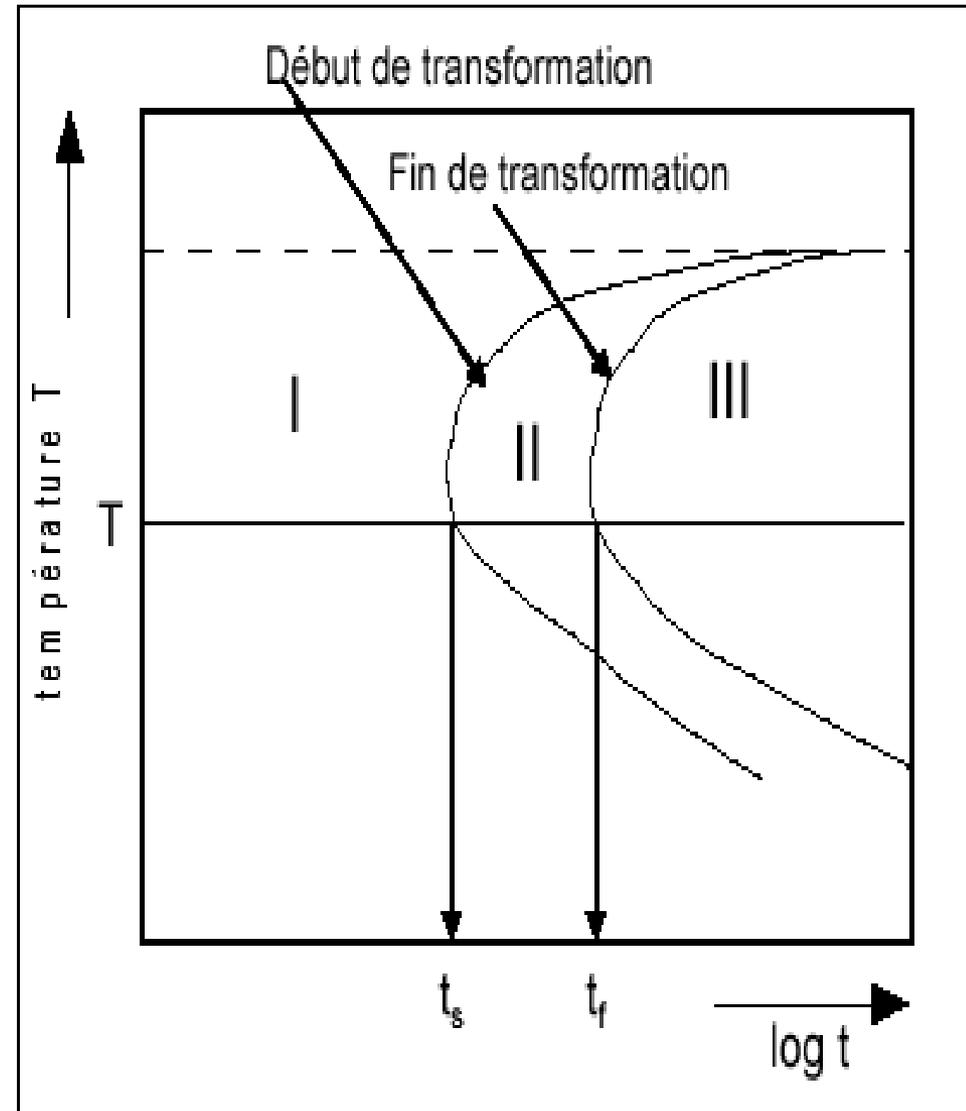
Diagramme TTT

Ils rassemblent l'ensemble des courbes de transformation isotherme dans un diagramme Température-Temps-Taux de transformation

- a) état de haute température
- b) juxtaposition des états de haute et basse température
- c) état stable de basse température T

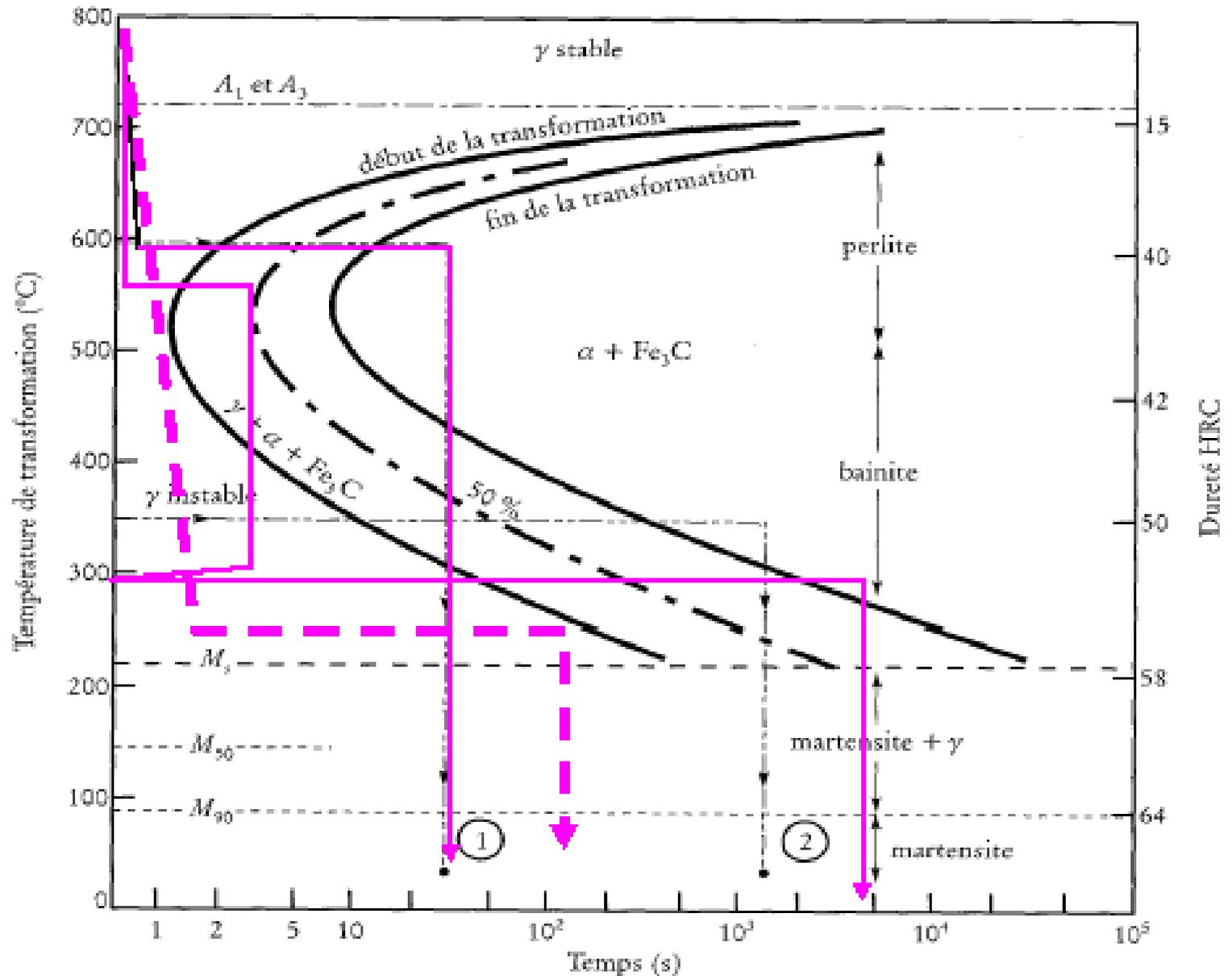
Les diagrammes ont un "nez", qui définit une température à laquelle la vitesse de transformation est maximale:

La force motrice est importante
La température est suffisamment élevée pour que la diffusion permette une vitesse de croissance élevée



Traitements thermiques

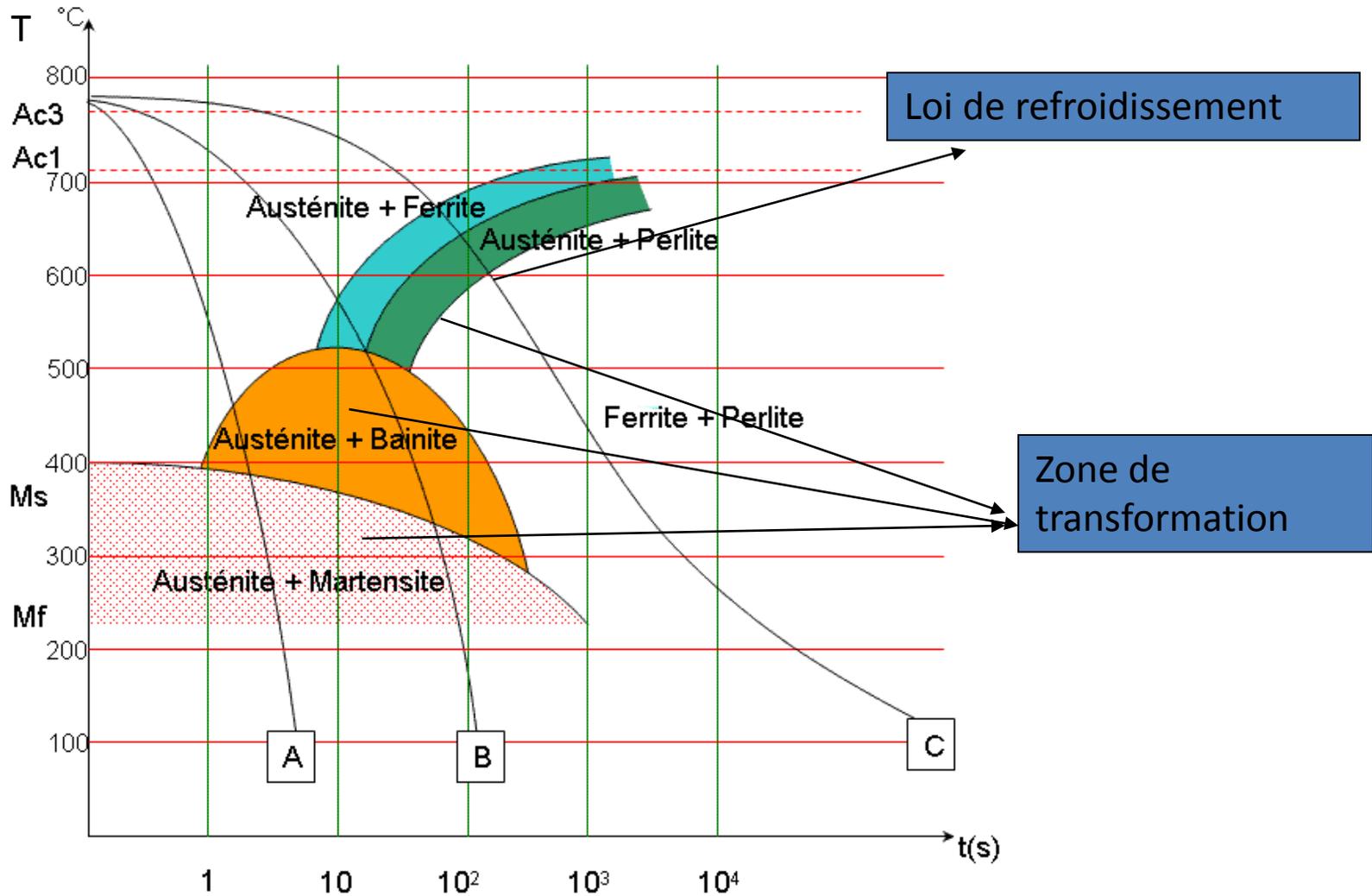
Diagramme TTT d'un acier eutectoïde



Transformation de l'austénite lors d'un refroidissement continu

- **La transformation se produisant à différentes températures, les conditions se modifient. IL y a formation successive de différents constituants.**
- **Dans ce cas, le diagramme T.T.T. n'est plus exploitable. IL est remplacé par le diagramme T.R.C. (Transformation, Refroidissement Continu).**
- **Les courbes TRC représentent les résultats de la transformation de l'austénite en refroidissement continu.**
- **La température est portée en ordonnées, et le temps figure sur l'axe des abscisses en échelle logarithmique**

Diagramme TRC: Exemple 1



TRC: Exemple2

Courbes TRC de l'acier 35 NC 6.

Les courbes foncées sur la figure délimitent différents domaines dans lesquels coexistent les produits de la transformation de l'austénite. L'austénite se transforme en :

zone A+F : ferritique

zone A+C+F : perlitique

zone A+F+C : bainitique

zone A+M : Martensitique

Les courbes en traits plus fin représentent l'allure du refroidissement à différentes vitesses. Sur chacune, des nombres indiquent la proportion d'austénite transformée :

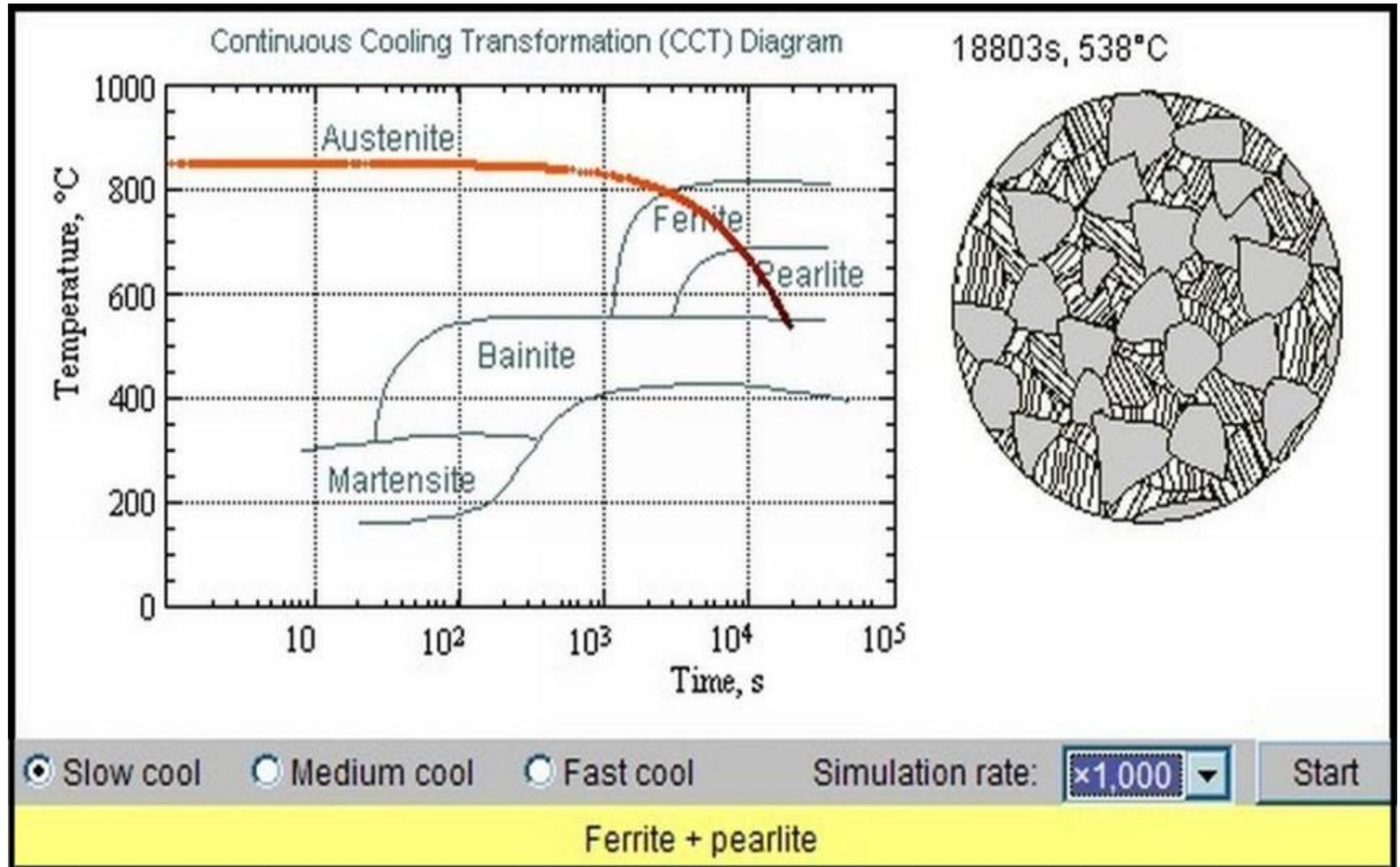
* La loi de refroidissement A: L'austénite se transforme en 50% de ferrite et 50% de perlite (la dureté Vickers finale est de 191).

* La loi de refroidissement B : L'austénite se transforme en 50% de ferrite, 15% de perlite, 30% de bainite (Hv 26)

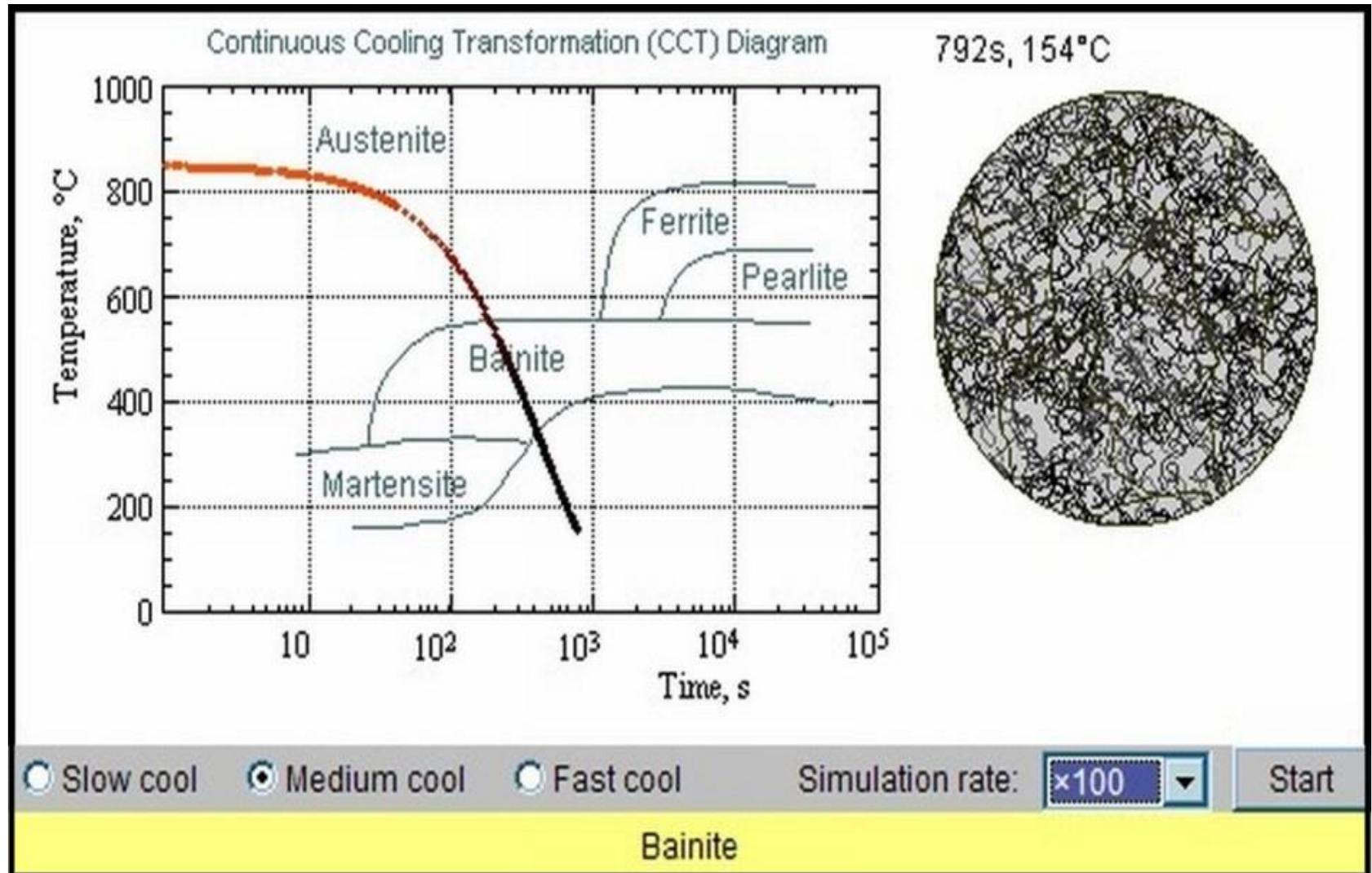
* La loi de refroidissement C : obtention de 20% de ferrite, 10 % de perlite, 60% de bainite, il reste 10% d'austénite susceptible de se transformer en martensite à partir de M s (HV 27)

.

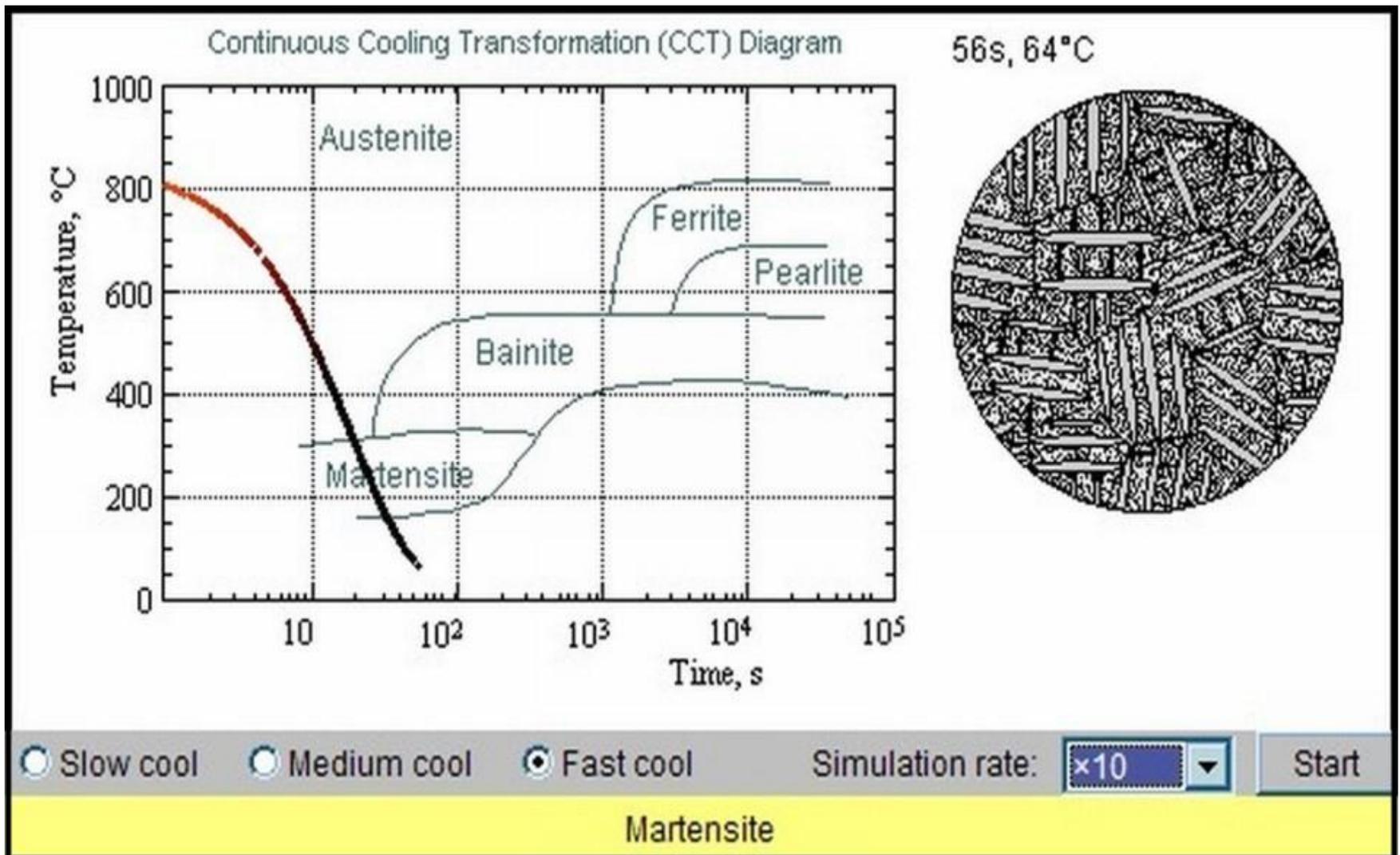
TRC: refroidissement lent



TRC: refroidissement moyen



TRC: refroidissement rapide



Austénitisé à 900 °C 30 mn

Grosueur du grain : 11-12

Température
d'austénisation et
durée de maintien

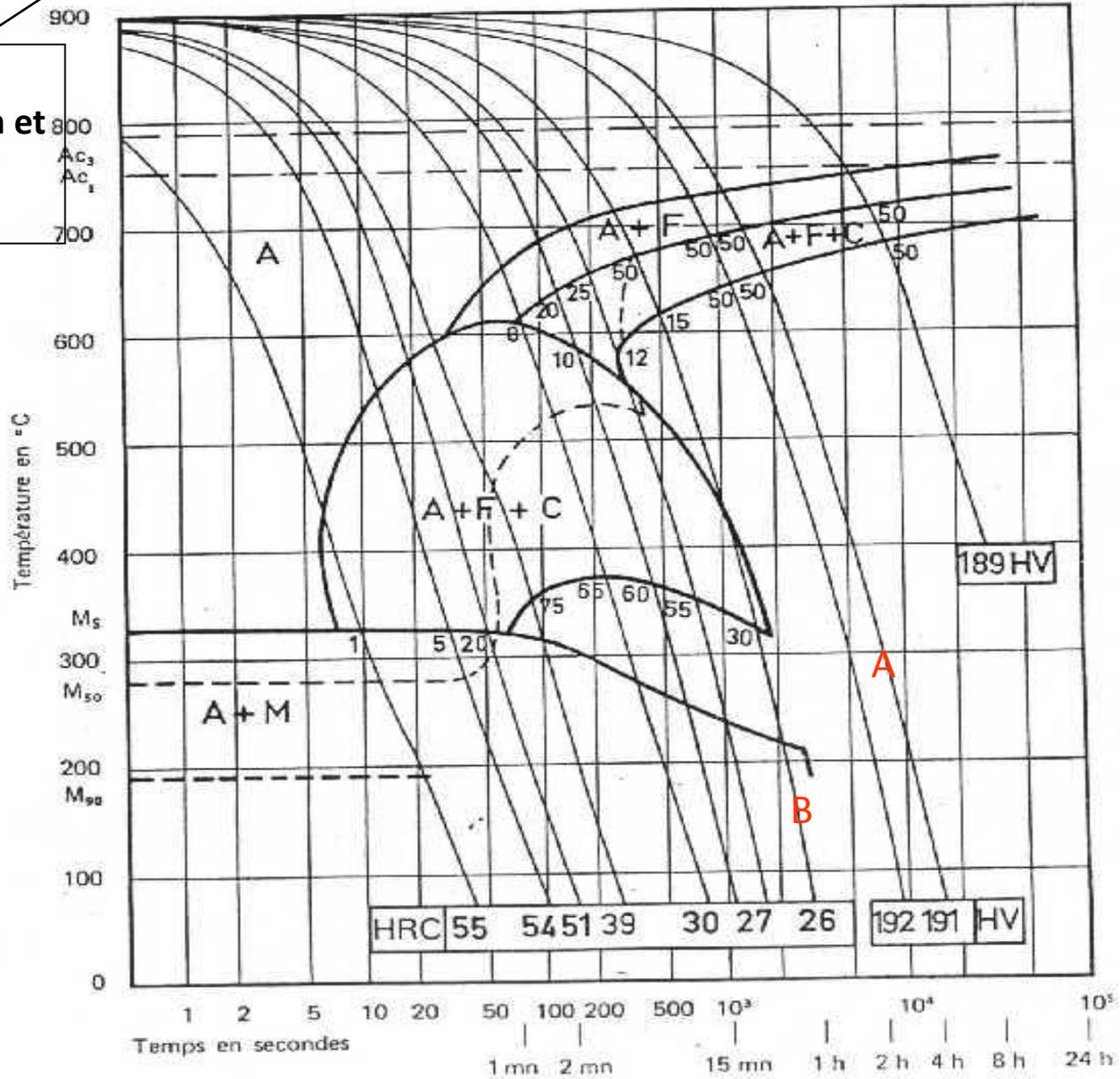
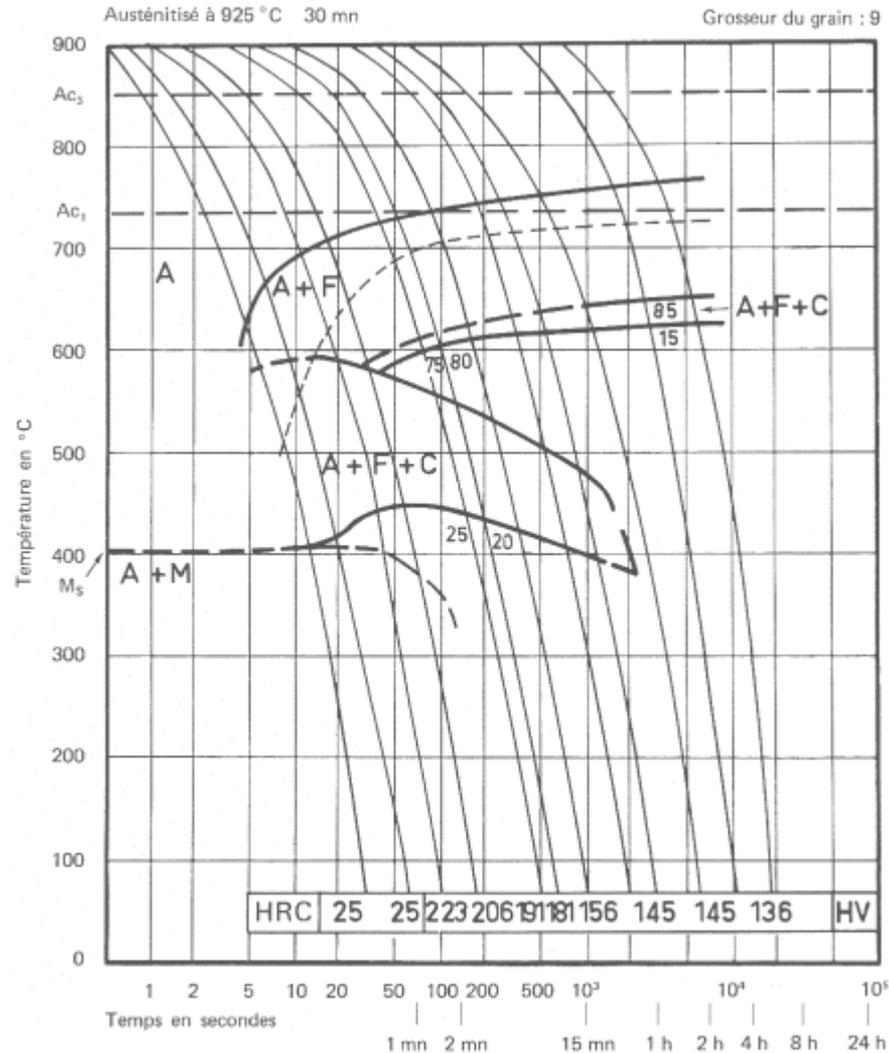
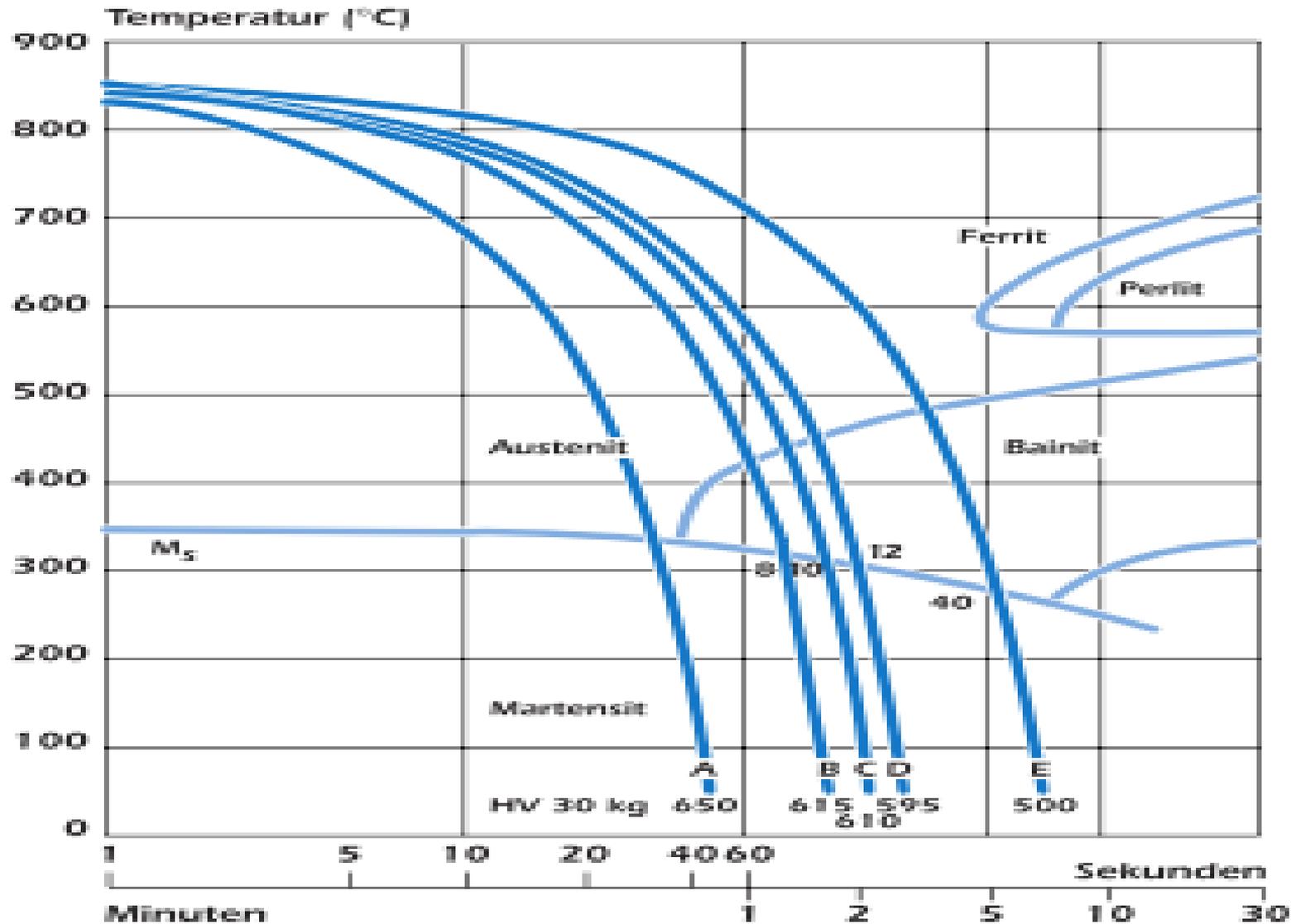


Diagramme TRC de l'acier 10NiCr4-5/10NC6

**C%/Mn%/Si%/S%P%/Ni%/Cr%/Mo%/Cu%V%0.11/0.
50/0.30/0.005/0.017/1.59/0.64/<0.10/0.31< 0.03**

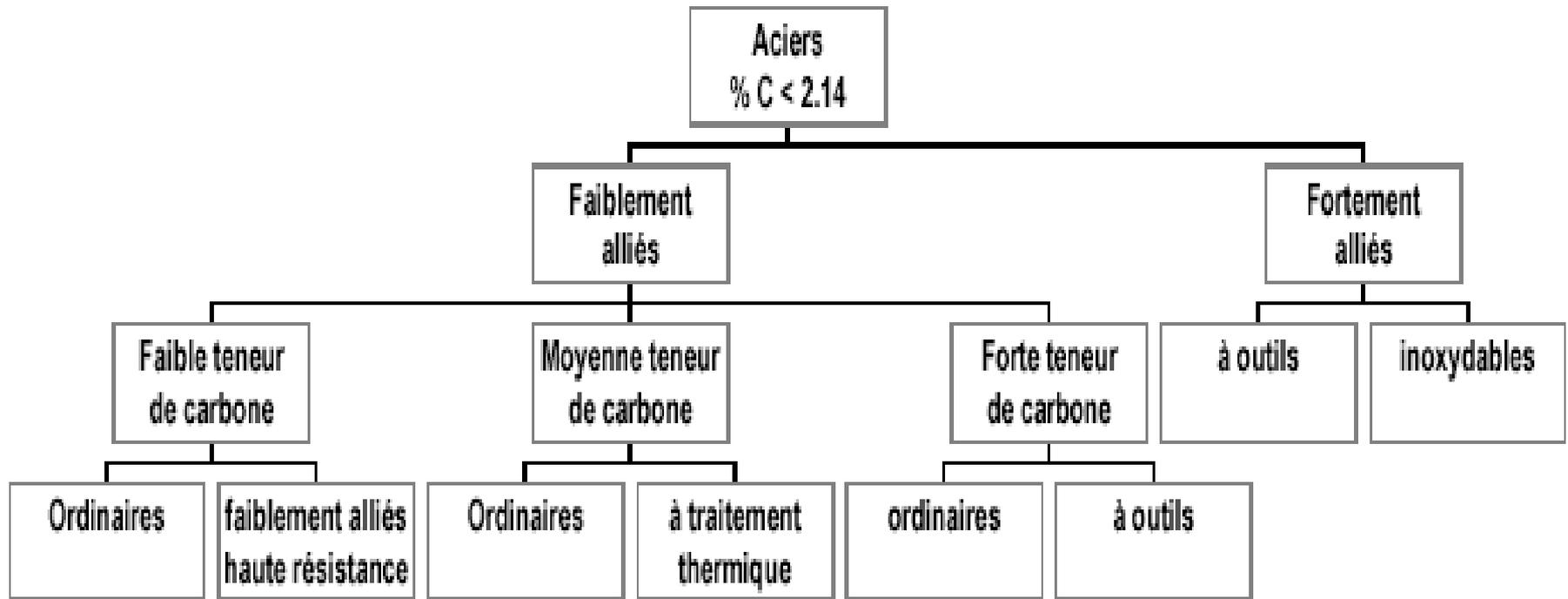


DIN 42 CrMo 4 – Austenitisiert bei 850°C, Haltezeit 10 Minuten



Aciers

Classification des aciers



$$C_{eq} = \%C + \frac{1}{8} Mn + \frac{1}{5} (Cr + M_o + V) + \frac{1}{15} (Ni + Cu)$$

Aciers

Caractéristiques courantes exprimées dans les normes

Composition chimique.

- inclut le CEV (soudabilité)

Caractéristiques mécaniques:

- Re, Rm, A%, KV

Caractéristiques technologiques:

- soudabilité, pliage.

Revêtements:

- masse, qualité de finition...

Tolérances sur les dimensions et la forme

Aciers

Influence de l'augmentation du % carbone

Les aciers de construction contiennent 0,1 à 1% de carbone selon les caractéristiques recherchées .

Augmente

- la DURETÉ (H)
- la résistance à la RUPTURE (Rr)
- la LIMITE ÉLASTIQUE (Re)
- la résistance à la CORROSION
- la résistance à l'USURE
- la TREMPABILITÉ (mise en solution du carbone, formation de CARBURES)

Diminue

- la MALLÉABILITÉ (PLASTICITÉ - DUCTILITÉ)
- la résistance aux chocs (RÉSILIENCE)
- la soudabilité

Aciers

Influence des éléments d'addition et d'alliage

- **Eléments d'addition et leur symbole chimique.**
- **Améliorer les caractéristiques mécaniques.**
- **Fixer les impuretés chimiquement.**

Eléments d'alliage	Symbole chimique	Eléments d'alliage	Symbole chimique	Eléments d'alliage	Symbole chimique
Aluminium	Al	Cobalt	Co	Niobium	Nb
Antimoine	Sb	Cuivre	Cu	Plomb	Pb
Argent	Ag	Etain	Sn	Silicium	Si
Azote	N	Fer	Fe	Soufre	S
Béryllium	Be	Gallium	Ga	Strontium	Sr
Bismuth	Bi	Lithium	Li	Tantane	Ta
Bore	B	Magnésium	Mg	Titane	Ti
Cadmium	Cd	Manganèse	Mn	Tungstène	W
Cérium	Ce	Molybdène	Mo	Vanadium	V
Chrome	Cr	Nickel	Ni	Zinc	Zn
				Zirconium	Zr

Aciers

Influence des éléments d'addition et d'alliage

- Améliorer les caractéristiques mécaniques

- MANGANÈSE, augmente la limite élastique et la trempabilité
- NICKEL, la résistance aux chocs et à la corrosion (fort %)
- CHROME, la résistance à l'usure et à la corrosion
- SILICIUM, la limite élastique
- TUNGSTÈNE, la résistance à l'usure et à la chaleur
- MOLYBDÈNE, la résistance à l'usure et à la chaleur
- VANADIUM, la résistance à l'usure et aux déformations (TÉNACITÉ)

Aciers **désignation à partir de leur composition**

Aciers non alliés:

Ils contiennent une faible teneur en carbone. Ils sont très utilisés en construction . La majorité est disponible sous forme de laminés marchands (profilés: poutrelle, barre, ...) aux dimensions normalisées.

Utilisation : Ce sont des aciers dont l'élaboration n'a pas été conduite en vue d'une application déterminée.

Désignation : On écrit successivement:

-Lettre C + pourcentage de carbone multiplié par 100.

Ex: C 35 : 0,35% de carbone

Aciers faiblement alliés:

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5% en masse (ce pourcentage est ramené à 1% pour le manganèse).

Désignation :

- *Un nombre égal à 100 fois la teneur en carbone.*
- *Les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.*
- *Dans le même ordre, les teneurs des principaux éléments d'addition (multipliées par 4, 10, 100, ou 1000*
- *Eventuellement des indications supplémentaires concernant la soudabilité (S), l'aptitude au moulage (M), ou la déformation à froid (DF).*

Exemple : 35 Cr Mo 4 /S / 0,35 % de Carbone 1 % de Chrome, moins de 1 % de Molybdène Il est soudable.

Utilisation : Ils sont choisis lorsque l'on a besoin d'une haute résistance.

Fontes

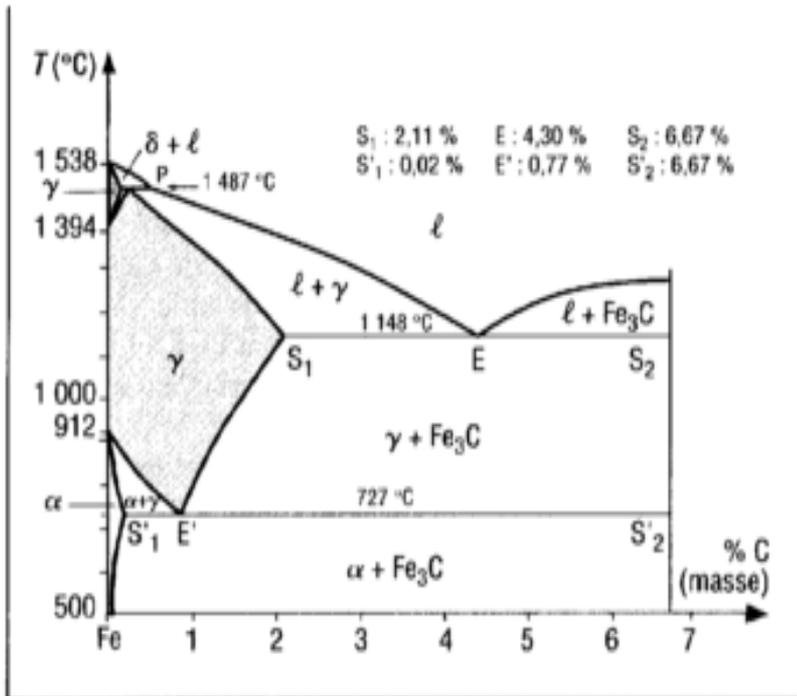


Fig. 3. Diagramme d'équilibre métastable ou à cémentite

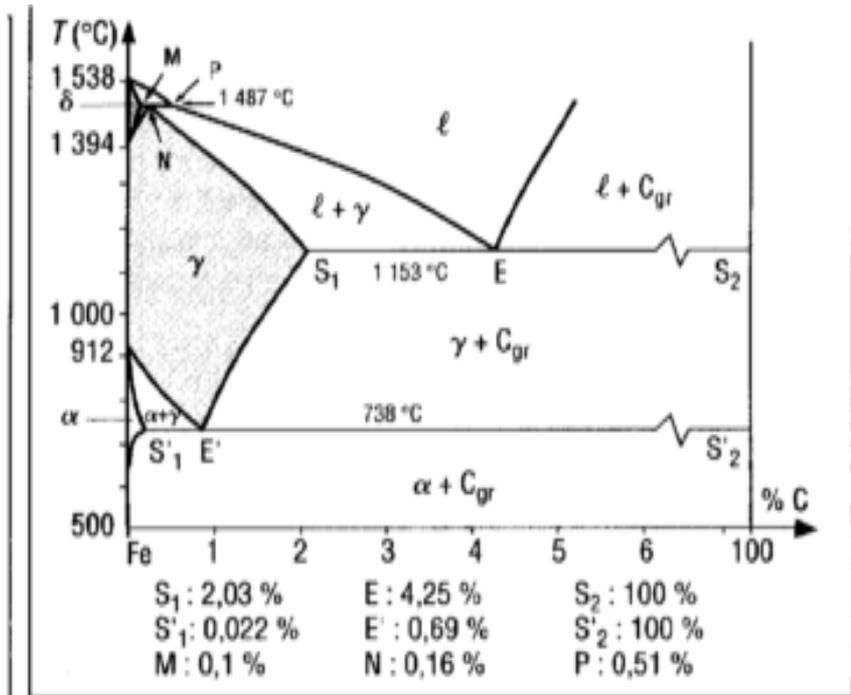


Fig. 4. Diagramme d'équilibre stable ou à graphite

Fontes Blanches

Phases :

ferrite+cémentite
pas de graphite

Exemple micrographie:

fonte blanche hypereutectique

Propriétés mécaniques :

dure : HV = 800 ~ 1000,
fragile : Ar ~ 0

Résistance à l'usure et à l'abrasion!

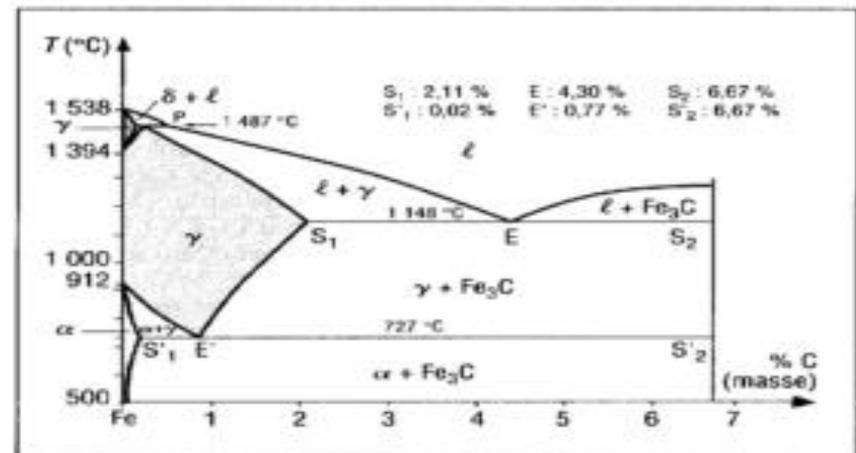
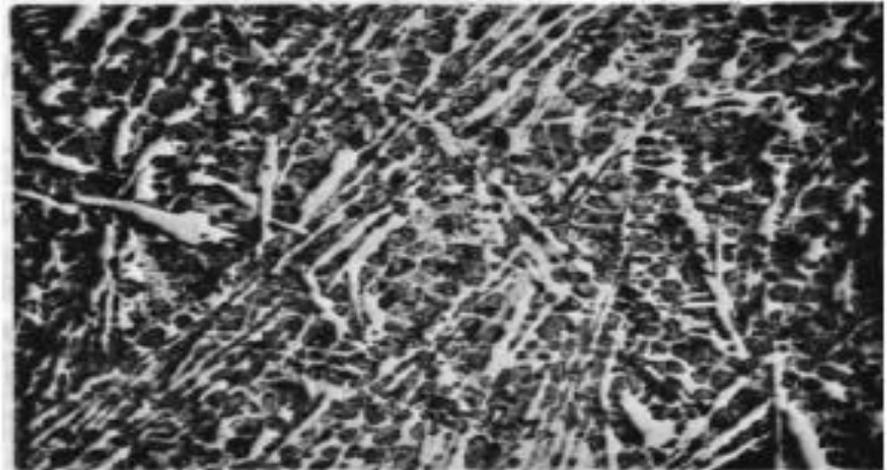
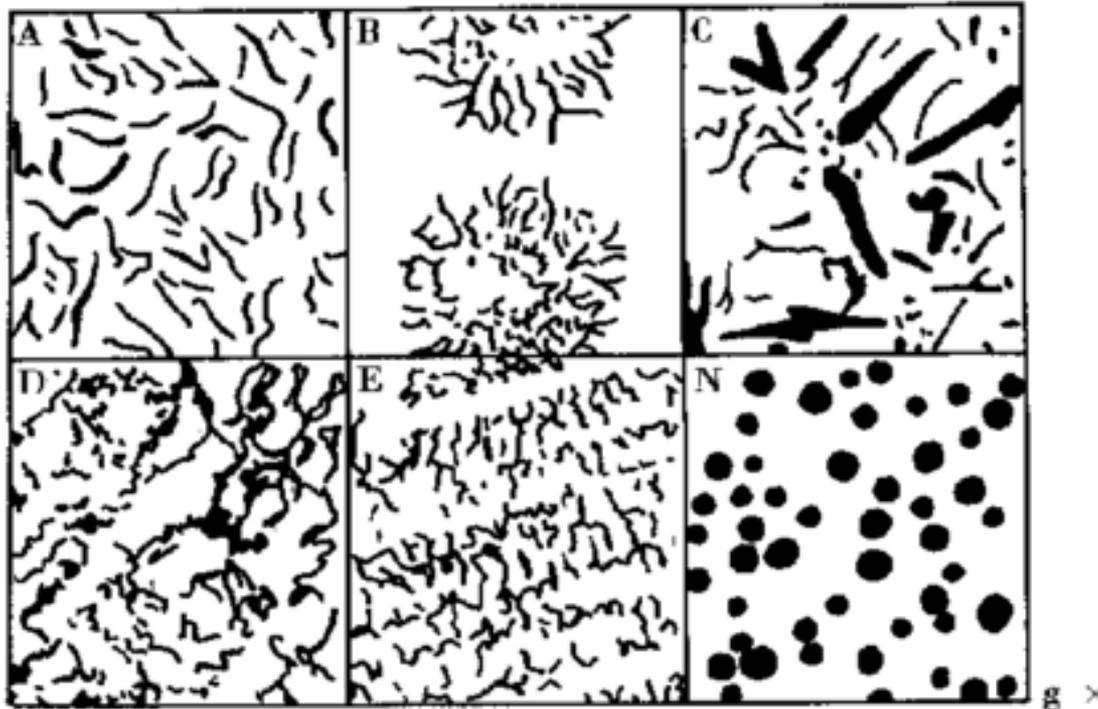


Fig. 3. Diagramme d'équilibre métastable ou à cémentite

Fonte Grise

carbone libre: graphite

Formes possibles de graphite : *Micrographie avant attaque*

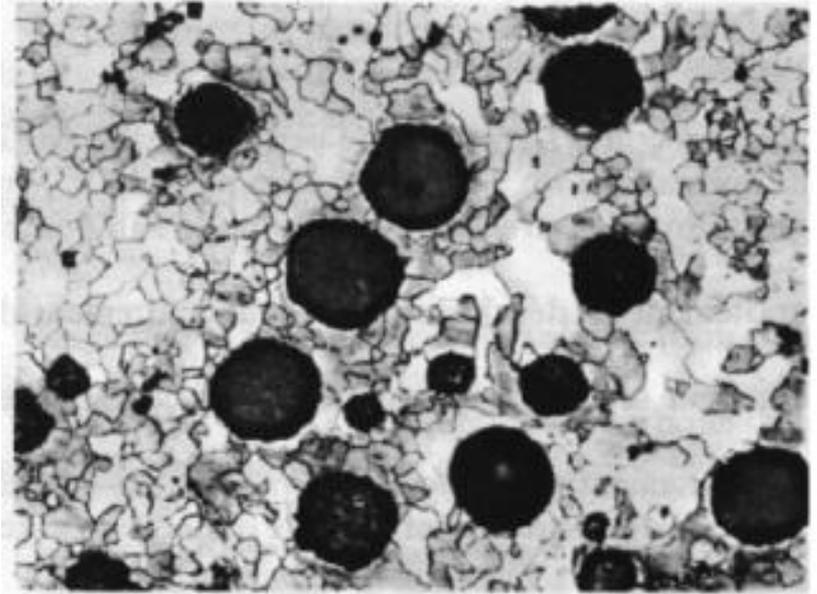


Micrographies des fontes



Désignation	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A %
FGL 150	150-250	100	> 0,8
FGL 200	200-300	130	> 0,8
FGL 250	250-350	165	> 0,8
FGL 300	300-400	195	> 0,8
FGL 350	350-450	230	> 0,8
FGL 400	400-500	260	> 0,8

Fonte grise à matrice perlite



Désignation	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A %
FGS 350-22	350	220	22
FGS 400-18	400	250	18
FGS 400-15	400	250	15
FGS 450-10	450	310	10
FGS 500-7	500	320	7
FGS 600-2	600	370	2
FGS 700-2	700	420	2
FGS 800-2	800	480	2
FGS 900-2	900	600	2

Fonte à graphie sphéroïdale
(à matrice ferrite ou perlite)

Aciers fortement alliés.

Les aciers fortement alliés possèdent au moins un élément d'addition dont la teneur dépasse 5% en masse.

Désignation :

- **La lettre X.**
- **Un nombre égal à 100 fois la teneur en carbone.**
- **Les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.**
- **Dans le même ordre, les teneurs des principaux éléments.**

Exemples :

X6 Cr Ni Mo Ti 17-12 /X = Acier fortement allié
0,06 % de Carbone, 17 % de Chrome, 12 % de Nickel, du Molybdène et du Titane
(moins de 12 %)

X4 Cr Mo S 18 /X = Acier fortement allié
0,04 % de Carbone, 18 % de chrome, du Molybdène et du Soufre (moins de 18 %)

Utilisation :

Ce sont des aciers réservés à des usages particuliers. Par exemple, dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui n'est autre qu'un acier fortement allié avec du chrome (% chrome > 11%)

Les métaux et alliages non ferreux

L'Aluminium et ses alliages

Métal de base,
Aluminium « **Al** »
Aspect: métal blanc brillant, ductile et malléable, s'altérant peu à l'air.
=> produits moulés
=> produits corroyés (forgeage, ...)

Le Cuivre et ses alliages

Métal de base,
Cuivre « **Cu** »
Aspect: métal de couleur rouge brun, malléable et ductile
=> produits moulés
=> produits corroyés

Les alliages de Magnésium

Métal de base,
Magnésium « **Mg** »
Aspect: métal solide blanc argenté, pouvant brûler à l'air avec une flamme éblouissante.

Les alliages de Zinc

Métal de base,
Zinc « **Zn** »
Aspect: métal d'un blanc bleuâtre peu altérable

Le fer subit une transformation allotropique à 912°C.

La phase stable à basse température est la ferrite, de structure cubique centrée.

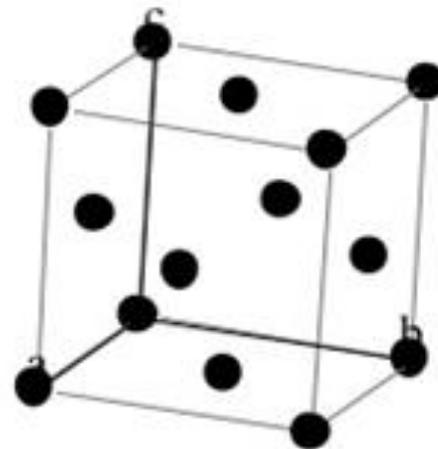
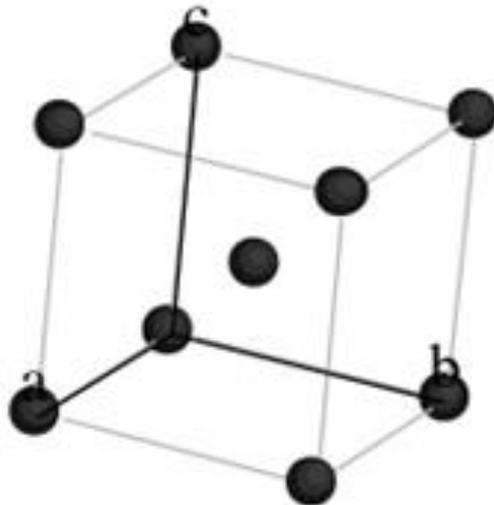
Le paramètre de maille de la ferrite, à 911°C, est de 0.2903 nm.

La structure stable au-delà de cette température est la phase austénite, cubique à face centrées.

A 913°C, le paramètre de l'austénite est de 0.3646 nm.

- 1) Calculer la masse volumique du fer à 911°C et à 913°C
- 2) Calculer le volume spécifique à 911°C et à 913°C
- 3) Calculer la variation de volume et de longueur pour 1g de fer entre 911 et 913°C.
- 4) Calculer le diamètre des atomes de fer à 911°C et à 913°C.
- 5) Calculer la compacité du fer à ces deux températures
- 6) Dénombrer les sites d'insertion.
- 7) Calculez le diamètre maximal des atomes qui peuvent s'y loger.
- 1) Quelle conclusion peut-on en tirer sur la solubilité du carbone dans le fer ?

Données : $M_{Fe} = 0.05585 \text{ kg/mol}$ - $M_C = 0.012 \text{ kg/mol}$



1-/Calcul des masses volumiques théoriques du fer α et du fer γ .

A 910°C se produit la transformation allotropique $\text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\gamma$ (au chauffage).
A cette température, on peut donc comparer les deux structures :

Fer α ferrite : cubique centré avec $a_\alpha = 0.2903$ nm et deux atomes par maille
 $M_{\text{fer}} = 55.85$ g/mole en CGS.

On ramènera tout en g et cm. Soit $a_\alpha = 0.2903 \cdot 10^{-7}$ cm

Volume de la maille $V_\alpha = (0.2903 \cdot 10^{-7})^3 \text{ cm}^3 = 2.4465 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3$

$$\rho_\alpha = 2 \cdot 55.85 / (6.02 \cdot 10^{23} \cdot V_\alpha), \quad \rho_\alpha = 7.5843 \text{ g/cm}^3$$

Fer γ austénite : cubique à faces centrées avec $a_\gamma = 0.3646$ nm et quatre atomes par maille.

$$V_\gamma = (0.3646 \cdot 10^{-7})^3 \text{ cm}^3 = 4.8467 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3$$

$$\rho_\gamma = 4 \cdot 55.85 / (6.02 \cdot 10^{23} \cdot V_\gamma), \quad \rho_\gamma = 7.6566 \text{ g/cm}^3.$$

A 910°C, le fer γ est bien le plus dense, car son réseau est CFC.

2-/ Calcul de la variation relative de longueur lors de la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$.

Le mieux est de partir des volumes spécifiques :

$$v_{\alpha} = 1/\rho_{\alpha} = 0.13185 \text{ cm}^3/\text{g},$$

$$v_{\gamma} = 1/\rho_{\gamma} = 0.13061 \text{ cm}^3/\text{g}$$

De là on déduit la variation relative de volume au chauffage:

$$\Delta v / v = (v_{\gamma} - v_{\alpha})/v_{\alpha} = -9.4 * 10^{-3}, \text{ soit } -0.94 \%$$

Enfin, en posant $V = L^3$, on a au premier ordre $\Delta V/V = 3 \Delta L/L$ (si le matériau est isotrope, c'est à dire ici polycristallin) et on trouve la variation relative de longueur due à la transformation :

$$\Delta L/L = -0.31\%$$

Cette variation peut être facilement détectée par un dilatomètre, qui constitue un appareil très intéressant pour observer les changements de phases à l'état solide.

3-/ Calcul du diamètre atomique dans chaque structure.

Dans la suite, on supposera que les atomes sont sphériques, ce qui presque exactement le cas dans la réalité.

Pour le fer α :

Dans une maille cubique centrée, trois atomes de diamètre D_{α} sont tangents suivant une diagonale du cube, soit, sur la longueur $L = a_{\alpha} * \sqrt{3} = 2 * D_{\alpha}$.

On en tire que le diamètre d'un atome de fer dans la structure cubique centrée à 910°C vaut :

$$D_{\alpha} = 0.2514 \text{ nm.}$$

Pour le fer γ :

Cette fois-ci, dans la maille cubique à faces centrées, trois atomes sont tangents le long d'une diagonale de face. On a donc $L = a_{\gamma} * \sqrt{2} = 2 * D_{\gamma}$.

On en tire : $D_{\gamma} = 0.2578 \text{ nm.}$

Curieusement, on constate que l'atome de fer moyen occupe plus de place dans la structure la plus dense : c'est l'effet de la coordination (nombre de premiers voisins). Elle vaut 8 dans α et 12 dans γ . Ces voisins nombreux attirent les orbitales vers l'extérieur et l'atome « grandit ».

4- / Calcul de la compacité des deux structures.

La compacité est le rapport du volume de tous les atomes du motif, considérés comme des sphères, à celui de la maille.

Dans α :

Volume des atomes, $V_{at} = 2 * (4/3 * \pi * (D_{\alpha}/2)^3)$

Volume de la maille, $V_m = a_{\alpha}^3$

Avec l'expression de D_{α} précédente, on trouve la compacité de $\alpha = \pi * \sqrt{3}/8 = 0.68$

Dans γ :

Volume des atomes, $V_{at} = 4 * (4/3 * \pi * (D_{\gamma}/2)^3)$

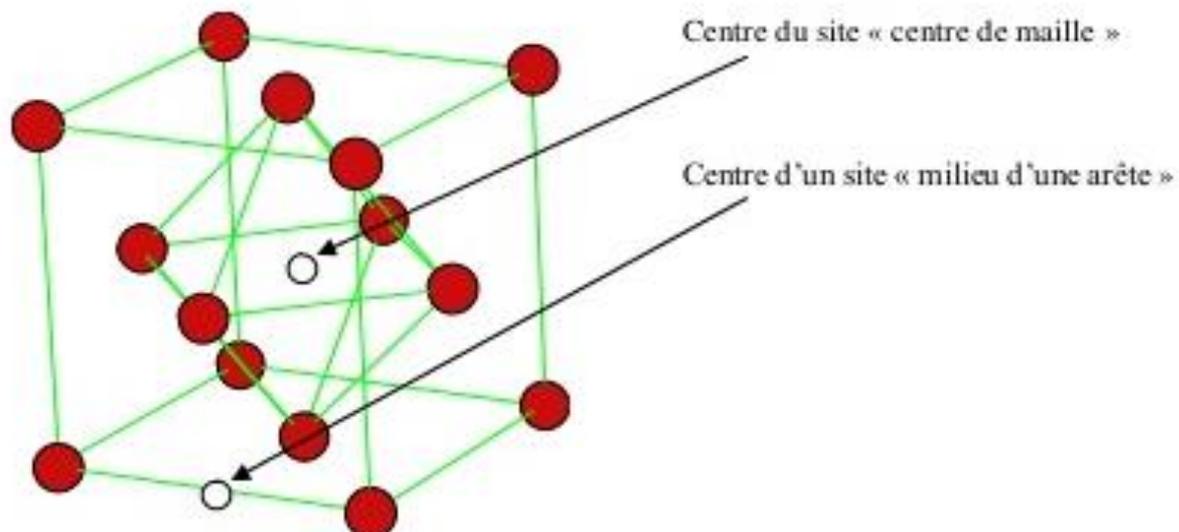
Volume de la maille, $V_m = a_{\gamma}^3$

Avec l'expression de D_{γ} précédente, on trouve la compacité de $\gamma = \pi * \sqrt{2}/6 = 0.74$

5-/ Sites interstitiels dans la structure γ CFC.

Il existe des sites interstitiels octaédriques et tétraédriques, plus petits.

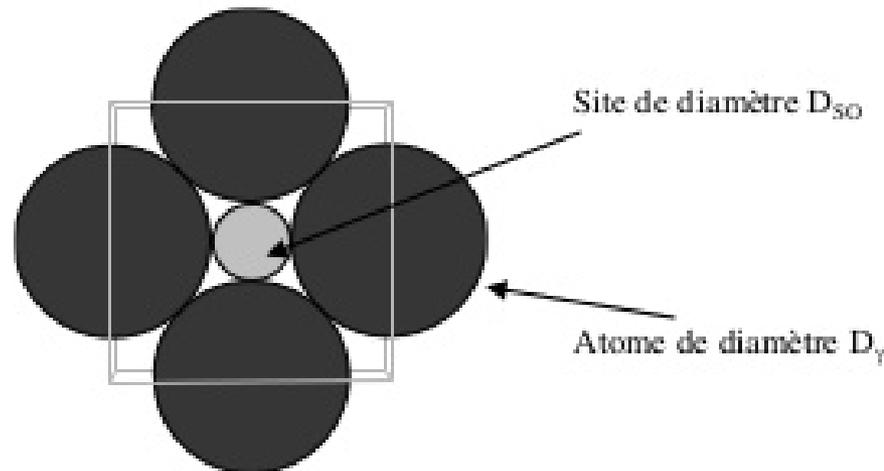
Sites octaédriques :



Un site est situé au centre de la maille (voir figure ci-dessus). Il compte pour 1 par maille. D'autres ont leur centre situé au milieu de chaque arête : chacun appartient à 4 mailles voisines et ils sont 12. Il y en a donc en moyenne 3 par maille.

Au total, il y a 4 sites octaédriques par maille.

Diamètre du site octaédrique.



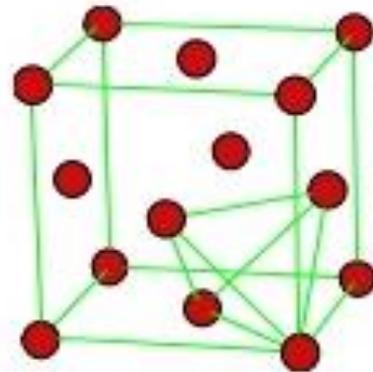
La figure ci-dessus est la projection d'un plan cristallographique de type (220).

Elle permet de montrer que $a_\gamma = D_\gamma + D_{SO}$, où D_{SO} est le diamètre du site octaédrique.

Ici, avec les valeurs précédentes, on trouve $D_{SO} = 0.1066$ nm, ce qui est plus petit que le diamètre de l'atome de carbone ($D = 0.1540$ nm).

Si les atomes de carbone sont bien en insertion dans le fer γ , ils ne trouvent donc leur place qu'en provoquant une déformation élastique du réseau, portant sur plusieurs atomes voisins.

Sites tétraédriques :



Voici l'un des 8 sites tétraédriques que contient la maille CFC.

Tous calculs faits, le diamètre de la sphère logeant dans ce type de site n'est que de 0.058 nm.

A part l'hydrogène, aucun autre atome ne peut y entrer.

6- / Où se trouvent les atomes de carbone dans le fer γ ?

Dans les sites octaédriques, comme on vient de le voir.

A 910°C, la solubilité en carbone dans γ est de 1.2% en masse.

- 1.2 g de carbone = $1.2/12 = 0.1$ mole de carbone.

- $98.8 \text{ g de fer} = 98.8/55.85 = 1.76 \text{ mole de fer.}$

Dans γ , il y a donc au maximum 1 atome de carbone pour 17.6 atomes de fer.
Arrondissons à 1 pour 16.

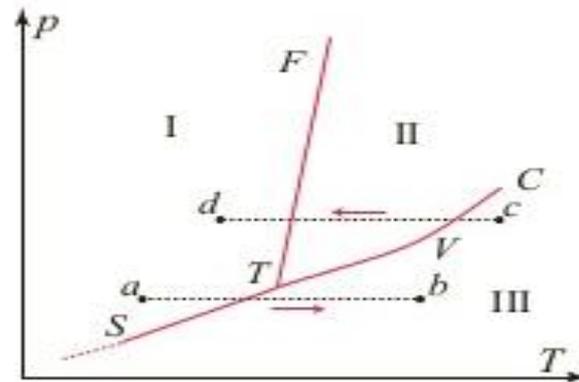
Puisqu'il y a 4 atomes de fer par maille, on trouve pour cette composition environ 1 atome de carbone toutes les quatre mailles.

Puisqu'il y a autant de sites octaédriques que d'atomes de fer (4 par maille), il y a seulement 1/16 des sites occupés (environ 6%).

C'est la raison de la taille exagérée du carbone par rapport au site.

Diagramme d'états du corps pur

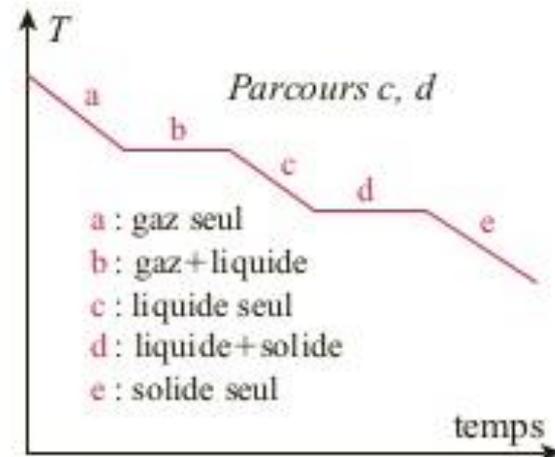
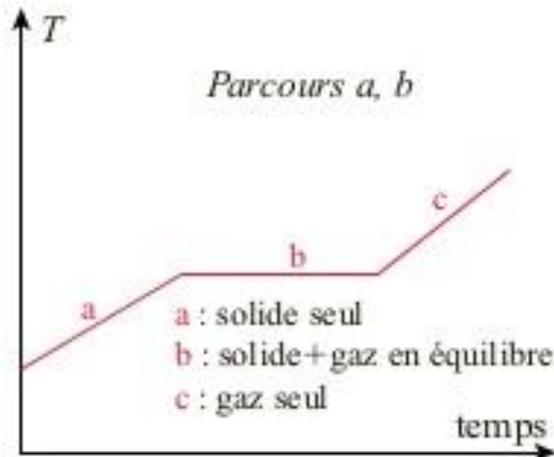
Tracer les graphes représentant la variation de la température d'un échantillon d'un corps pur au cours des trajets a,b et c,d parcourus dans le diagramme d'états ci-après. Indiquez sur les diverses parties de ces graphes quelles sont les phases (solide, liquide, gaz) présentes.



La tâche demandée suppose évidemment que vous sachiez déchiffrer un tel diagramme. Comment appelle-t-on le point T, le point C, les courbes S, F et V ? Quel est l'état du système dans chacune des régions I, II et III ?

T : point triple ; C : point critique ; S : courbe de solidification ; F : courbe de fusion ; V : courbe de vaporisation. Région I : entièrement solide ; région II : entièrement liquide ; région III : entièrement gazeux. Sur les courbes : coexistence de deux phases (états).

- *Parcours a,b* – Le corps pur passe de l'état solide (en a) à l'état gazeux (en b), en se sublimant sous l'effet de l'élévation de la température. Pendant toute la durée de la sublimation, le point représentatif de l'état du système est sur la courbe S, et la température reste constante.
- *Parcours c,d* – La température diminue et deux changements d'état se produisent : condensation du gaz en liquide, à la rencontre de la courbe V, et solidification du liquide à la rencontre de la courbe F. La décroissance de la température marque deux paliers, correspondant aux deux changements d'état.



N.B. La variation linéaire de la température, la pente des segments a, c et e, ainsi que la longueur des paliers résultent de choix arbitraires.

- Définir un cristal
- Donner la différence entre solide cristallisé et un solide amorphe
- Donner les systèmes cristallins simples
- Quelles sont les quatre types de maille
- Définir le site cristallographique/interstitiel (donner des exemples)

Le cristal de cuivre a une structure cubique à faces centrées (**cfc**)

Masse volumique du cuivre métallique : 8920 kg. m^{-3}

Masse molaire atomique du cuivre : $63,55 \text{ g. mol}^{-1}$

Constante d'AVOGADRO : $6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

1. Donner le schéma cubique conventionnel du cristal
2. Déterminer le paramètre de maille a et le rayon métallique R_{cu} du cuivre
3. Déterminer la compacité C du réseau cristallin
4. Quelle est la coordinence du cuivre dans cette structure

L'or cristallise dans le système cubique à faces centrées (**CFC**). Un lingot d'un kilogramme occupe un volume $V = 52,5 \text{ mL}$. La masse molaire de l'or est $M = 197 \text{ g mol}^{-1}$.

1. Déterminer la masse volumique du cristal
2. Quel est le rayon atomique de l'or ?
3. Quelle est la compacité de cette structure ?