



## Cours: Science des Matériaux

Prof. : Mohammed AIT EL FQIH

# Plan

---

1

**Les différents types de matériaux : métalliques, organiques, céramiques, composites**

2

**Les critères de choix des matériaux**

3

**Les transformations de phases dans les alliages courants**

4

**Le comportement mécanique : élasticité, plasticité, rupture, fluage...**

5

**Le traitement des matériaux métalliques**

6

**Les principaux essais mécaniques**

---

# **Chap. I:Les différents types de matériaux : métalliques, organiques, céramiques, composites**

# Les différents types de matériaux

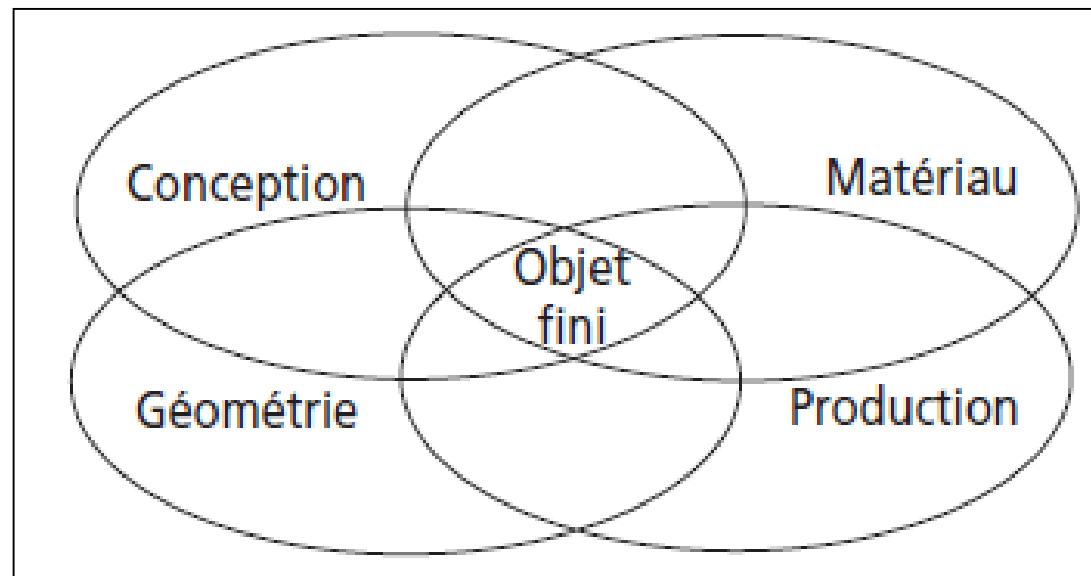
## I- Définition.

- La science des matériaux (**SDM**) est celle qui étudie la conception des matériaux.
- La **SDM** s'intéresse aux propriétés mécaniques et physiques des matériaux et à leur comportements sous l'action des efforts extérieurs.
- De manière symbolique et résumée, un matériau est une matière dont on fait un matériel.
- De manière plus précise et plus complète:  
**Un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée.**

# Les différents types de matériaux

- On peut donc dire qu'un Matériau est un solide utilisé par l'homme pour la fabrication d'objets.
- Exclus : gaz, liquides, les semi-conducteurs, matières énergétiques (charbon, combustibles nucléaires, ...)

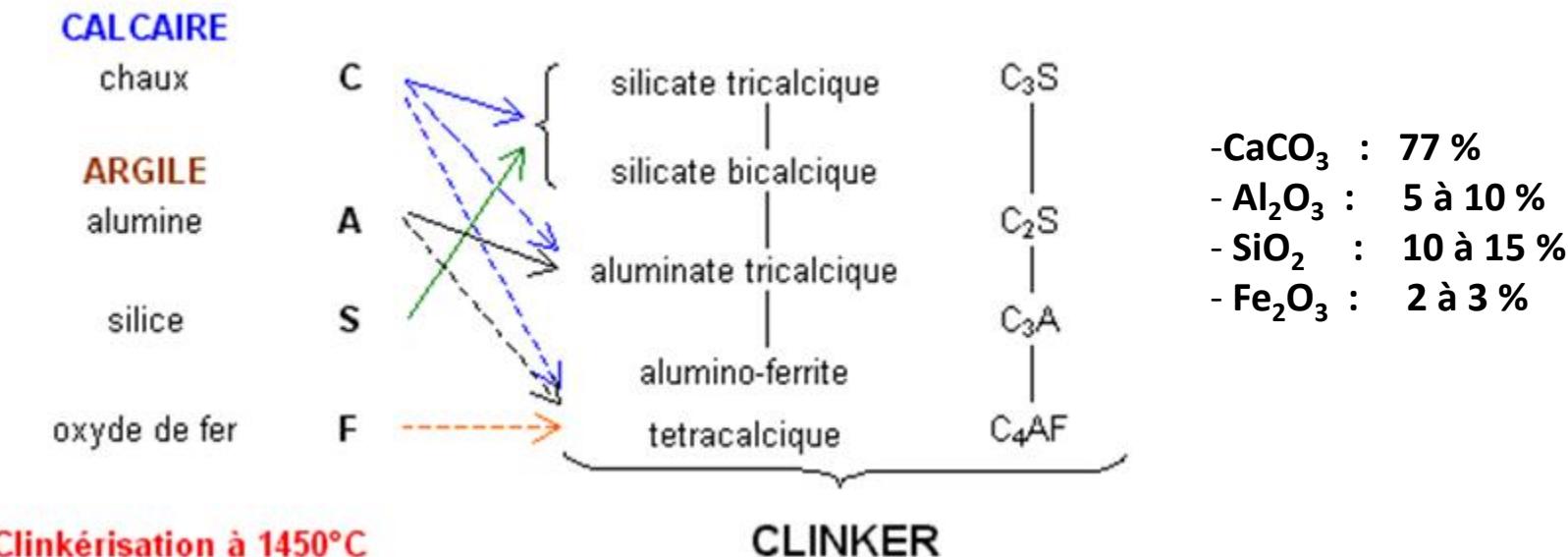
Figure 1. Procédure de réalisation d'un objet fini.



# Généralités sur les matériaux

- Exemple: Procédé de fabrication des ciments.

Figure 2. Processus de formation du clinker



# Les différents types de matériaux

- **Exemple:** Procédé de fabrication des ciments.

**Adjuvants: gypse, laitier de haut fourneau, cendres volantes, les schistes bitumineux, des fillers calcaires etc ...**

$T < 200^\circ\text{C}$	→ Déshydratation.
$T < 800^\circ\text{C}$	→ Préchauffage.
$800^\circ\text{C} < T < 1100^\circ\text{C}$	→ Décarbonatation.
$1100^\circ\text{C} < T < 1300^\circ\text{C}$	→ Formation des silicates.
$1100^\circ\text{C} < T < 1540^\circ\text{C}$	→ Fusion partielle.

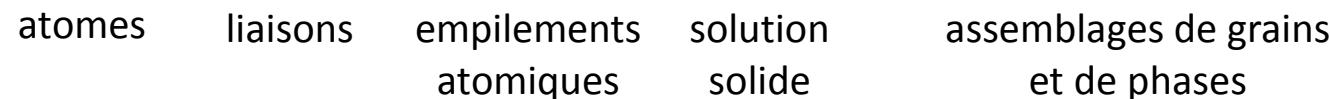


**Ciments (selon le type de procédé industriel utilisé)**

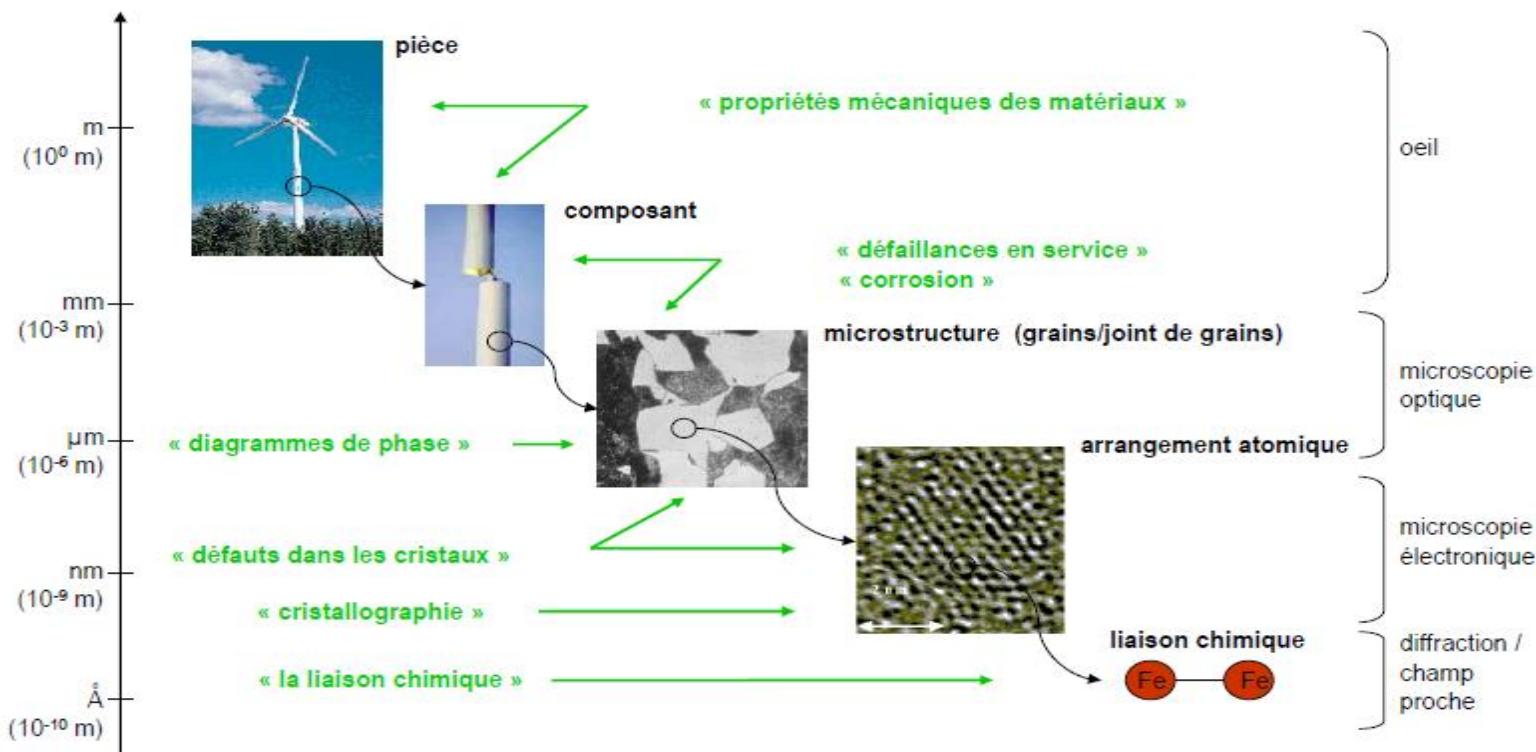
# Les différents types de matériaux

### **- Conclusion:**

**Les constitutives des matériaux passe par leur fabrication d'un ordre de grandeur allant du nm au m;**



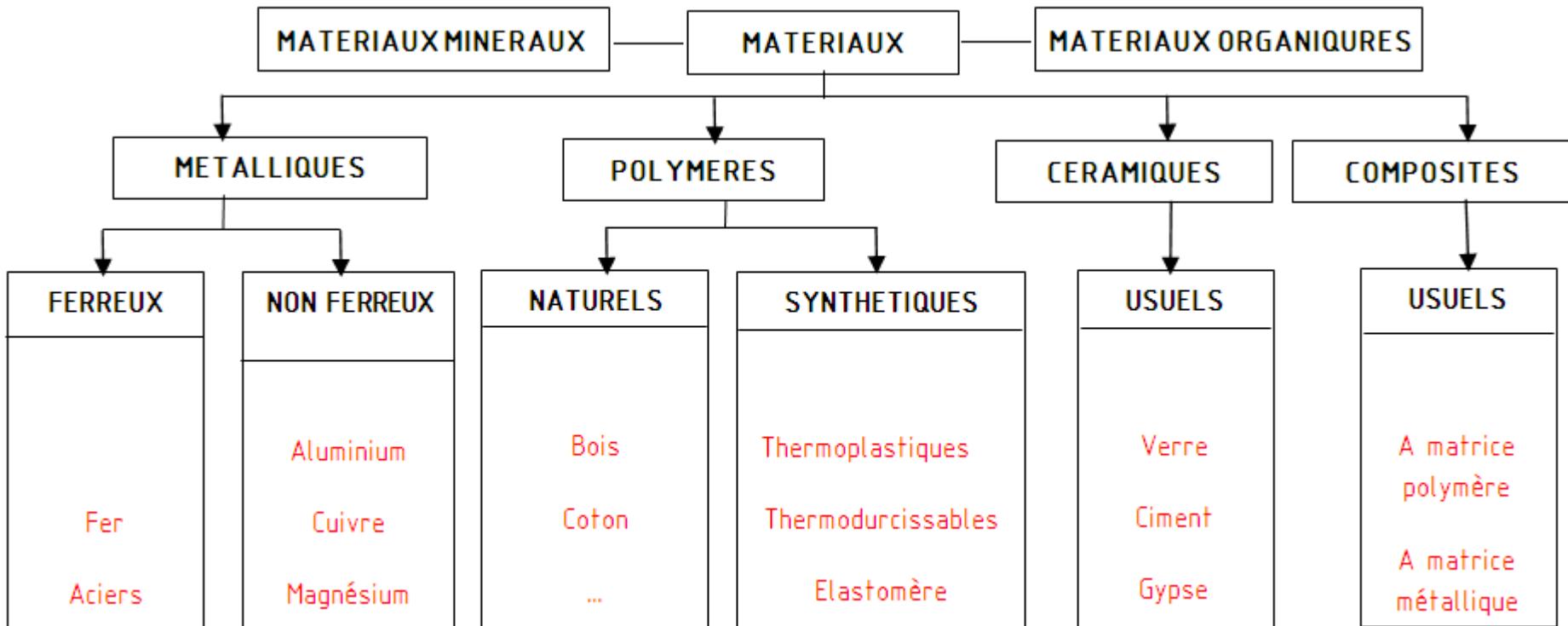
**Figure 3. Ordre de grandeur d'utilisation des matériaux**



# Les différents types de matériaux

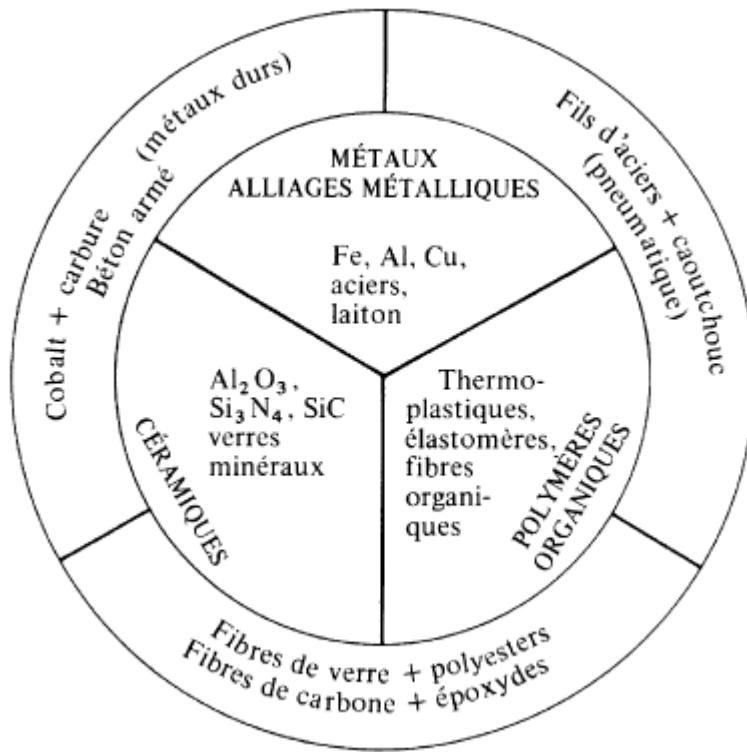
## II- Principales familles de matériaux .

- On classe habituellement les matériaux en quatre grandes familles :



# Les différents types de matériaux

## III- Classes des matériaux .



- Les matériaux sont classés suivant différents critères comme par exemple leur composition, leur structure ou leurs propriétés.
- Cette classification est basée sur la nature des liaisons et sur les structures atomiques.
  - Les métaux et leurs alliages (liaisons métalliques).
  - Les polymères organiques (liaisons covalentes et liaisons secondaires).
  - Les céramiques (liaisons ioniques et liaisons covalentes).

Figure 4. Les trois classes de matériaux: métaux, céramiques et polymères organiques avec quelques possibilités de combinaison pour former des matériaux composites.

# Les différents types de matériaux

## **IV- Propriétés .**

-**Les propriétés d'usage des matériaux → deux origines :**

- **Composition chimique (nature des espèces atomiques qui les constituent).**
- **Microstructure (organisation des atomes constitutifs).**

- **Propriétés mécaniques: module élastique, contrainte, déformation, dureté.**

- **Propriétés physiques: masse volumique, porosité, forme, couleur, rugosité, surface spécifique, etc**

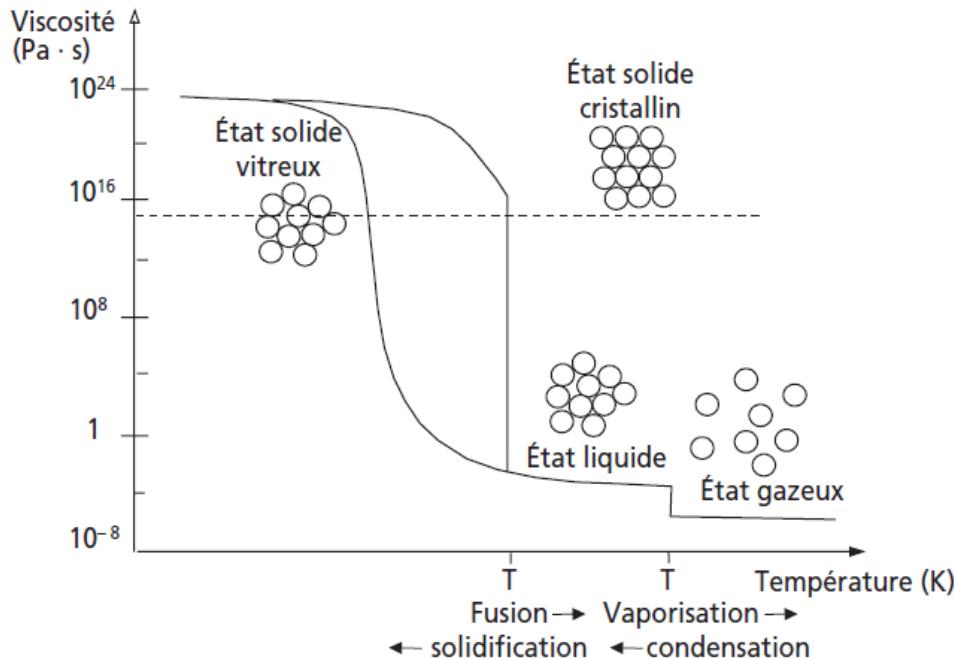
- **Propriétés Chimiques: perméabilité, conductivité électrique, pH, etc**

- **Propriétés thermiques: Dilatation, point de fusion, conductivité thermique, etc**

# Les différents types de matériaux

## V- Changements d'état de la matière

### V- I Effet de la température

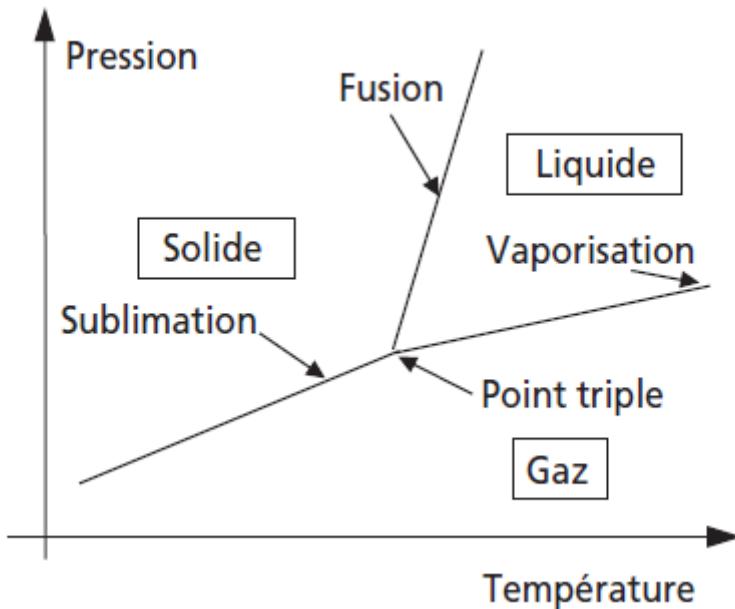


- Température -> mesure -> degré d'agitation et de désordre.
- $T \uparrow$  --> forte vibration des atomes – dilatation thermique – distance importante entre atomes et molécules.
- $T \approx \uparrow$  --> forces d'attraction interatomique non négligeable - atomes en désordre mais à courte distance – passage à l'état liquide.
- $T \downarrow$  --> forces d'attraction interatomique devenant prépondérantes – passage à l'état:
  - Solide cristallisé (atomes ordonnés).
  - Solide amorphe ou vitreux (atomes en désordre).

Figure 5. Changements d'état de la matière en fonction de la température.

## V- Changements d'état de la matière

### V- 2 Effet de la pression



- La pression joue un rôle dans le changement de l'état de la matière.
- L'augmentation de la pression stabilise les états condensés (solide, liquide) P/P à l'état dispersé (gazeux).
- $P \uparrow \rightarrow T$  de changement d'état  $\uparrow$

Figure 6. Variation des états physiques en fonction de la pression et de la température.

# Les différents types de matériaux

## I- Structures (Atoms).

 métaux (75% des éléments)

## métalloïdes

autres

## halogènes

 gaz rares

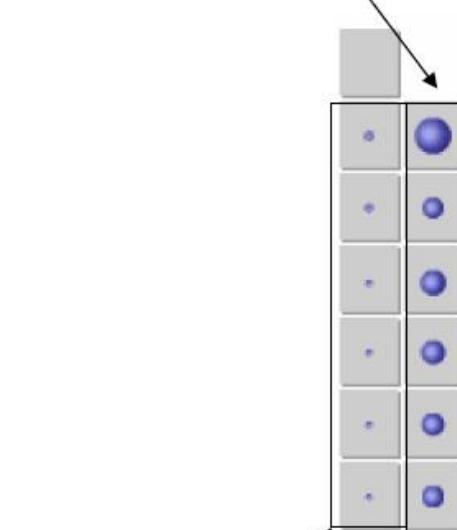
# Les différents types de matériaux

## I- Structures (Température de fusion).

La température de fusion indique la "force" des liaisons.

alcalino-terreux :

650 à 1277°C

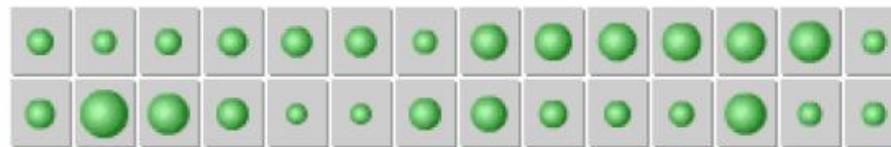
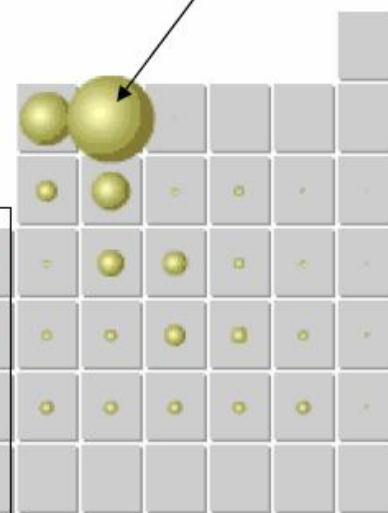


métaux de transition :  
-38 à 3410°C

-38 à 3410°C

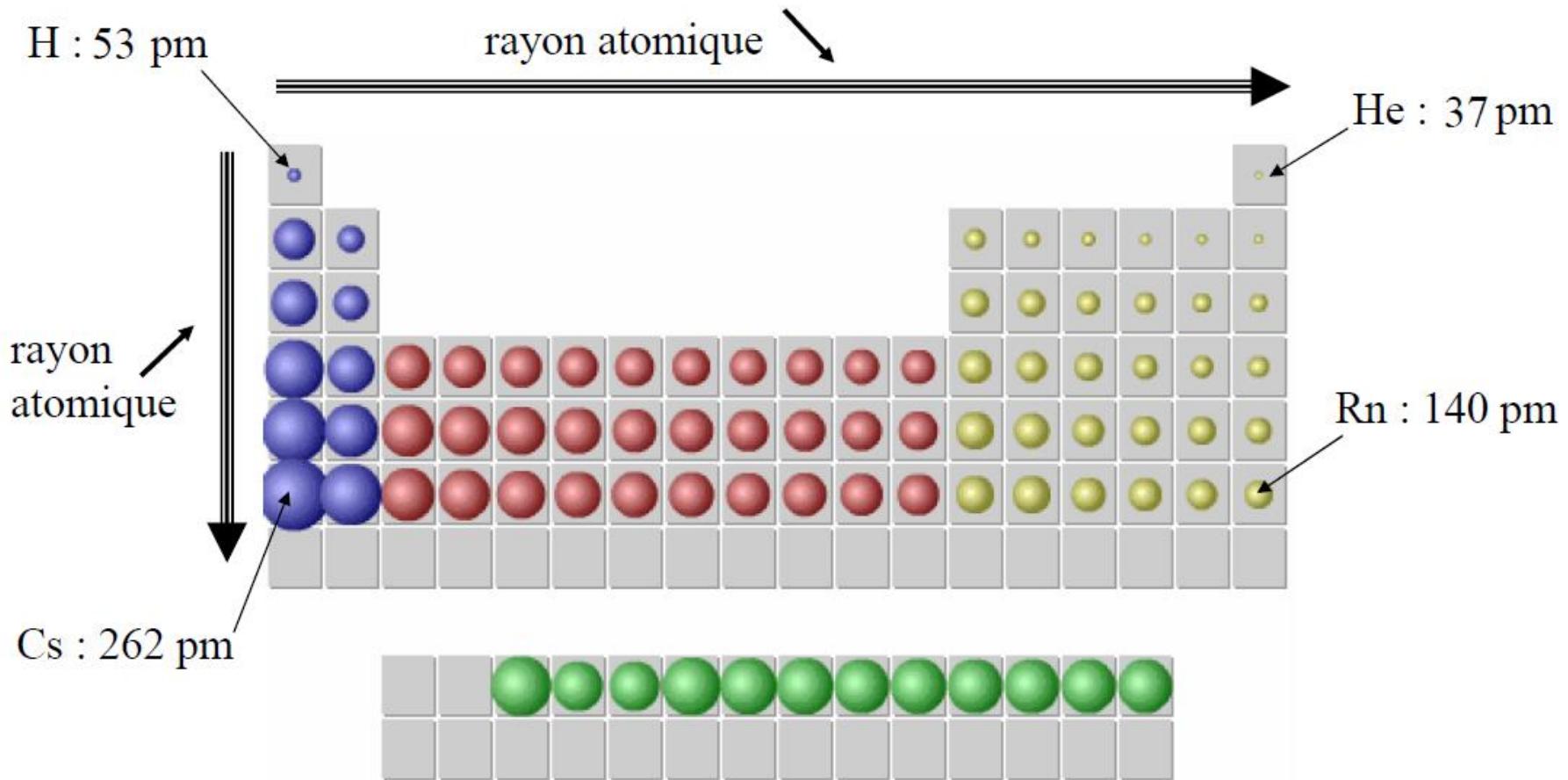
métaux alcalins :  
29 à 180°C

C : 3727°C



# Les différents types de matériaux

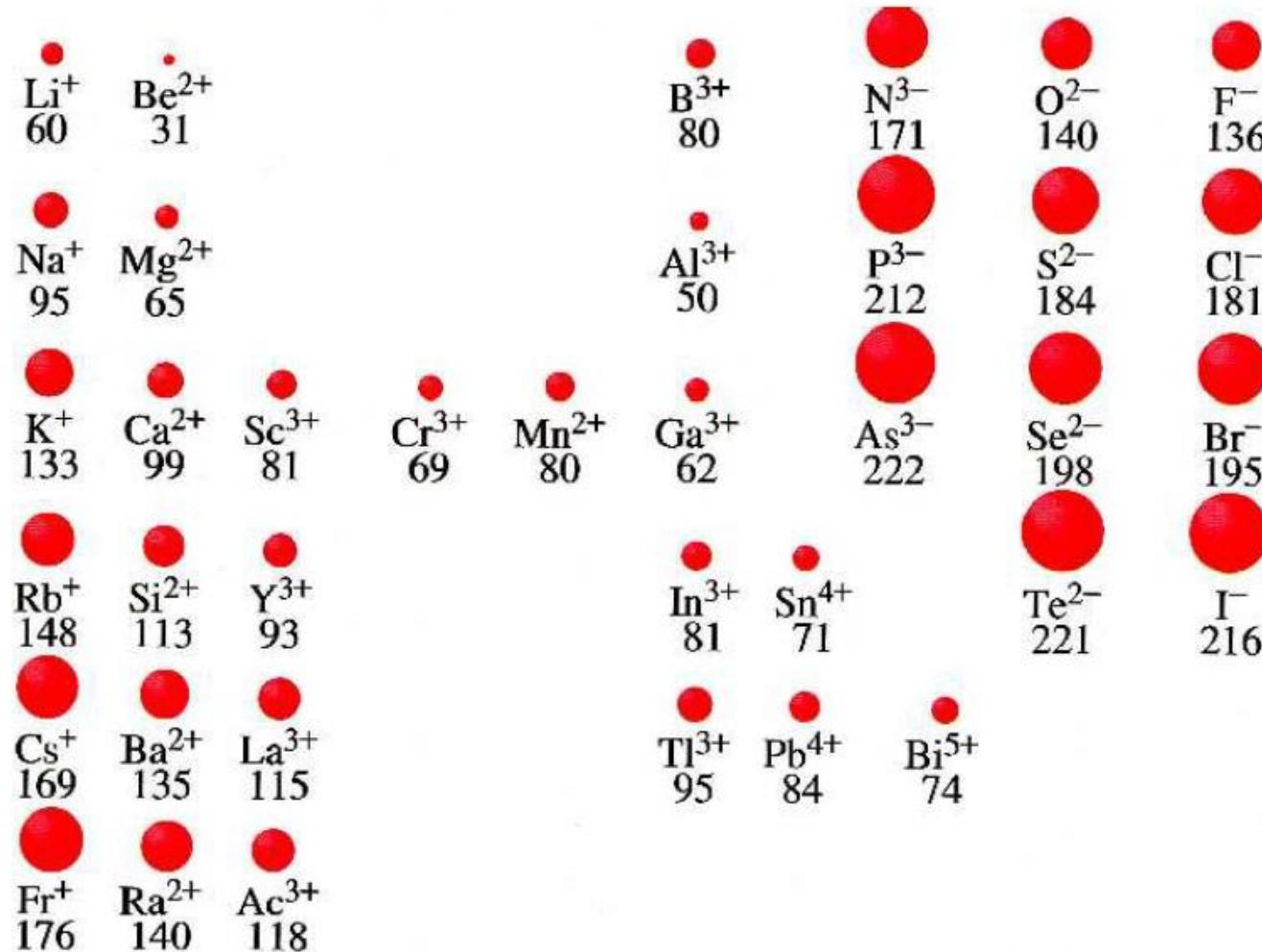
## I- Structures (Rayon atomique).



# Les différents types de matériaux

## I- Structures (Rayon ionique).

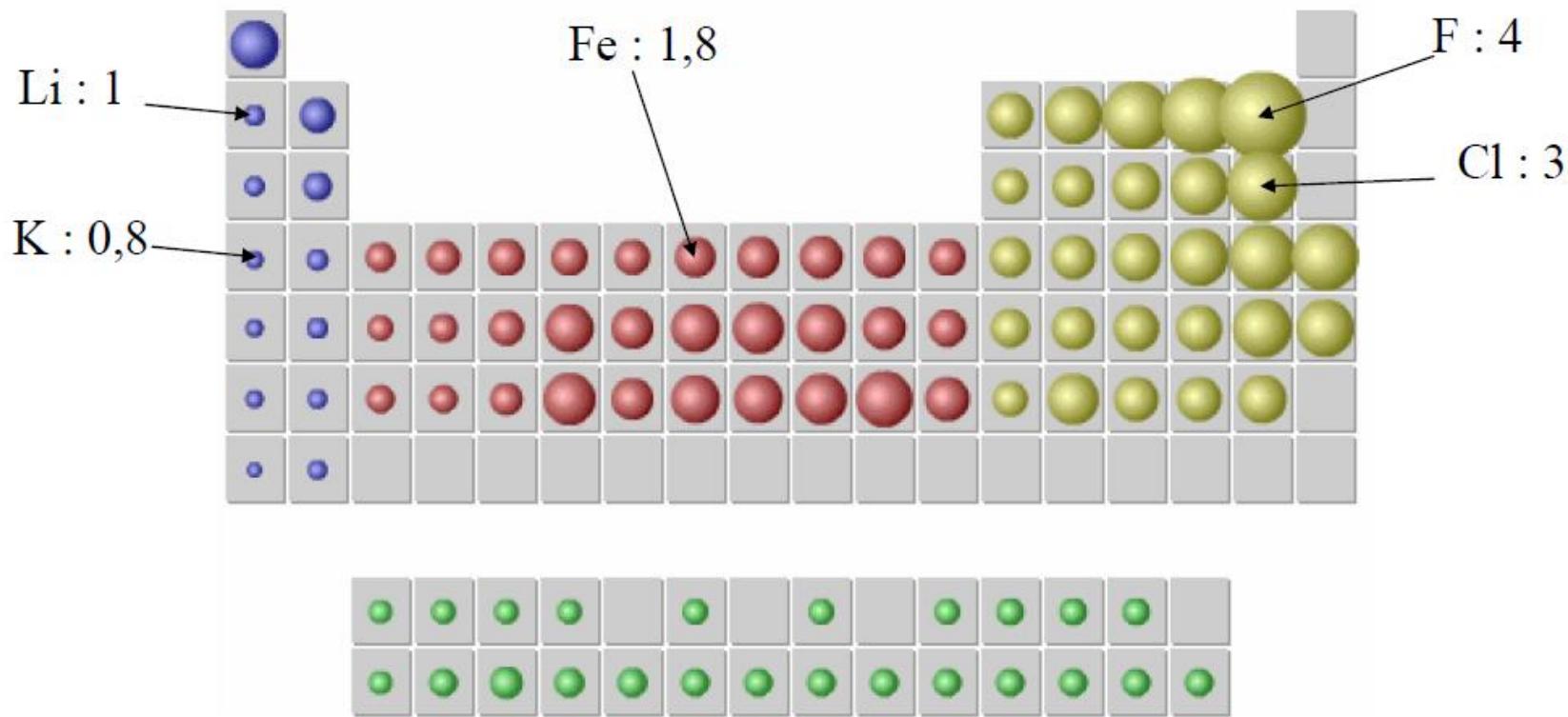
Rayon ionique  $\neq$  rayon atomique



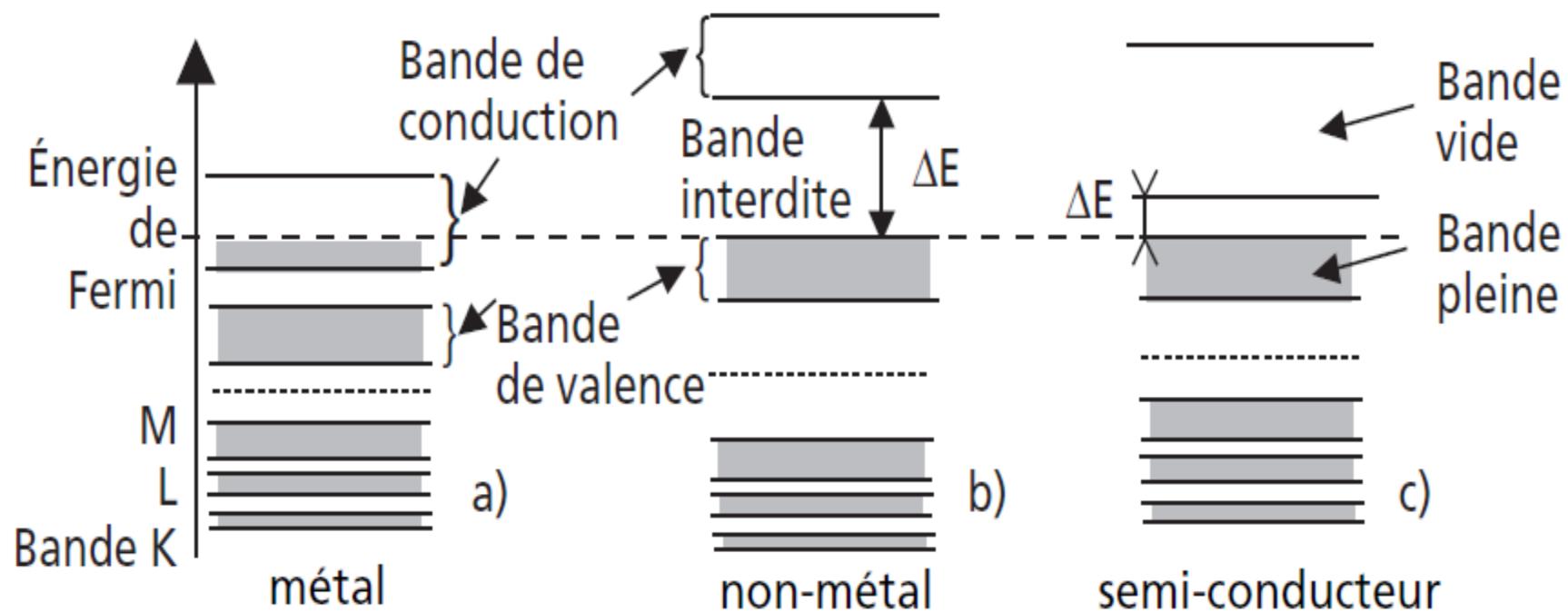
# Les différents types de matériaux

## I- Structures (Electronégativité).

Attraction vis-à-vis des électrons partagés ou gagnés (mesure : Pauling)



## II- Diagramme d'énergie



# Les différents types de matériaux

## II- Liaisons

### II-I Nature des liaisons

- **Liaisons chimiques → Liaisons fortes :**

- **liaison covalente (deux non-métaux; ex: C diamant, Ge, Si, Cl<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ...)**
- **liaison ionique (un métal et un non métal; ex: NaCl, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ...)**
- **liaison métallique (deux métaux; ex: CuBe, CuNi, CuAl ...)**

- **Liaisons physiques → Liaisons faible:**

- **liaison hydrogène (ex: polymères organiques, ciments ...)**
- **liaison de Van der Waals.**

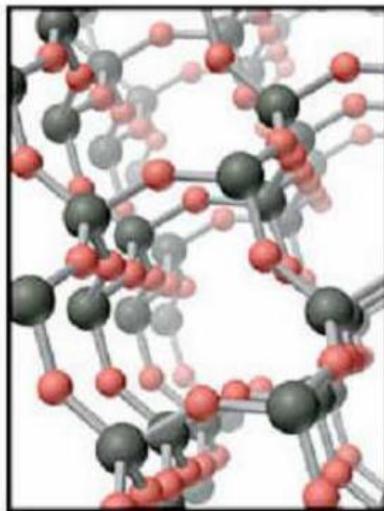
# Les différents types de matériaux

## II- Liaisons

### II-2 Liaison covalente

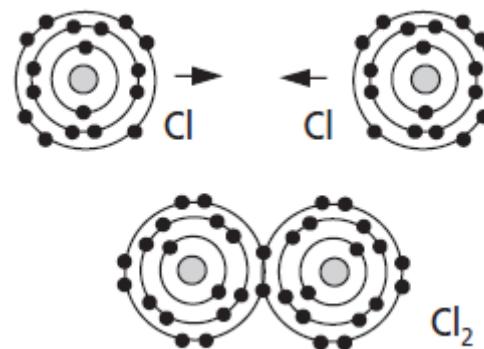
Mise en commun d'un ou de plusieurs électrons pour remplir la couche externe (liaison assurée par des électrons de la bande de valence) :

- Liaison dirigée → faible compacité
- Liaison forte → matériaux durs, rigides



Quartz

● Si  
● O



# Les différents types de matériaux

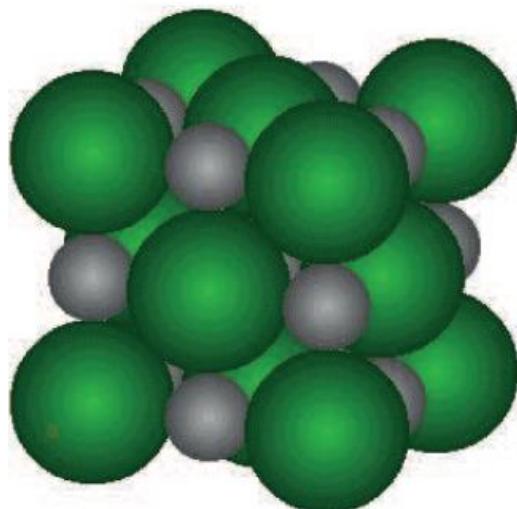
## II- Liaisons

### II-3 Liaison ionique

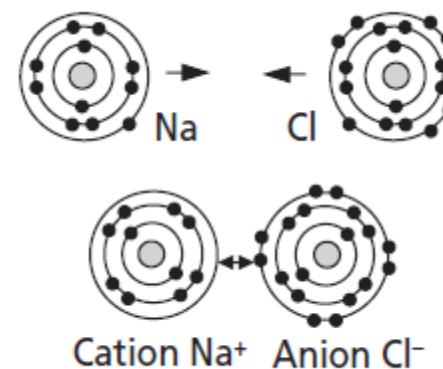
Assurée par le transfert d'un électron d'un atome à l'autre (un atome d'un métal et un atome d'un non-métal ; ex: NaCl)

- Liaison non dirigée

- Liaison forte



Liaison ionique: NaCl



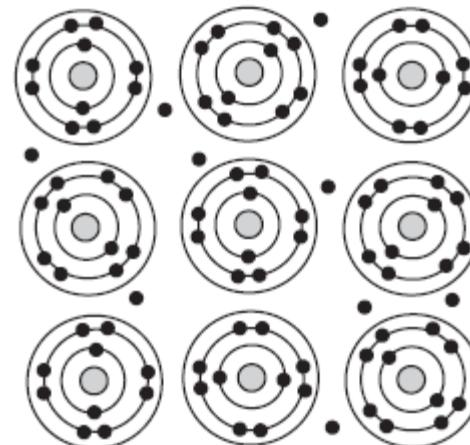
# Les différents types de matériaux

## II- Liaisons

### II-4 Liaison métallique

Assurée par la mise en commun d'électrons de la couche périphérique; le « gaz » constitué par ces électrons libres et délocalisés assure la cohésion de l'ensemble des cations restants.; (Liaison entre deux éléments métalliques ; ex: Cristal de sodium Na)

- Métaux normaux (Al, alcalins...) : liaison assez faible
- Métaux de transition → Liaison plus forte : atomes plus proches, densité ↑



# Les différents types de matériaux

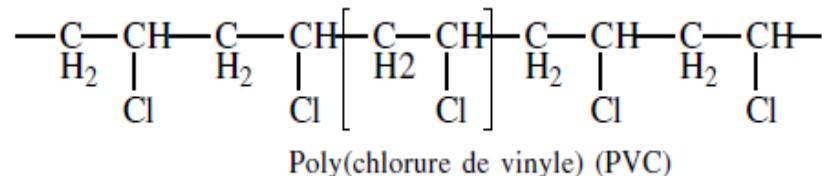
## II- Liaisons

## II-4 Liaisons faibles (Liaison hydrogène et liaison de Van der Waals)

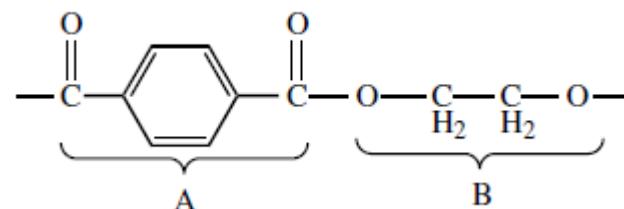
Ce sont de simples attractions électrostatiques entre charges électriques de signes opposés.

## -Liaisons de Van der Waals entre macromolécules dans un polymère

**poly(chlorure de vinyle) (PVC):**

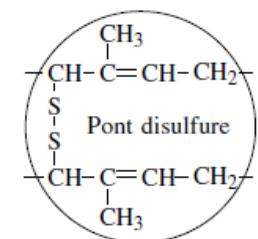


**poly(ethyleneterephthalate) (PET):**



**polyisoprene 1-4 cis (caoutchouc naturel) vulcanisé au soufre tel qu'on le trouve dans les pneumatiques de voiture.**

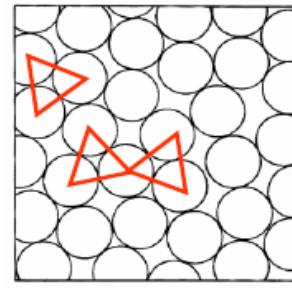
-Liaisons-hydrogène entre molécules d'eau  $\text{H}_2\text{O}$  dans la glace.



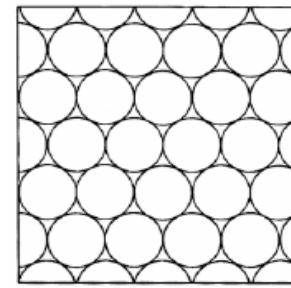
# Les différents types de matériaux

## III- Structures

### SOLIDES AMORPHES



### SOLIDES CRISTALLINS

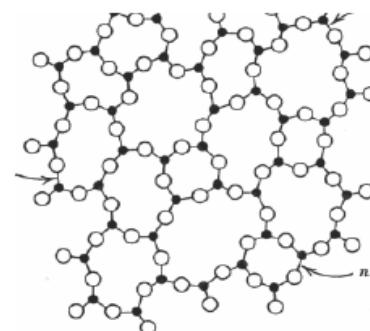


Matière condensée

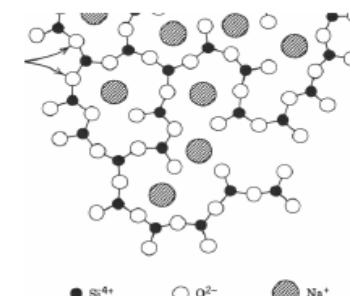
#### III-I Solides amorphes

Dans un solide amorphe ou vitreux, les atomes sont disposés aléatoirement et proches les uns des autres (répétition non périodique).

→ Pas d'ordre à longue distance



verre de silice



verre de silicate

# Composition et structure des matériaux

## III- Structures

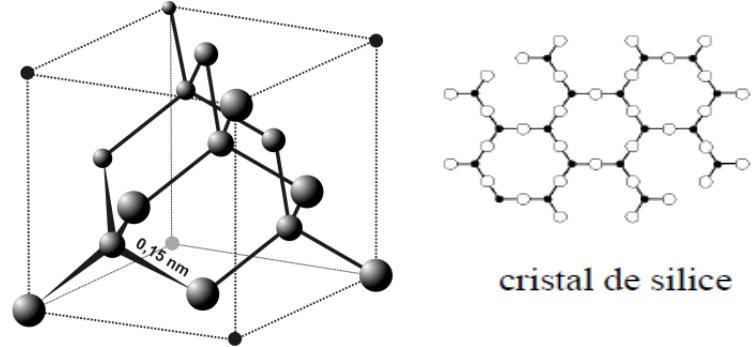
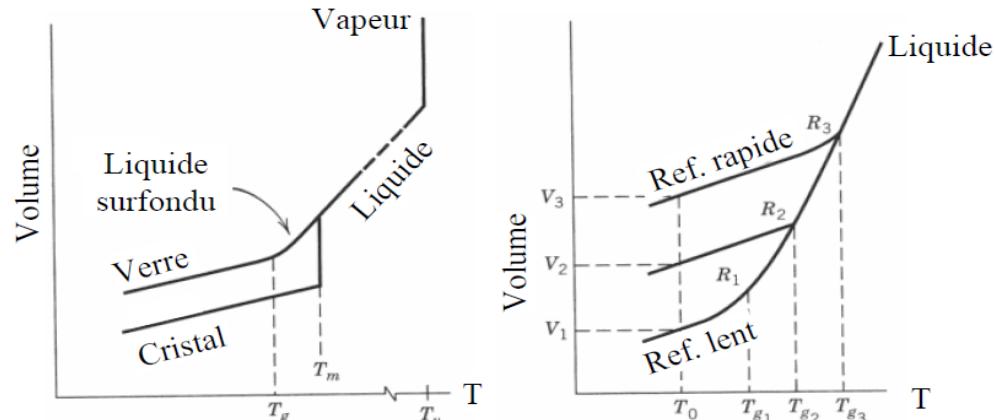
### III-2 Solides cristallins

Un solide cristallin (ou un cristal) est un ensemble d'atomes (ou de molécules) disposés de manière périodique dans les trois directions. Il peut être défini à partir de deux données : le réseau cristallin et le motif atomique.

→ Ordre à courte distance qu'à longue distance

### III-3 Transition vitreuse et cristallisation

Refroidissement à partir de l'état gazeux ou liquide



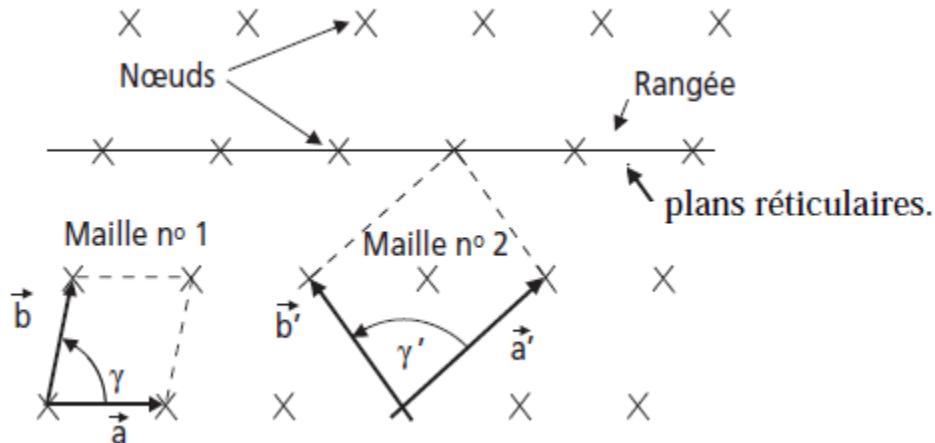
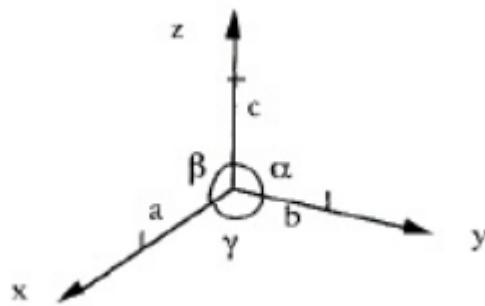
- Refroidissement ->  $\nearrow$  viscosité (évolution thermodynamique ex. variation du volume spécifique ou d'enthalpie avec la T).
- Liquide ->  $\searrow T$  -> contraction ( $T_m=T_f$ )
- Modes de refroidissement.
  - Cristallisation : transition isotherme avec dégagement de chaleur
  - Transition vitreuse : sans dégagement de chaleur

# Les différents types de matériaux

## III- Structures

### III-3 Matériaux cristallins

- Ils sont représentés par un modèle tripériodique caractérisé par des paramètres dits paramètres cristallins ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) qui sont les distances entre les atomes les plus proches voisins dans les trois directions de l'espace.
- On définit aussi  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  Les angles que font les 3 axes (respectivement oy.oz, ox.oz et ox.oy) entre eux.
- $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  Définissent un système cristallin.



La maille n° 1 est un exemple de maille élémentaire (un nœud par maille); la maille n° 2 est un exemple de maille multiple.

Figure 8. Définition d'un système cristallin

# Les différents types de matériaux

## III- Structures

### III-4 Empilements d'atomes: Cristaux et symétries

Combinaisons d'une rotation + translation ou inversion (symétrie centrale).

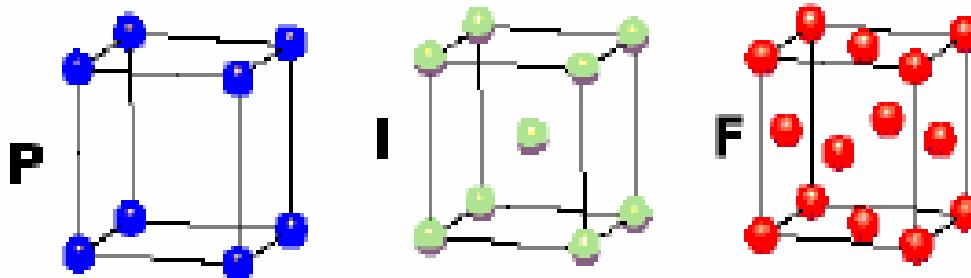
→ seuls angles de rotation possibles (opération de symétrie) : axes de rotation

d'ordre 1, 2, 3, 4, 6 → Rotation:  $\frac{2\pi}{6}$ ,  $\frac{2\pi}{4}$ ,  $\frac{2\pi}{3}$ ,  $\frac{2\pi}{2}$ ,  $\frac{2\pi}{1}$

### III-5 Réseaux de Bravais

Cubique

$a = b = c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

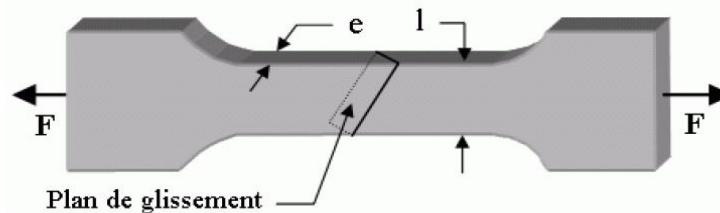


# Les différents types de matériaux

## Exercices.

On réalise un essai de traction sur un monocristal de fer de haute pureté (% Fe = 99,999 %). Le fer a une structure cristalline C.C. avec un paramètre de maille  $a = 0,287 \text{ nm}$ . Le schéma de l'éprouvette de traction est présenté à la figure ci-dessous et les dimensions de sa section utile sont les suivantes:

largeur  $l = 8 \text{ mm}$ ; épaisseur = 4 mm.



Quelle est la longueur (en nm) du vecteur de Burgers b des dislocations dans le fer ?

Dans les métaux (liaisons non directionnelles), la longueur  $b$  du vecteur de Burgers est égale à la distance interatomique. Dans le réseau CC du fer, les atomes de fer se touchent selon la grande diagonale du cube. Par conséquent, on obtient :

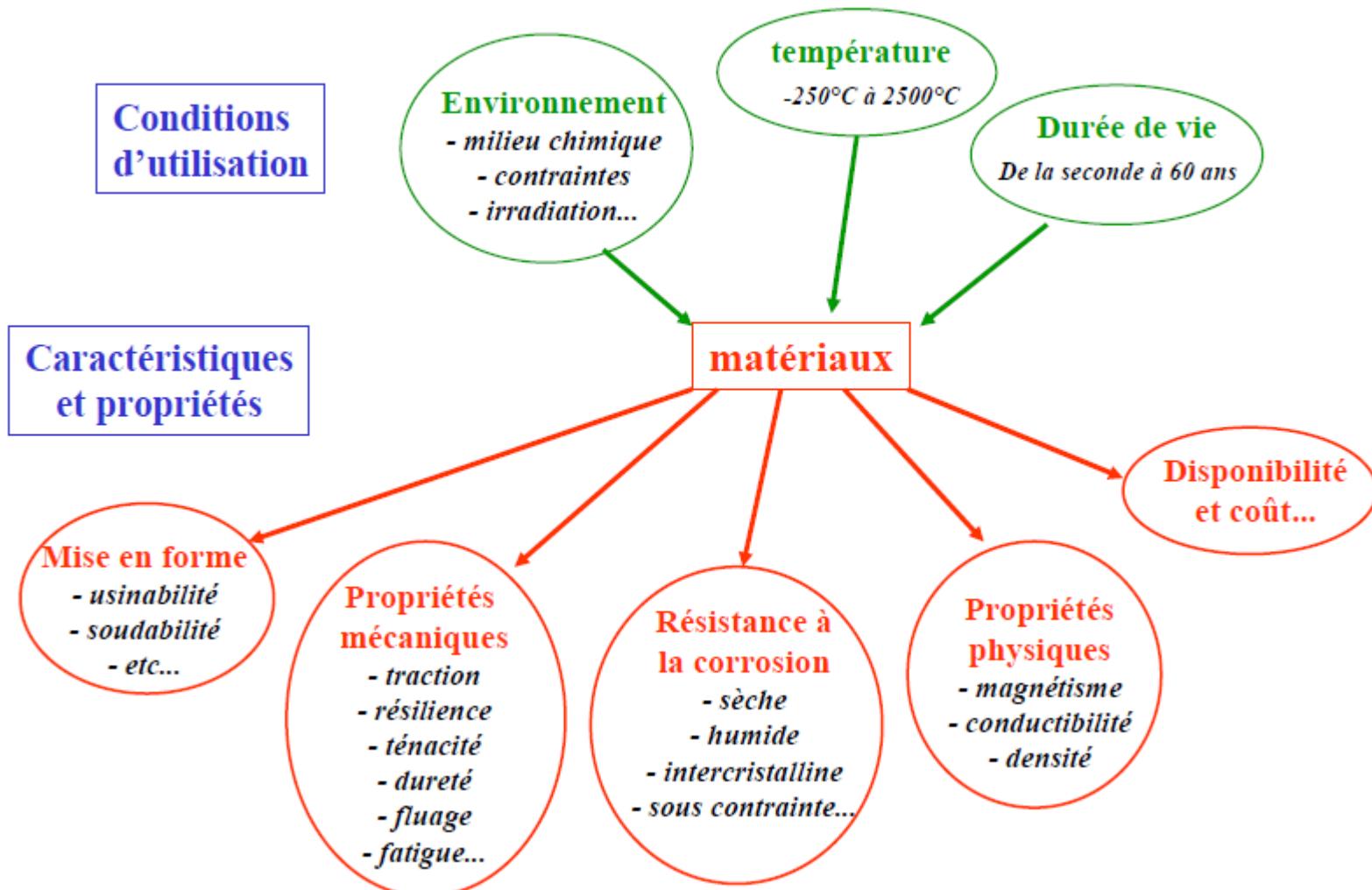
$$b = a\sqrt{3}/2 = 0,249 \text{ nm}$$

$$\boxed{b = 0,249 \text{ nm}}$$

---

## **Chap. 2 : Les critères de choix des matériaux**

# Les critères de choix des matériaux



# Les critères de choix des matériaux

<i>Générales</i>	Volume atomique Densité Contenu énergétique Fraction recyclable Prix	
<i>Mécaniques</i>	Module d'Young Module de cisaillement Module de compressibilité Module de Poisson Limite d'élasticité Dureté	Résistance en traction Résistance en compression Ductilité Ténacité Limite d'endurance Coeff. d'amortissement
<i>Thermiques</i>	Point de fusion Transition vitreuse T. minimale d'utilisation T. maximale d'utilisation Chaleur latente de fusion	Chaleur spécifique Conductivité thermique Diffusivité thermique Coeff. de dilatation
<i>Electriques</i>	Résistivité Constante diélectrique Potentiel de claquage	

**Principales caractéristiques des matériaux**

<b>Résistance à l'environnement chimique</b>	<b>Autres agressions</b>
Résistance à l'eau douce Résistance à l'eau de mer Résistance aux acides forts Résistance aux acides faibles Résistance aux bases fortes Résistance aux bases faibles Résistance aux solvants organiques Résistance à l'oxydation à 500°C	Inflammabilité Résistance aux UV Résistance à l'usure

# Les critères de choix des matériaux

	Métaux	Céramiques	Polymères	Composites
Densité	Moyenne Elevée	Moyenne	Faible Très faible	Moyenne Faible
Prix	Faible Elevé	Elevé (techniques) Faible (gde diffusion)	Faible Elevé	Elevé
Elasticité	Elevée	Très élevée	Moyenne Faible	Elevée
Résistance mécanique	Elevée	Très élevée (compression)	Moyenne Faible	Elevée
Tolérance aux défauts et aux chocs	Très tenace	Très fragile	Peu tenaces mais grande énergie absorbée	Très tenaces
Température d'utilisation	Moyennes Hautes	Hautes Très hautes	Moyennes Faibles	Moyennes
Tenue aux Agressions chimiques	Moyennes Mauvaise	Bonne Très bonne	Moyenne	Moyenne
Conduction de la chaleur	Bonne Très Bonne	Moyenne Faible	Faible Très faible	Faible
Conduction de l'électricité	Bonne Très bonne	Faible Très faible		
Facilité de mise en forme	Facile	Difficile (techniques) Facile (gde. diffusion)	Très facile	Moyenne dépendant de la forme
Facilité d'assemblage	Facile	Moyenne	Facile	Difficile

**Quelques caractéristiques de matériaux : Comparaison**

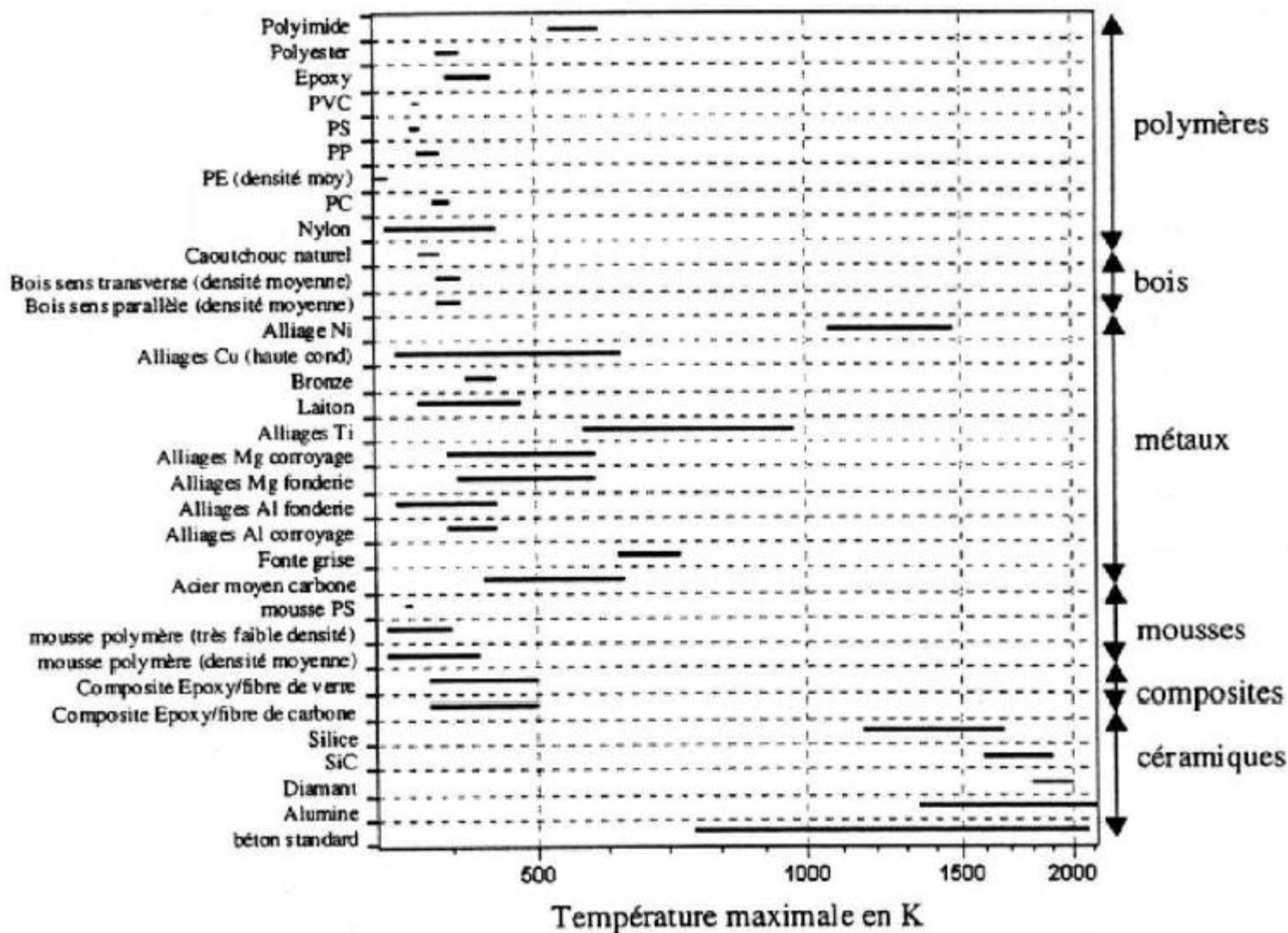
# Les critères de choix des matériaux

Intervalle de température °C	Principaux matériaux	Applications
-273 à -20	Alliages de Cuivre, Acier inoxydables austénitiques, Alliages d'aluminium	Superconduction, équipement O2, N2, pipeline
0 à 150	la plupart des polymères (jusqu'à 60°C ou 120°C) Alliages de Magnésium (jusqu'à 200°C) Alliages d'Aluminium (jusqu'à 250°C) Aciers,	construction civile automobile aérospatial appareils ménagers
150 à 400	Polymères : PEEK, PEK, PI, PPD, PTFE, PES Alliages de cuivre renforcés de fibres (400°C) Nickel, Ag-Ni	industrie alimentaire automobile (moteur)

**Choix des matériaux en fonction du domaine de température d'utilisation**

<b>400 à 575</b>	Acier ferritiques faiblement alliés Alliages de Titane (450°C) Inconels	échangeurs thermiques turbines à vapeur compresseurs de turbine à gaz
<b>575 à 650</b>	super alliages à base acier acières inoxydables ferritiques acières inoxydables austénitiques inconels et nimonics	turbines à vapeur échangeurs thermiques
<b>650 à 1000</b>	acières inoxydables austénitiques Nichromes, nimonics super alliages base nickel super alliages base cobalt	turbines à gaz chimie et pétrochimie réacteurs composants de fours construction nucléaire
<b>au dessus de 1000</b>	métaux réfractaires Mo, W, Ta Alliages de Nb, Mo, W, Ta céramiques Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , SiC ...	fours spéciaux turbines expérimentales

# Les critères de choix des matériaux



# Les critères de choix des matériaux

## Résistance à l'usure

	X	X	X	X	X
Polyimide					
Polyester		X			
Epoxy		X			
PVC	X				
PS		X			
PP		X			
PE (densité moy)			X		
PC		X			
Nylon	X				
Caoutchouc naturel			X		
Bois sens transverse (densité moyenne)	X				
Bois sens parallèle (densité moyenne)	X				
Alliage Ni-Cr				X	
Alliages Cu (haute cond)				X	
Bronze				X	
Laiton				X	
Alliages Ti		X			
Alliages Mg corroyage		X			
Alliages Mg fonderie		X			
Alliages Al fonderie		X			
Alliages Al corroyage		X			
Fonte grise				X	
Acier moyen carbone				X	
mousse PS	X				
mousse polymère (très faible densité)	X				
mousse polymère (densité moyenne)	X				
Composite Epoxy/fibre de verre			X		
Composite Epoxy/fibre de carbone			X		
Silice			X		
SiC				X	
Diamant				X	
Alumine				X	
béton standard	X				
	Très mauvais	Mauvais	Moyen	Bon	Très Bon

polymères

bois

métaux

mousses

composites

céramiques

# Les critères de choix des matériaux

## Classification des formes

Formes								
Axisymétrique			Prismatique		non axisymétrique non prismatique			
Uniforme	sections diverses	cuvette	uniforme	sections diverses	anguleuse	plaqué	cuvette	complexe
pleine A10	pleine A20	cylindrique A30	pleine P10	pleine P20	pleine N10	plate N20	cylindrique N30	N40
creuse A11	creuse A21	conique A31	creuse P11	creuse P21	creuse N11	emboutie N21	conique N31	

# **Chap. 3: Les transformations de phases dans les alliages courants**

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

---

## I- Introduction.

3 Etats de la matières : Solide, Liquide et Gaz (il existe une 4 qui est le plasma).

Les diagrammes d'équilibres ou de phases sont les représentations graphiques qui définissent des domaines d'existence des phases présentes dans tous les alliages possibles lors de mélange de 2 ou plusieurs constituants.

## II- Définitions.

### II- 1. Système.

On appelle système un mélange de corps simple ou composé entre lesquelles des réactions physiques ou chimiques peut se rassembler.

### II- 2. Constituant.

Un constituant ou un composant est une partie chimique initiale du système.

### II- 3. Phase.

C'est une partie physiquement homogène du système. La composition y est la même en tous points.

Solide: généralement une phase. Liquide: une seule phase (si miscible) ou plusieurs phase si non.

Gaz: une seule phase.

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

---

## II- Définitions.

### II- 4. Facteurs d'équilibres.

Grandeurs dont les variations peuvent entraîner une transformation du système.

P, T, concentration, composition chimique.

#### II- 4- a. Variables de position.

Ces variables sont liées à la composition de la matière pour un système à C constituants indépendant on a: (C-I) variable de position.

#### II- 4- b. Variables d'action.

Température (chaleur) et pression (travail).

### II- 5. Variance d'un système en équilibre.

On appelle variance d'un système en équilibre le nombre de facteur que l'on peut varier indépendamment sans provoquer la rupture de l'équilibre.

$$V = C + p - \varphi$$

V: variance du système, C: nombre de constituant indépendant

(C = N – r, avec N: nombre de constituant et r: nombre de relation entre constituant)

p: nombre de facteur physique de l'équilibre (exp: 2 pression + température).

φ: nombre de phase.

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

---

## II- Définitions.

### II- 5. Variance d'un système en équilibre.

$$V = C + p - \phi$$

Dans ce qui suit, on considérera que la pression à peut d'influence (phase condensé). On trace les diagrammes isobare  $P = Cte = 1 \text{ atm} \Rightarrow p = 1(T)$ ;  $C = 2 \Rightarrow V = 3 - \phi$  avec  $\phi \leq 3$ .

-  $\phi = 1 \Rightarrow V = 2$ ; système bivariants, pour déterminer l'état du système il faut se fixer la température et la concentration.

-  $\phi = 2 \Rightarrow V = 1$ ; système monovariant.

-  $\phi = 3 \Rightarrow V = 0$ ; système invariants, la température et la concentration sont fixe et bien déterminés.

## III- Représentation du diagramme d'équilibre.

### III- 1. Introduction.

Pour un mélange de composition globale on se propose de déterminer la composition et la nature des différentes phases présentes en fonction de la température.

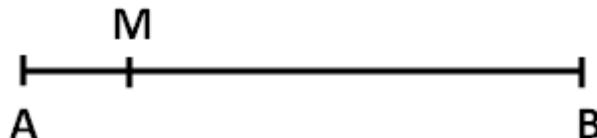
Méthodes utilisées: Analyse thermique simple (ATS), Analyse thermique différentielle (ATD) ...

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

## III- Représentation du diagramme d'équilibre.

### III- 2. Règle des moments.

Généralement utilisée pour déterminer la composition d'un constituant.  
Soit A et B deux corps purs.



Fraction massique :

$$m_A \cdot AM = m_B \cdot MB \Rightarrow \frac{m_A}{MB} = \frac{m_B}{AM} = \frac{m_t}{AB}$$

avec,  $m_t = m_A + m_B$

Fraction molaire :

$$\frac{x_A}{MB} = \frac{x_B}{AM} = \frac{x_A + x_B}{AB} = \frac{1}{AB}$$

avec,  $x_A + x_B = 1$

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

## III- Représentation du diagramme d'équilibre.

### III- 3. Principe.

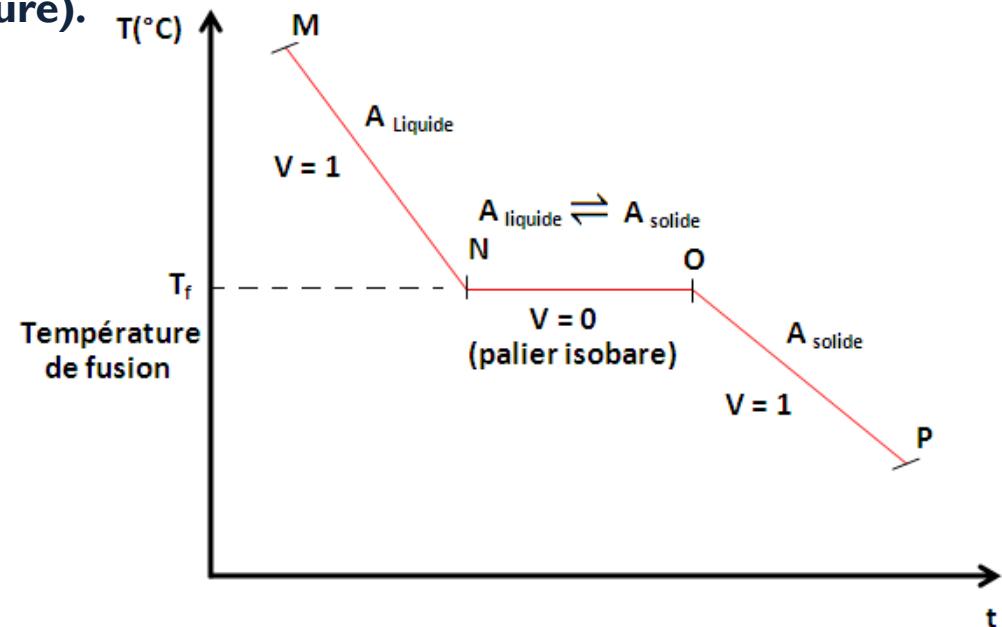
Expérimentalement, le diagramme d'équilibre est établie par ATS. On repère la variation de la température en fonction du temps (chauffage ou refroidissement).

### III- 4. Diagramme d'un corps pur.

On porte le corps A au delà de  $T_f$  et on étudie le mode de refroidissement en fonction du temps.  $C = I; V = 2 - \varphi$  ( $P = I$ , température).

- MN: Refroidissement du liquide.
- N: Température de fusion (premiers cristaux de A apparaissent).
- NO:  $V = 0$ ; système invariant.

- O: Disparition de la dernière goutte du liquide.
- OP: Refroidissement du solide.

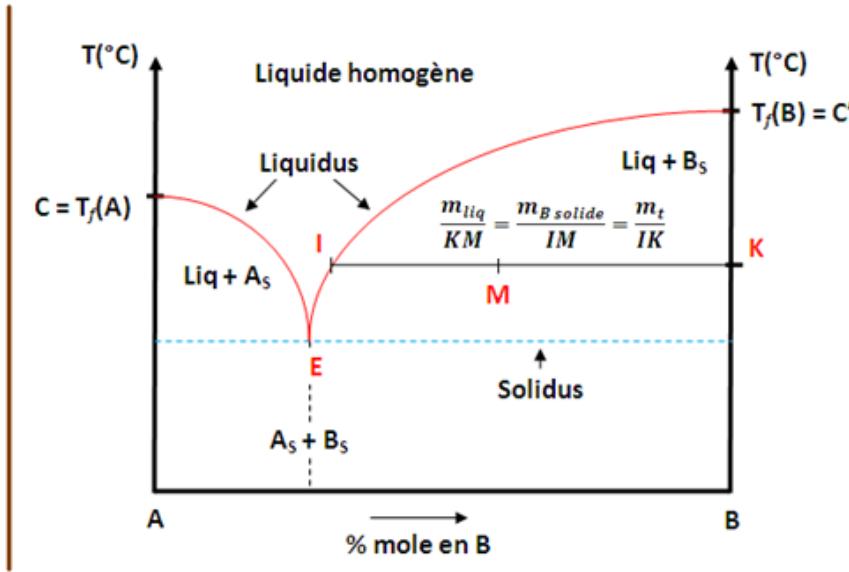
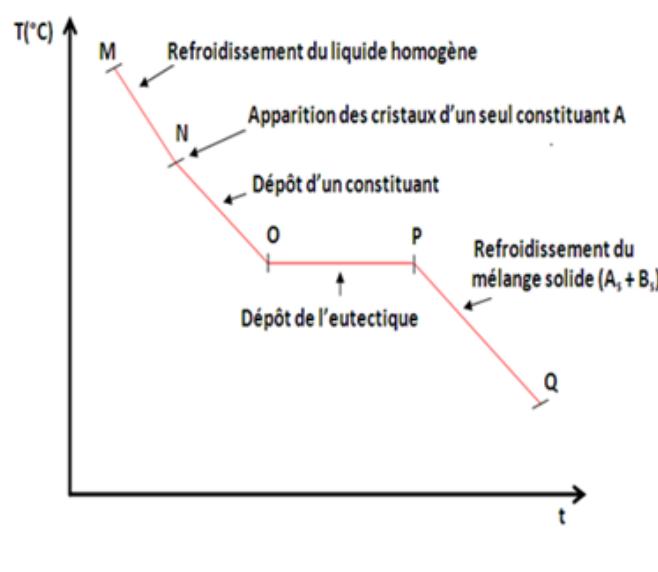


# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

## IV- Trace de quelques types de diagrammes.

### IV- I. Miscibilité nulle à l'état solide, les deux constituants ne forme pas de composés définies.

Si on dissout A dans B, il y a abaissement de la température de fusion de B, ainsi quand on refroidit un liquide de composition riche en B, B commence à se cristalliser à une température inférieure à  $T_f(B)$ .



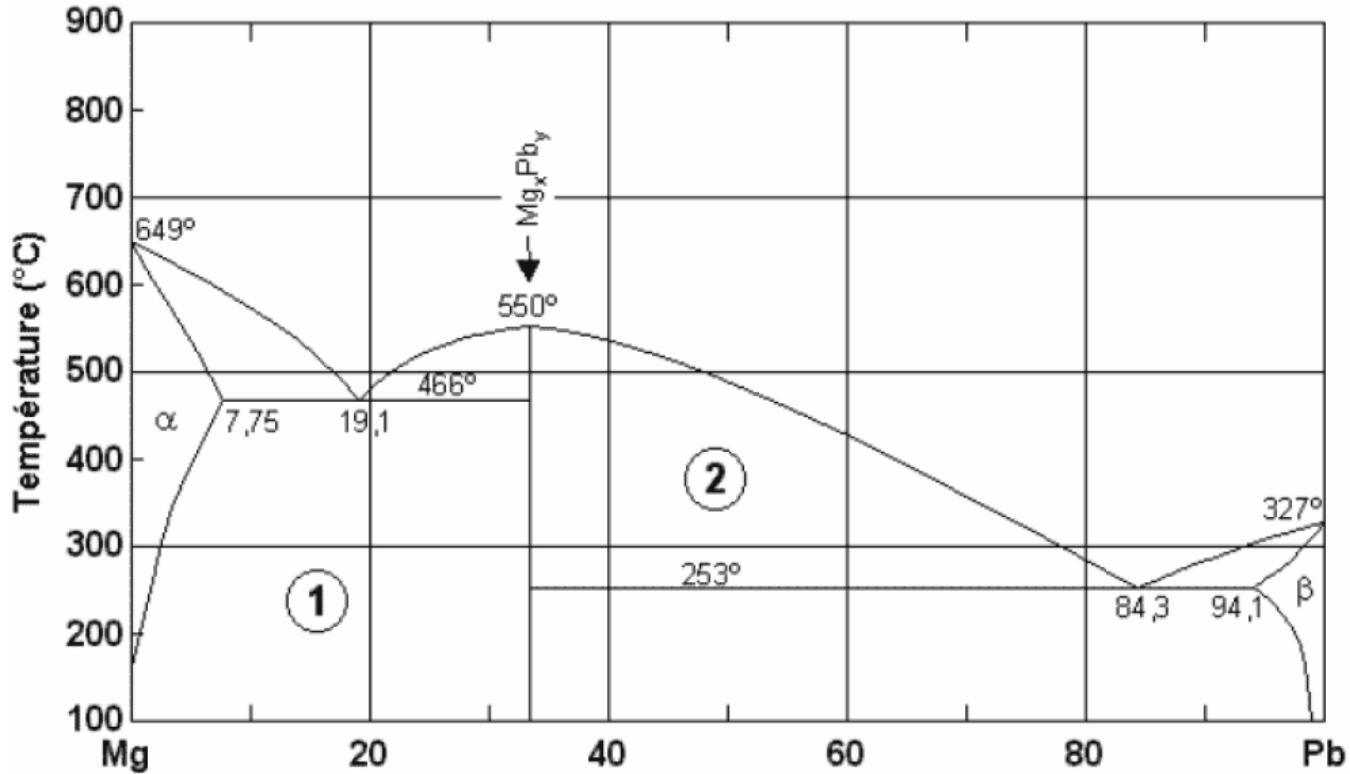
- Courbe CE (C'E) : équilibre entre le liquide et le constituant A. Courbe de saturation du liquide par A (B). Liquide  $\rightleftharpoons$  A solide
- Point E: point eutectique (équilibre entre le liquide et les phases A solide et B solide – V=0 – présence de 3 phases)

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

## IV- Trace de quelques types de diagrammes.

### Exemple

Soit le diagramme d'équilibre binaire Mg – Pb:



- Quelle est la formule de l'alliage binaire Mg<sub>x</sub>Pb<sub>y</sub>?

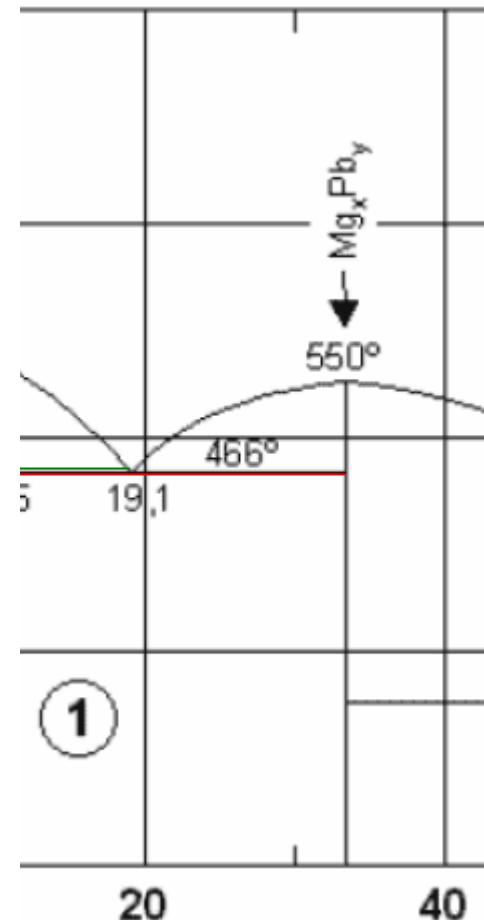
% molaire Pb

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

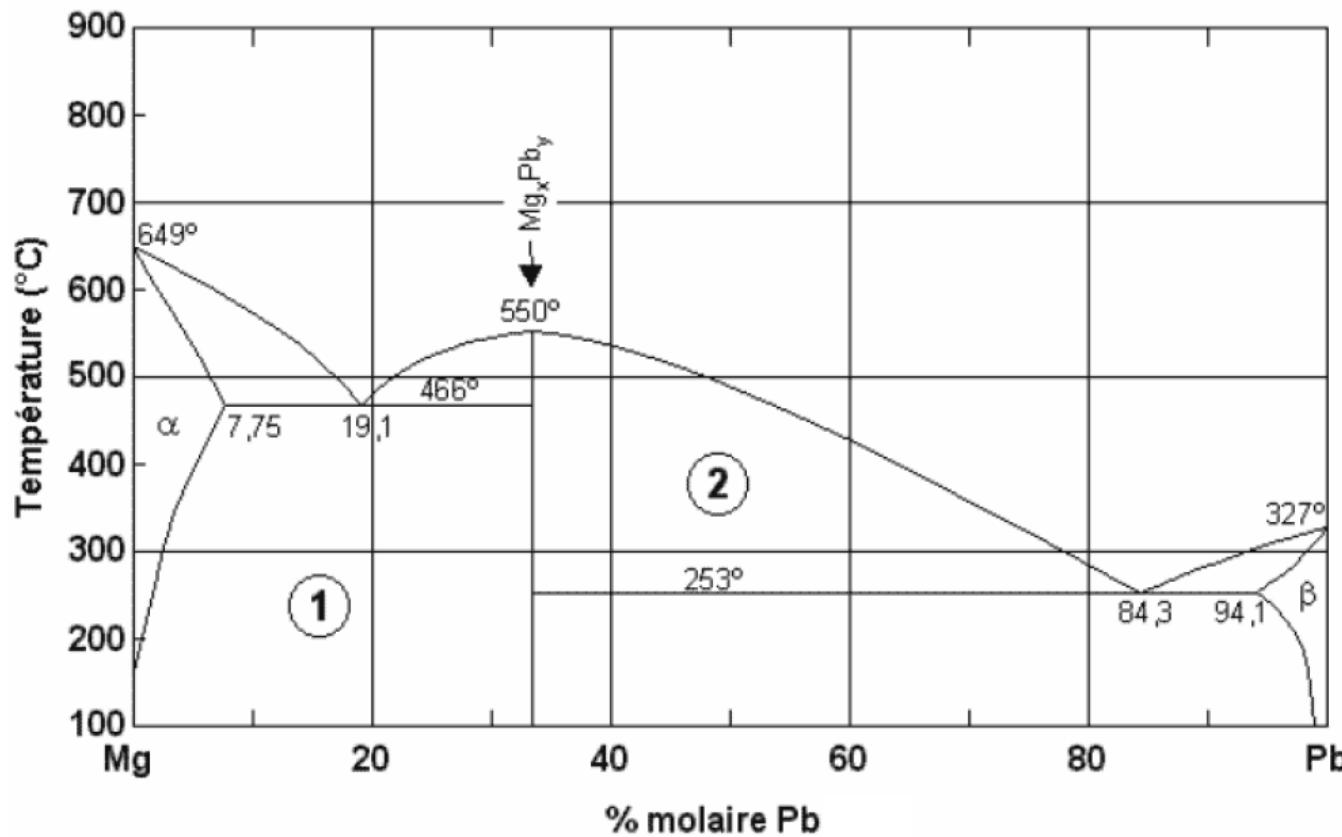
L'axe horizontal du diagramme étant gradué en % molaire, il est aisé d'en déduire que le composé  $Mg_xPb_y$  contient 33,3 % mol. de plomb et 66,4 % mol. de Mg., donc il contient 2 fois plus d'atomes de Mg que d'atomes de Pb.

Sa formule chimique est donc  $Mg_2Pb$ .

$$\begin{array}{l} x = 2 \\ \hline y = 1 \end{array}$$

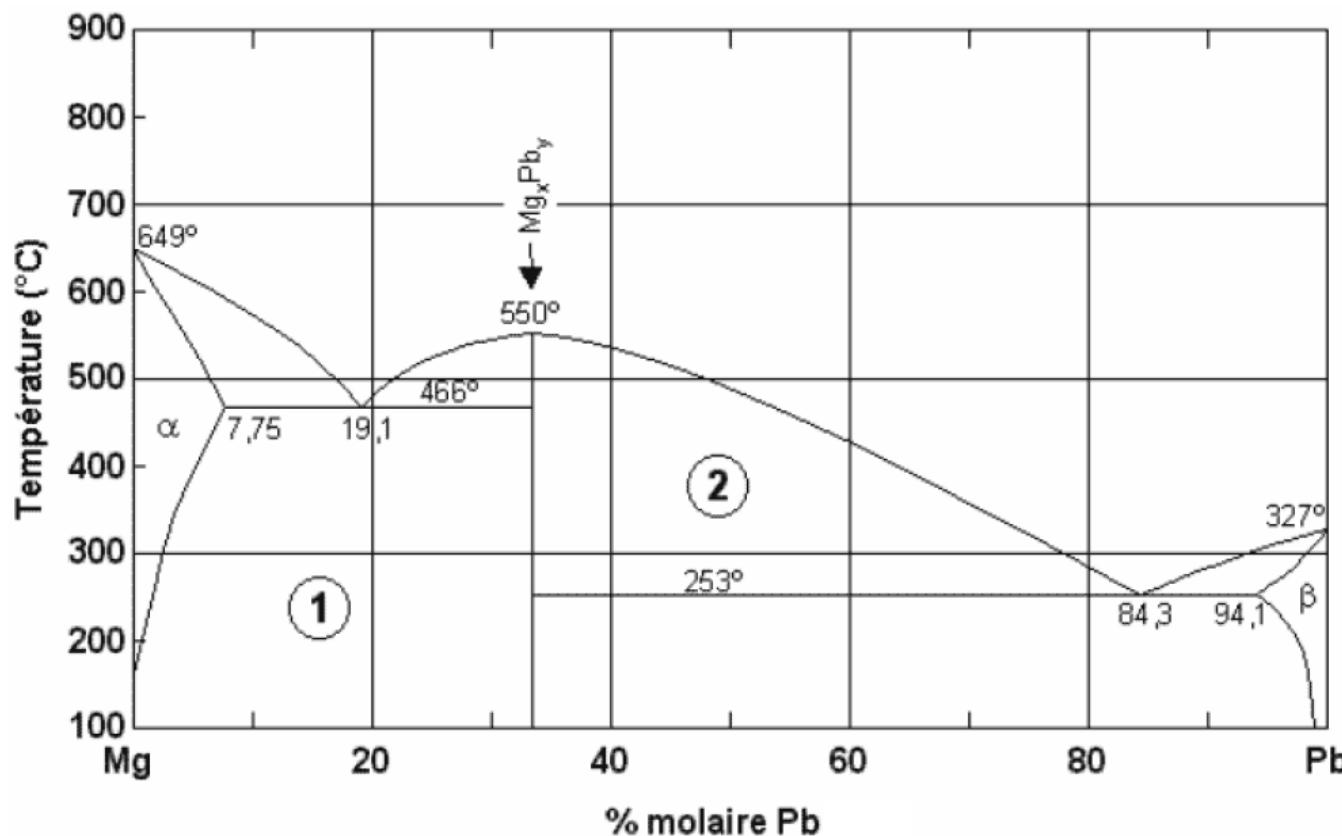


# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires



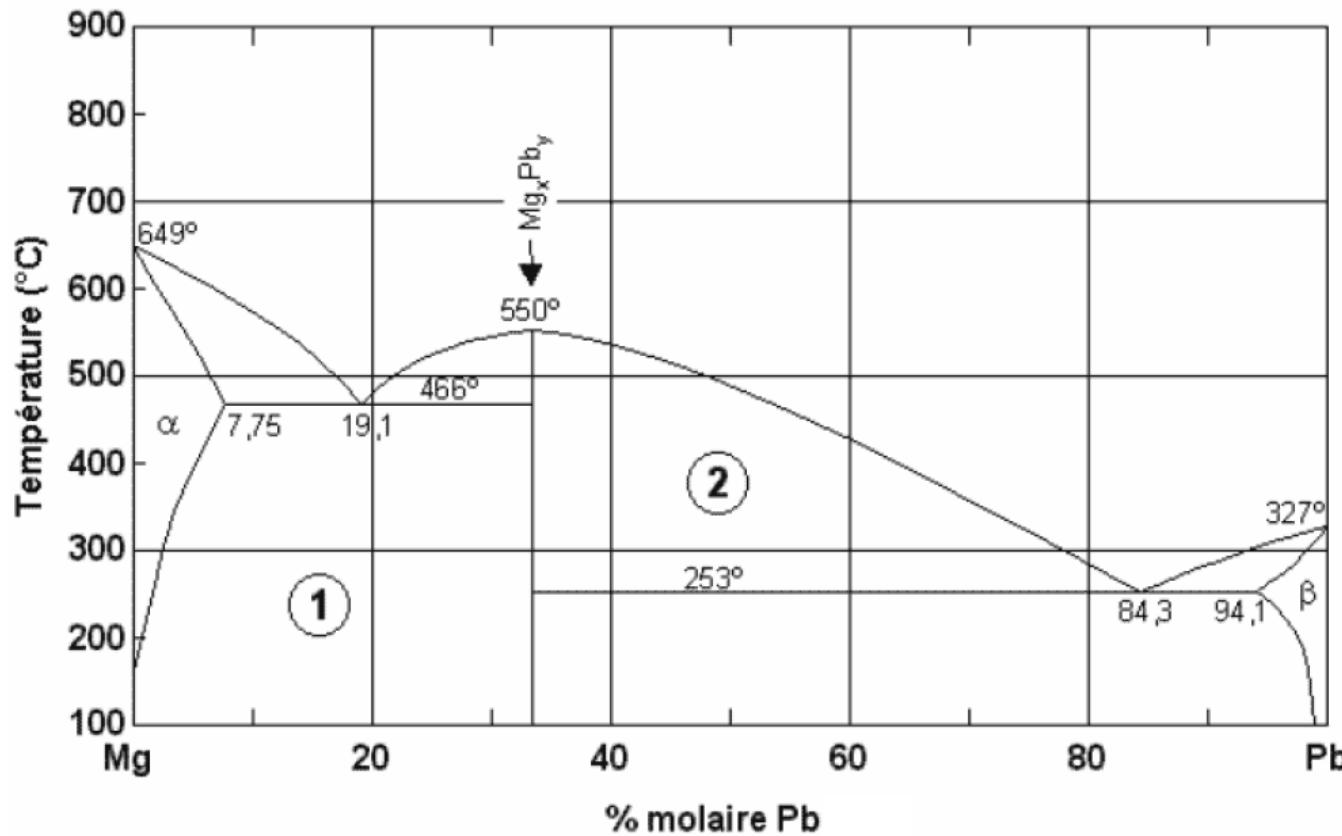
- Quelles sont les phases en présence dans les domaines numérotés 1 et 2 sur le diagramme.

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires



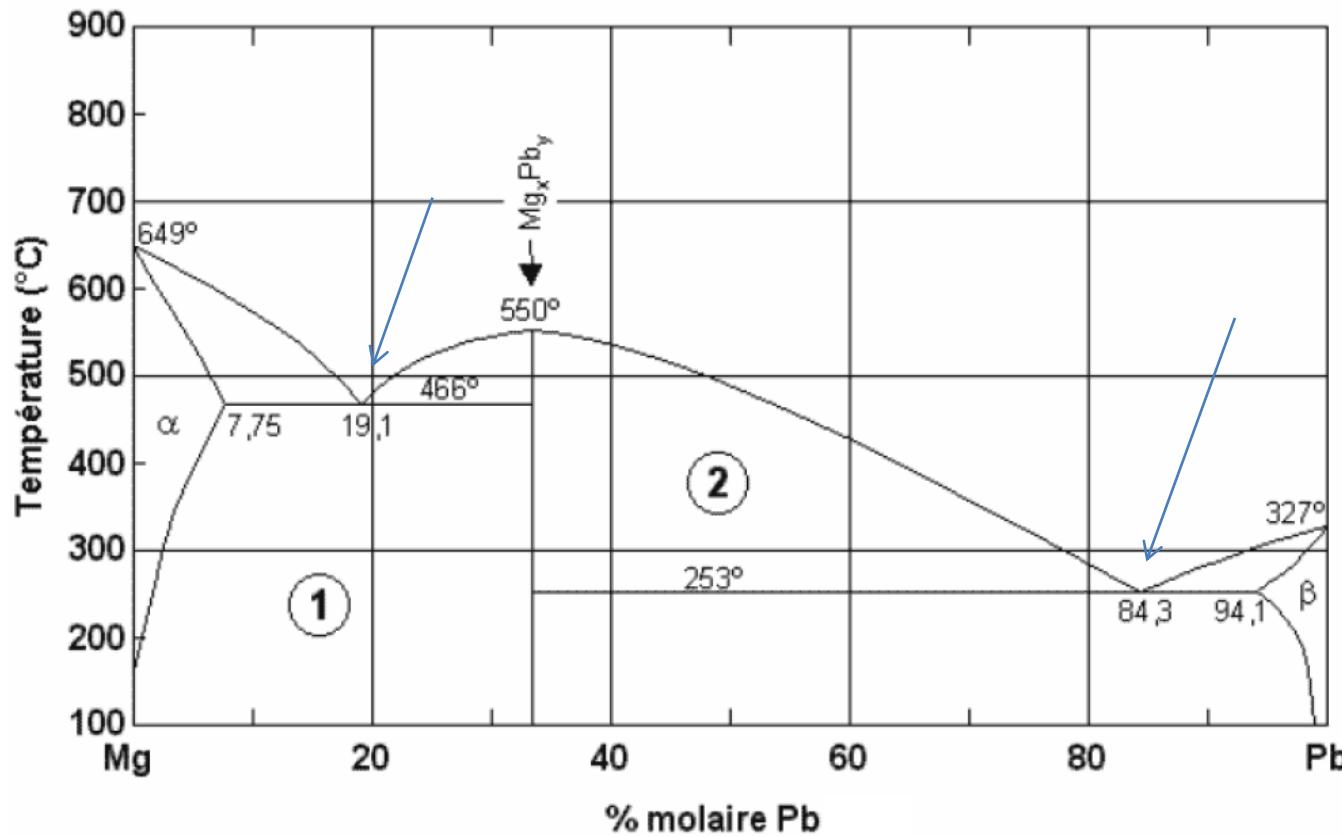
Domaine	Phases	
1	$\alpha$	Mg <sub>2</sub> Pb
2	Liquide	Mg <sub>2</sub> Pb

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires



- Combien y a-t-il de réactions eutectiques dans ce diagramme.

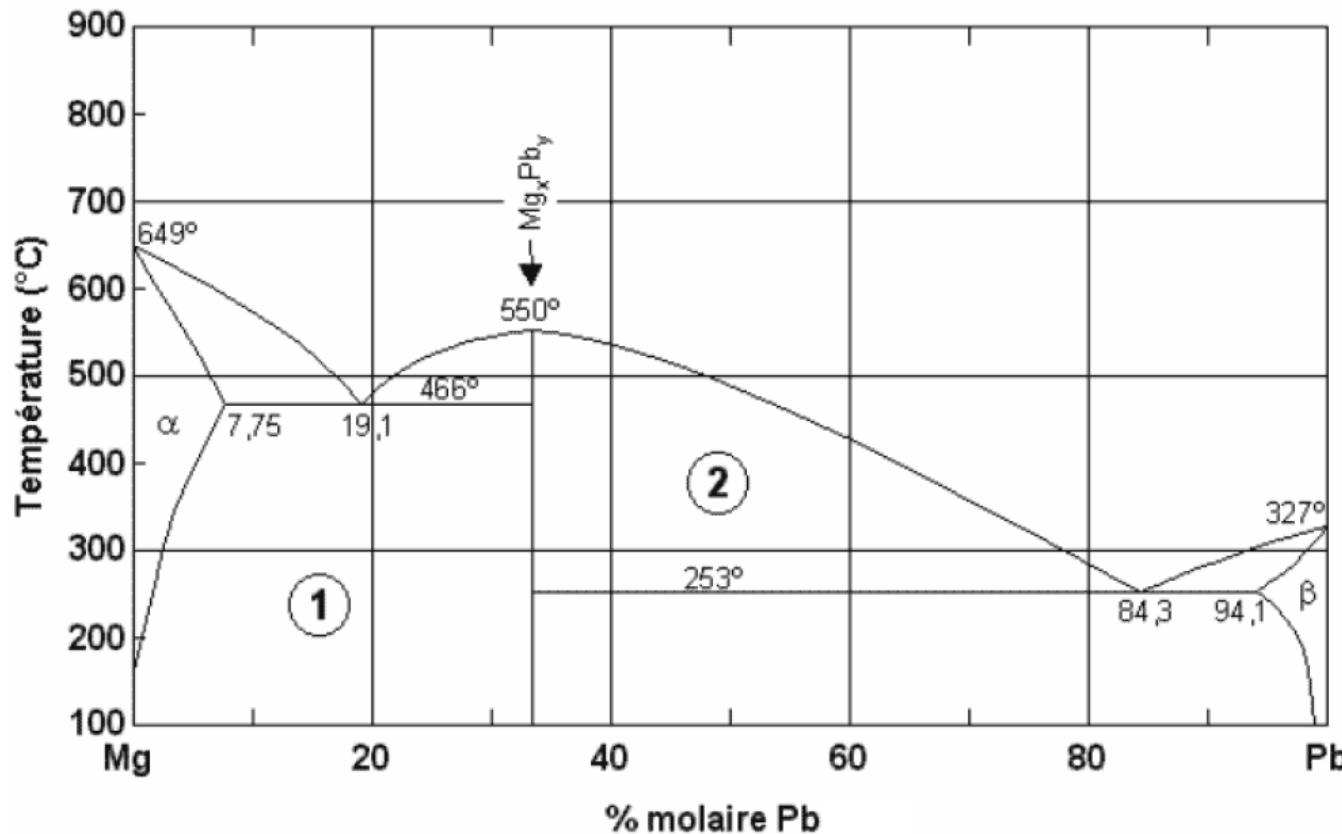
# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires



- Combien y a-t-il de réactions eutectiques dans ce diagramme.

Nombre de réactions eutectiques : **2**

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires



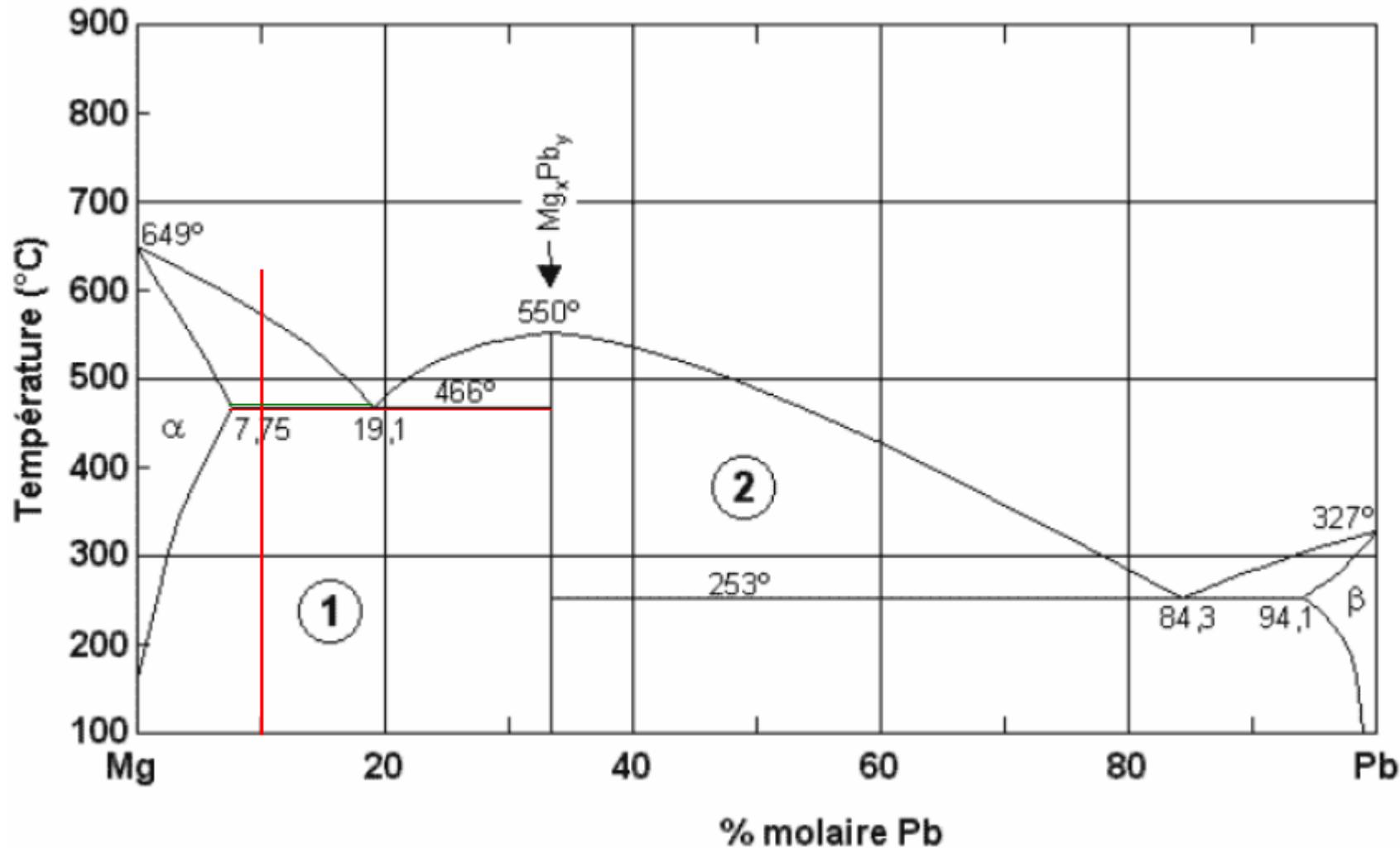
- Écrivez les réactions eutectiques en indiquant leur température et les compositions des phases en présence.

- Pour chacun(e) d'entre eux (elles), donnez leur composition (en % mol. de Pb).

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

Réaction eutectique	Température (°C)	Phase	Composition (% mol. Pb)
Liq. $\rightleftharpoons$ $\alpha + \text{Mg}_2\text{Pb}$	466	Liq.	19,1
		$\alpha$	7,75
		$\text{Mg}_2\text{Pb}$	33,3
Liq. $\rightleftharpoons$ $\beta + \text{Mg}_2\text{Pb}$	253	Liq.	84,3
		$\beta$	94,1
		$\text{Mg}_2\text{Pb}$	33,3

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

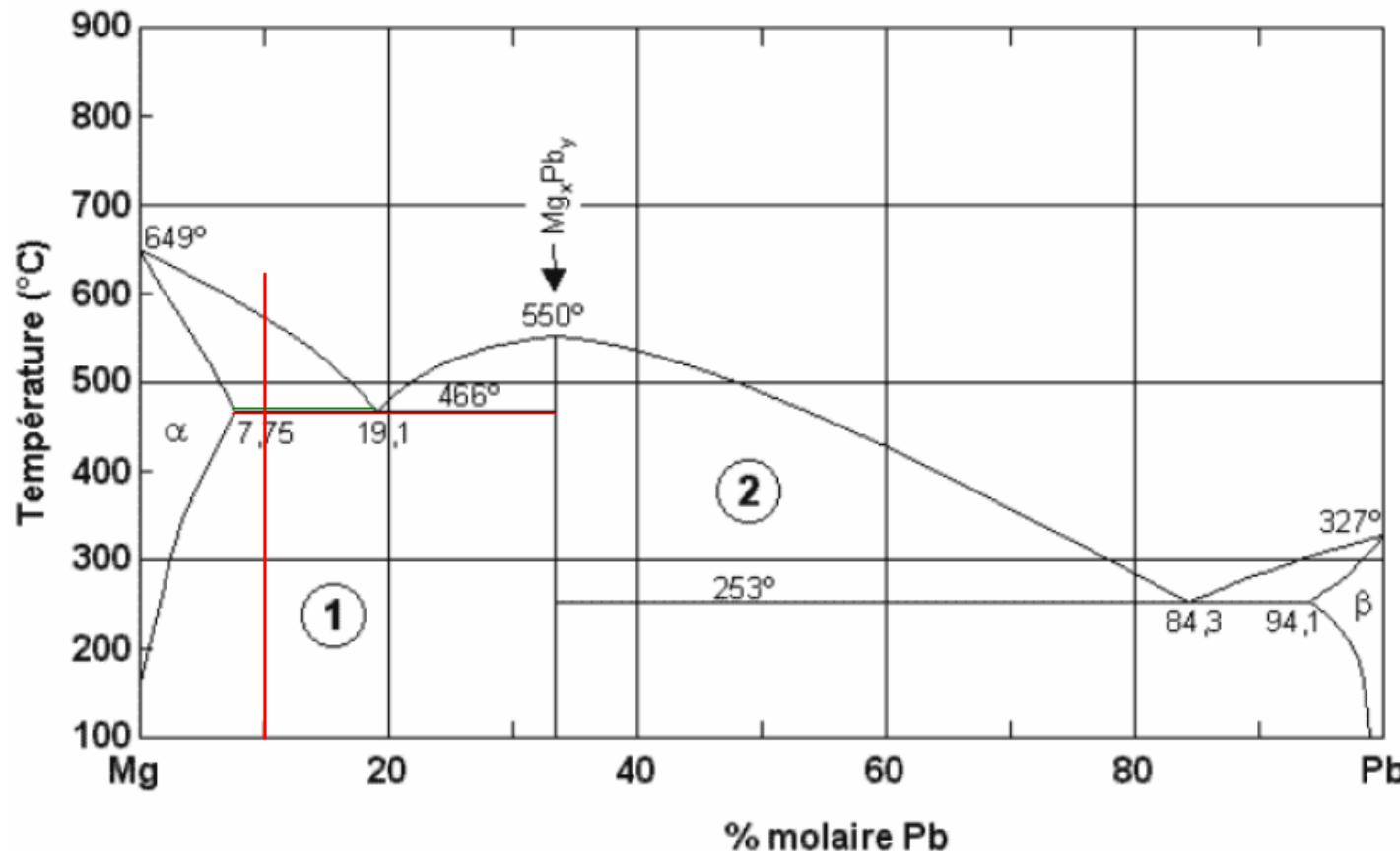


-Quels sont les phases et les constituants présents à  $465^\circ\text{C}$  dans un alliage contenant 10% molaire de Pb.

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

Nom	Phases		Constituants	
	$\alpha$	$Mg_2Pb$	$\alpha$ proeutectique	Eutectique
Composition (%mol. Pb)	7,75	33,3	7,75	19,1
Proportion (%mol.)	91,2	8,8	80,2	19,8

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires



- Que se passe-t-il si l'on refroidit, à l'équilibre, l'alliage (contenant 10% molaire de Pb) de 465°C à 20°C.

Il y a précipitation de phase  $Mg_xPb_y$  dans la phase  $\alpha$ .

La phase  $\alpha$  s'appauvrit en plomb (Pb).

X

X

# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

## IV- Trace de quelques types de diagrammes.

**IV- 2. Miscibilité nulle à l'état solide, les deux constituants forme un ou plusieurs composés définies.**

On distingue 2 cas: Composé est à fusion congruente et composé à fusion non congruente.

### a- Composé est à fusion congruente

Le composé est à fusion congruente s'il fond avant de ce décomposé.

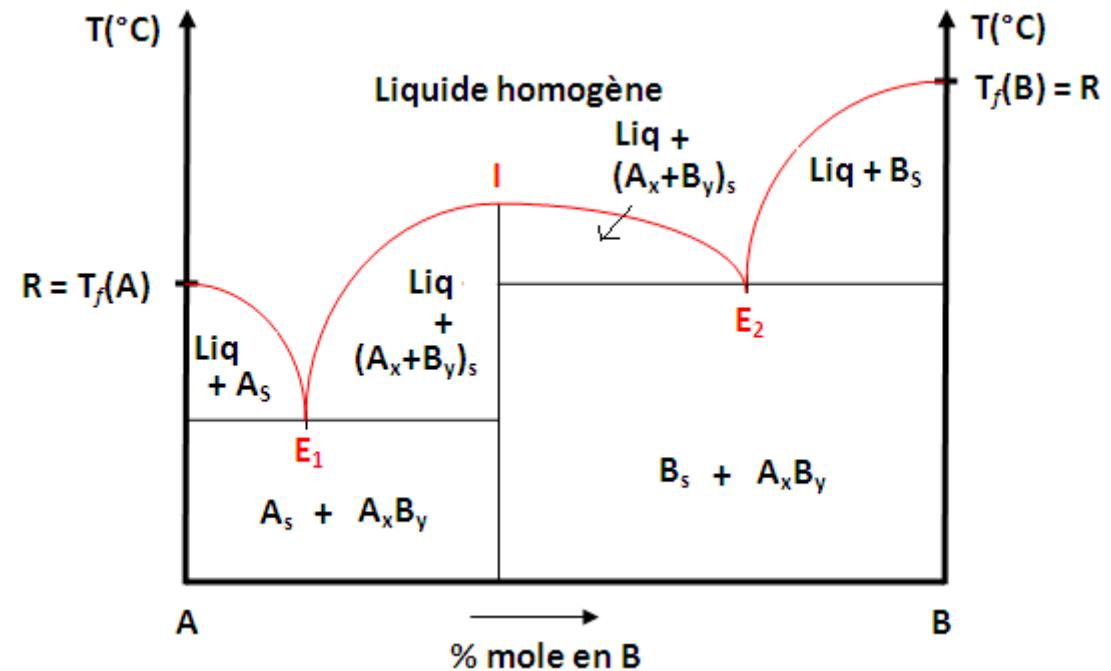
$$\mathbf{C} \equiv A_xB_y ; \quad xA + yB \rightarrow A_xB_y$$

- 2 points eutectiques E<sub>1</sub> et E<sub>2</sub>:

$$E_1: liq \leftrightharpoons A_s + (A_xB_y)_s$$

$$E_2: liq \leftrightharpoons (A_xB_y)_s + B_s$$

- I, R et S sont des points indifférents (composition des phases sol, lis est identique).



# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

## IV- Trace de quelques types de diagrammes.

Exemple: Système binaire Mg-Si

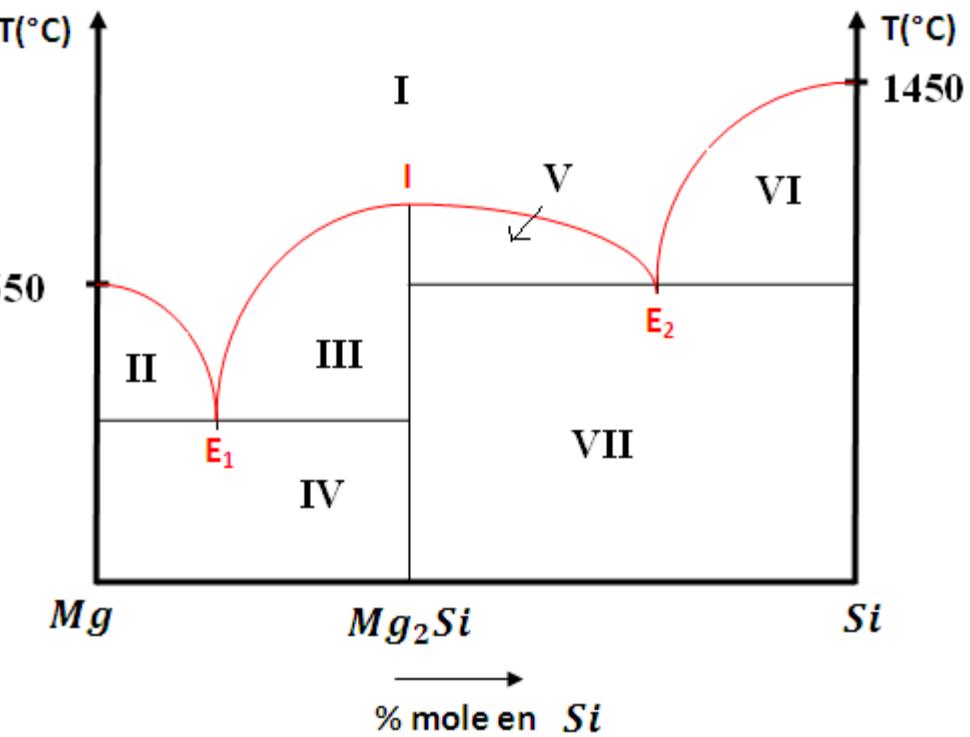
$$T_f(\text{Mg}) = 650 \text{ }^{\circ}\text{C} ; T_f(\text{Si}) = 1450 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

**66,6 %mole de Mg ; 33,4 % mole de Si**

$$\Rightarrow \text{Mg}_x\text{Si}_y$$

$$\text{Mg}_{\frac{66,6}{33,4}}\text{Si}_{\frac{33,4}{33,4}} \Rightarrow \text{Mg}_2\text{Si}$$

Domaine	Phases	$\phi$	V
I	Liquide	1	2
II	Liq + $(\text{Mg})_s$	2	1
III	Liq + $(\text{Mg}_2\text{Si})_s$	2	1
IV	$(\text{Mg})_s + (\text{Mg}_2\text{Si})_s$	2	1
V	Liq + $(\text{Mg}_2\text{Si})_s$	2	1
VI	Liq + $(\text{Si})_s$	2	1
VII	$(\text{Si})_s + (\text{Mg}_2\text{Si})_s$	2	1



# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

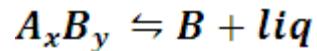
## IV- Trace de quelques types de diagrammes.

**IV- 2. Miscibilité nulle à l'état solide, les deux constituants forme un ou plusieurs composés définies.**

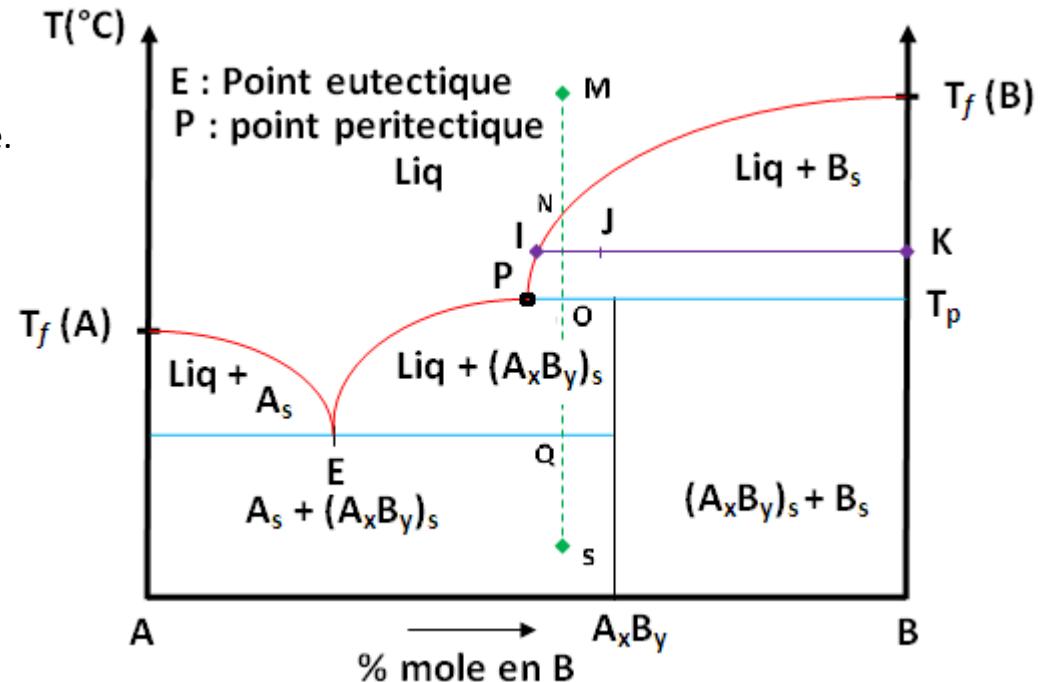
### b- Composé est à fusion non congruente

**Le composé est à fusion non congruente s'il se décompose avant de fondre**

- à  $T = T_p$ : on a; Réaction en équilibre peritectique.



On a coexistence de 3 phases  $\Rightarrow V = 0 \Rightarrow$  qui se traduit par un palier isotherme.

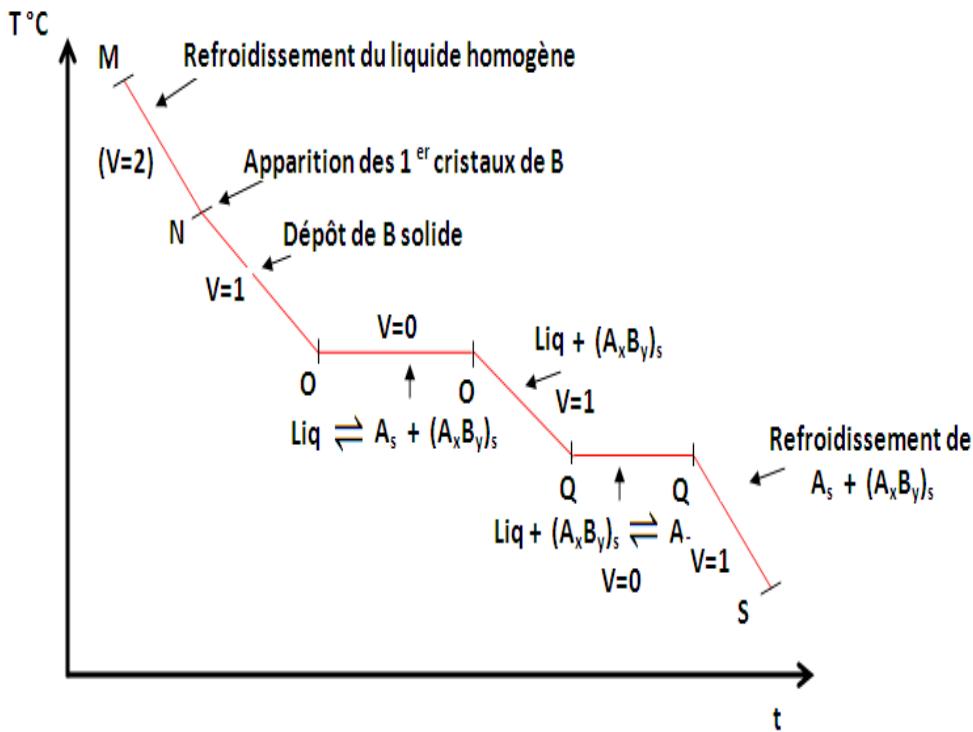


# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

## IV- Trace de quelques types de diagrammes.

**IV- 2. Miscibilité nulle à l'état solide, les deux constituants forme un ou plusieurs composés définies.**

### Courbe AT obtenue par décomposition de MS

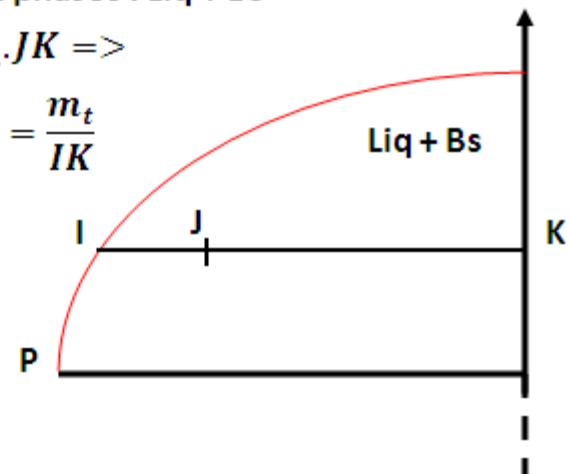


- Règle du moment

Au point J on a deux phases : Liq + Bs

$$m_{liq} \cdot IJ = m_{B_{solide}} \cdot JK \Rightarrow$$

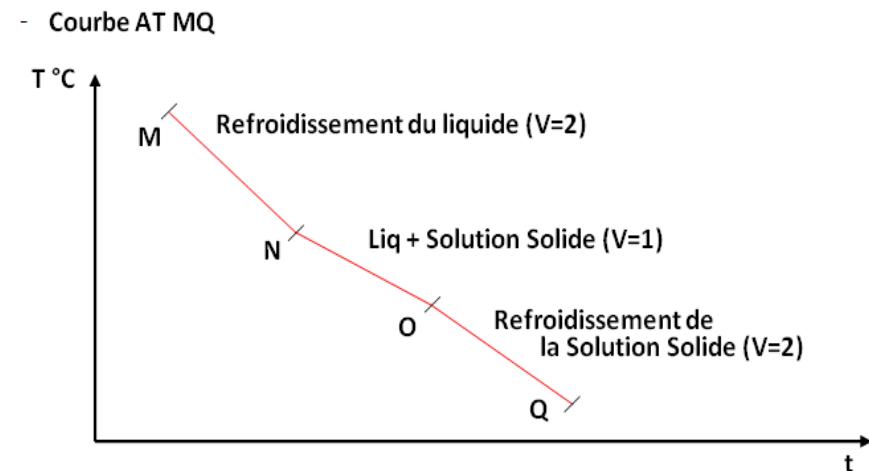
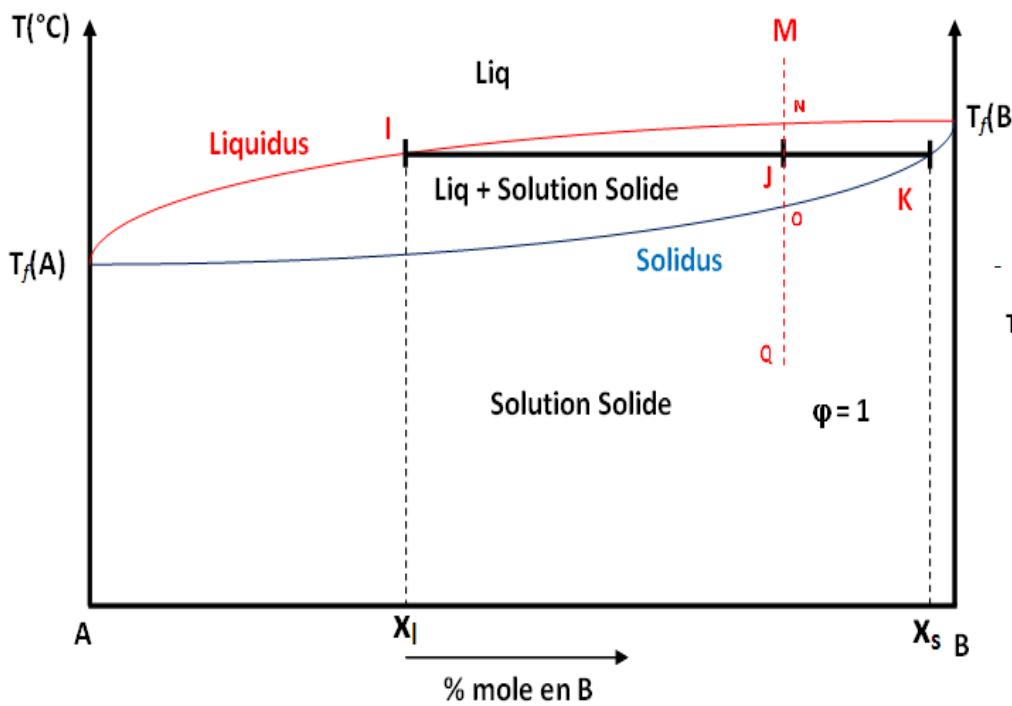
$$\frac{m_{liq}}{JK} = \frac{m_{B_{solide}}}{IJ} = \frac{m_t}{IK}$$



# Diagramme de phases Solide-Liquide des systèmes binaires

## IV- Trace de quelques types de diagrammes.

### IV- 3. Les deux constituants A et B sont totalement miscible à l'état solide.



---

## **Chap. 4: Le comportement mécanique : élasticité, plasticité, rupture, fluage...**

## I- Définition.

**Une propriété du matériau est une grandeur intensive généralement avec une unité de mesure.**

- Les propriétés principales des matériaux peuvent être divisées en plusieurs groupes tels que:
  - Propriétés mécaniques (la résistance en compression, en traction, à la flexion, à la torsion, à la fatigue, le module d'élasticité etc ...).
  - Propriétés physiques (la densité, la masse volumique, l'humidité, la porosité, l'absorption, la perméabilité, le retrait ou gonflement etc..; ) .
  - Propriétés chimiques (corrosion chimique, l'attaque à l'acide, etc ....) .
  - Propriétés thermiques (la dilatation, conductivité thermique ....)

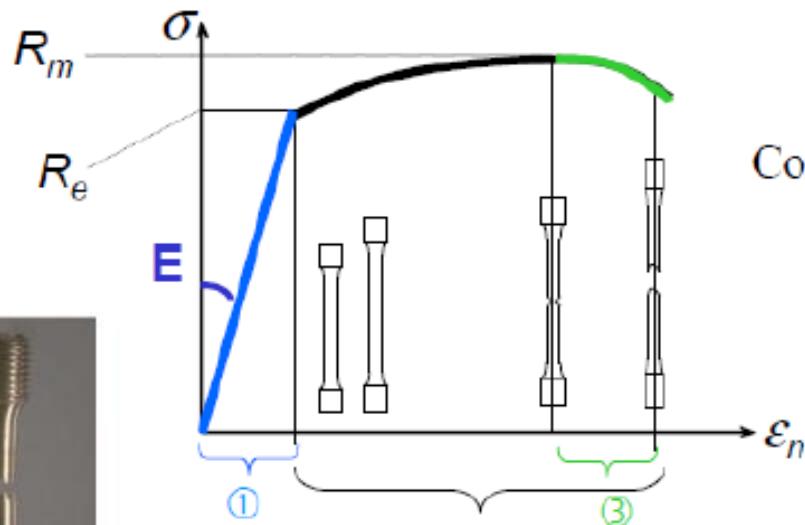
## II- Propriétés mécaniques.

Le matériau doit résister à son environnement et à ses sollicitations mécaniques. Les caractéristiques mécaniques des matériaux sont définies à partir d'essais mécaniques normalisés;

- **Contraintes** (unités N/mm<sup>2</sup> ou MPa) : Elles caractérisent les efforts de cohésion qui existent entre les grains de la matière. On trouve des contraintes normales  $\sigma$  et des contraintes de cisaillement  $\tau$ .
- **Déformations**: Une pièce se déforme lorsqu'elle est soumise à des efforts opposés. La matière a typiquement trois modes de déformation ; élastique, plastique et rupture.
- **Elasticité** : Elle caractérise l'aptitude qu'a un matériau à reprendre sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé.
- **Plasticité** : Un matériau qui ne reprend pas sa forme et ses dimensions après avoir été déformé est dit plastique.

## II- Propriétés mécaniques.

- Courbe Contrainte- Déformation:

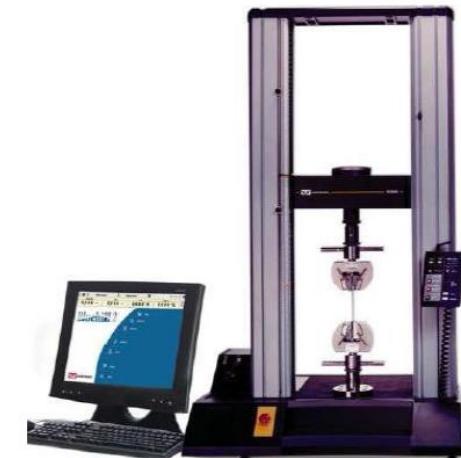


Contrainte nominale :  $\sigma_n = F / S_0$

Déformation nominale :

$$\varepsilon_n = \Delta L / L_0$$

- ① domaine élastique (déformation réversible)
- ② domaine plastique (déformation irréversible)
- ③ striction puis rupture (déformation irrémédiable)



## II- Propriétés mécaniques.

### I-1 Comportement mécanique (Norme NF-EN-10002).

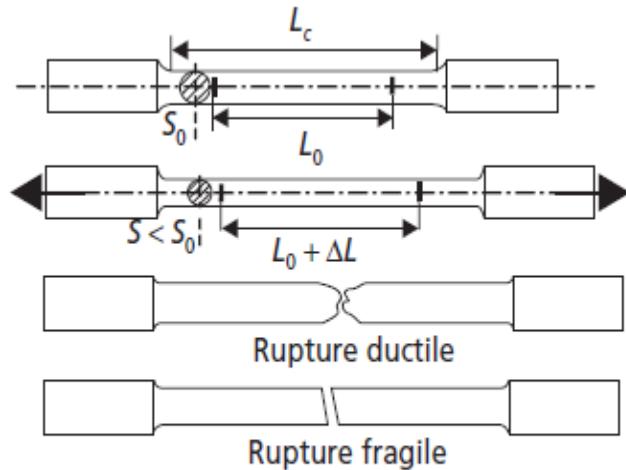
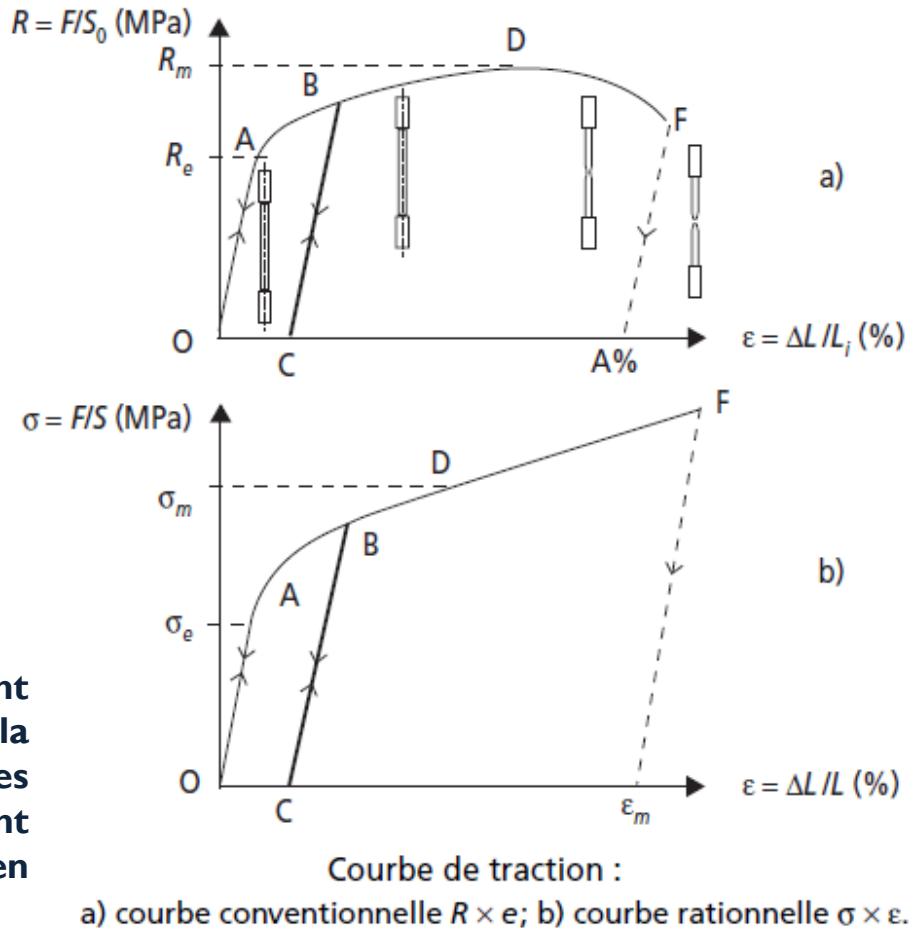


Schéma d'une éprouvette de traction cylindrique et de son évolution en cours d'essai.

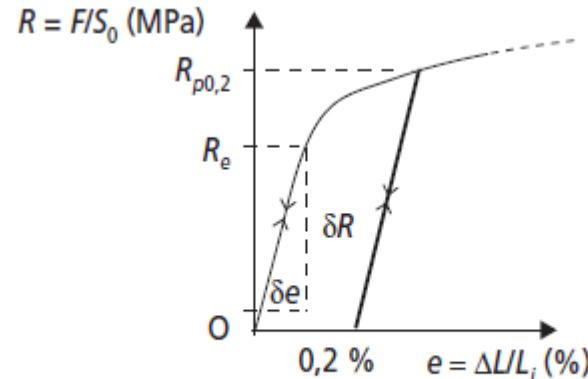
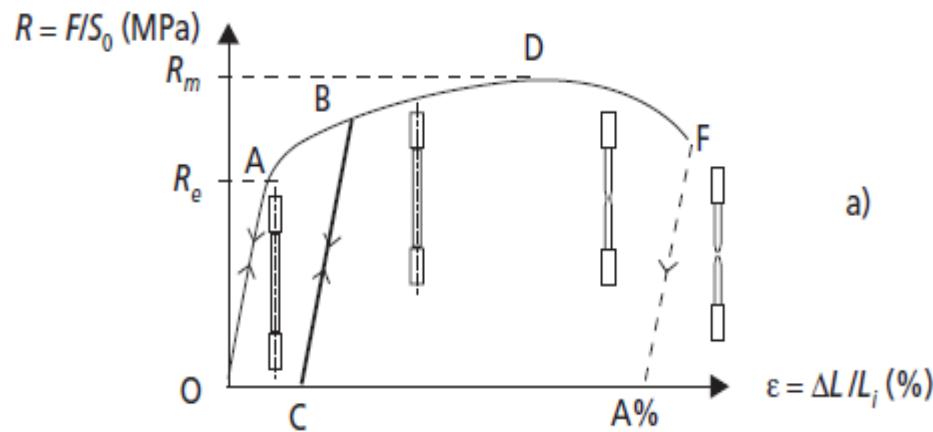
C'est la courbe obtenue à partir de l'enregistrement  $F \times \Delta L$  effectué en cours d'essai en rapportant la force à la section initiale pour raisonner en termes de contrainte  $R = F/S_0$ , et en rapportant l'allongement à la longueur initiale pour raisonner en termes d'allongement relatif  $e = \Delta L/L_i$ .



Courbe de traction :  
 a) courbe conventionnelle  $R \times e$ ; b) courbe rationnelle  $\sigma \times \epsilon$ .

## II- Propriétés mécaniques.

### II-1 Comportement mécanique (Norme NF-EN-10002).



Exploitation du début d'une courbe de traction pour la détermination de  $R_{p0,2}$  et de  $E$ .

- OA: allongement élastique linéaire, réversible.

- Au delà de A: déformation plastique permanente + déformation élastique:

- la suppression de la force appliquée (BC) -> allongement plastique rémanent (OC). Une remise en charge conduit à une nouvelle limite d'élasticité (CB).
- $R_e = F_e/S_0$  : limite apparente d'élasticité (Mpa).
- $R_{p0,2}$  : limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % d'allongement plastique.
- AD: allongement élastique + allongement plastique répartie.
- $R_m = F_m/S_0$  : résistance à la traction (Mpa).
- DF : apparition et progression d'une striction dans les matériaux ductiles.
- F : rupture.
- $A\% = \Delta L_u/L_i$ : allongement pour cent après rupture (%).
- $E = \delta R / \delta e \approx \delta \sigma / \delta \epsilon$  : module de Young.

## II- Propriétés mécaniques.

### II- I Comportement mécanique (Norme NF-EN-10002).

- Courbe de traction rationnelle: contrainte vraie  $\sigma = F/S$  et déformation rationnelle  $\varepsilon = \delta L/L$ .

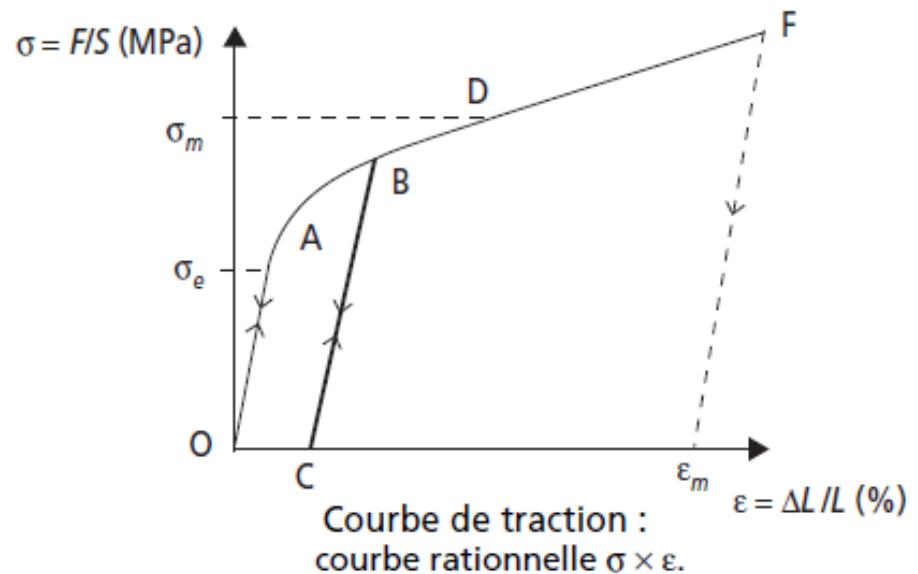
- Courbe croissante même pendant la striction.

- le volume de l'éprouvette restant constant et la déformation étant uniformément répartie de O à D.

- On a:

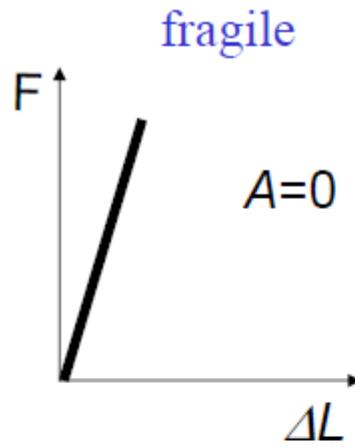
$$\sigma = F \cdot \frac{(1+e)}{S_0} = R(1+e) \quad \text{et} \quad \varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln(1+e)$$

- De D à F, pendant la striction, des corrections plus complexes sont nécessaires pour calculer  $\sigma$  et  $\varepsilon$  dans la zone de déformation localisée.



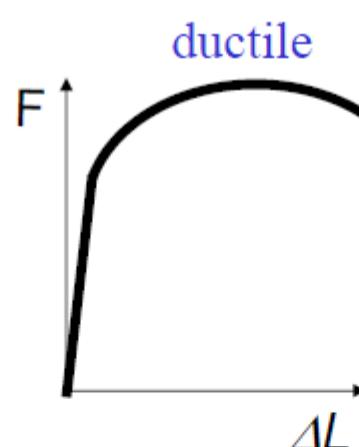
## II- Propriétés mécaniques.

### II-2 Classification des matériaux selon les comportement possibles.



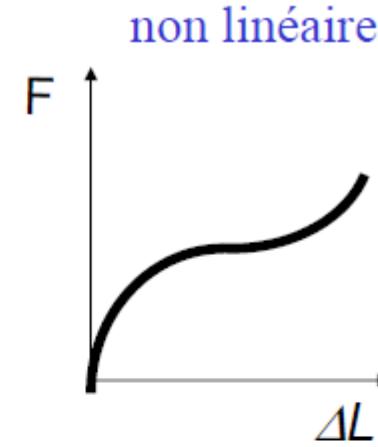
Pas de domaine plastique

- verre
- céramique
- béton
- polymères thermodurcissables



Déformation plastique permanente

- métaux
- alliages
- polymères thermoplastiques



Déformation élastique non proportionnelle à la charge

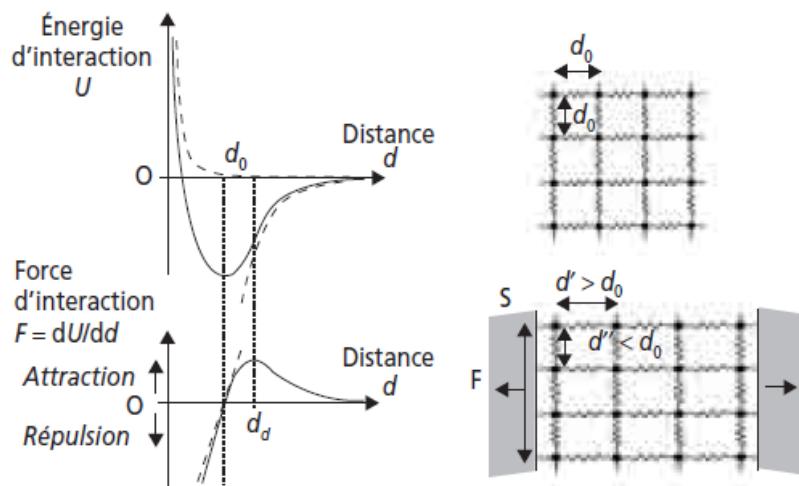
- caoutchouc
- élastomères..

## II- Propriétés mécaniques.

### II-3 Elasticité linéaire.

Pour de faibles déplacement, la force de rappel peut être considérée comme proportionnelle au déplacement  $d - d_0$ .

Les allongement (ou raccourcissement) relatifs ou déformation  $\epsilon$  du solide sont proportionnels à la densité surfacique de force, ou contrainte  $\sigma$ . Ce qui donne la loi de Hooke:



Variations de l'énergie d'interaction et de la force d'interaction entre deux atomes en fonction de leur distance  $d$ .

De part et d'autre de la distance d'équilibre  $d_0$ , la force de rappel est approximativement proportionnelle à l'écart  $d - d_0$ .

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \cdot \frac{d - d_0}{d_0} = E \cdot \epsilon$$

$$[\sigma] = MPa (\text{ou } N \cdot mm^{-2})$$

$E$ : coefficient appelé module d'élasticité à la traction ou module de Young [MPa]  
 $\epsilon$ : déformation (sans dimension)

## II- Propriétés mécaniques.

### II-3 Elasticité linéaire.

Dans les axes de la figure ci-dessous, les déformations élastiques peuvent toutes s'exprimer en fonction de la contrainte  $\sigma_x$  appliquée dans la direction x :

v: coefficient de Poisson (sans dimension - caractéristique du comportement élastique du matériau).

Généralement les expressions des déformation selon les 3 axes sont données par:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - v (\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - v (\sigma_x + \sigma_z)] \quad v = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - v (\sigma_x + \sigma_y)]$$

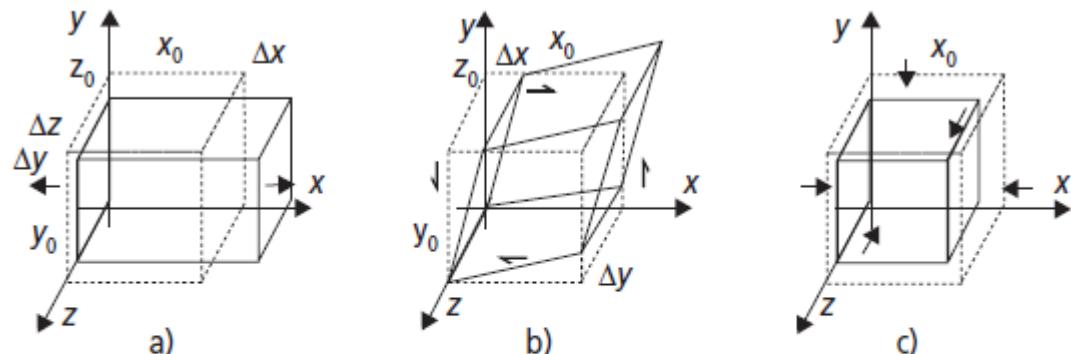


Schéma des déformations élastiques provoquées par différentes sollicitations.

a) Contrainte de traction uni-axiale  $\sigma_x$ . b) Contrainte de cission  $\tau_{xy}$  dans le plan xy. c) Pression hydrostatique p.

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta X}{X_0} = \frac{\sigma_x}{E} \text{ et } \varepsilon_y = \frac{\Delta Y}{Y_0} = \varepsilon_z = \frac{\Delta Z}{Z_0} = -v \cdot \varepsilon_x = -\frac{v}{E} \cdot \sigma_x$$

## II- Propriétés mécaniques.

### II-3 Elasticité linéaire.

Autre constante caractéristique du comportement élastique du matériau. Dans le cas d'une contrainte tangentielle de cission  $\tau$ , une déformation par distorsion  $\gamma$  apparaît, qui est approximativement proportionnelle à la cission appliquée.

$$\gamma = \frac{\Delta y}{x_0} = \frac{\Delta x}{y_0} = \frac{\tau}{2G}$$

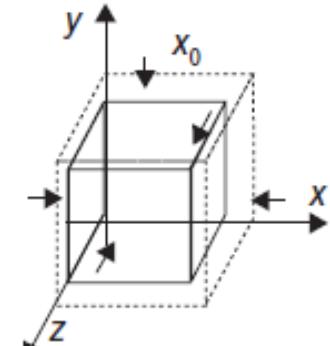
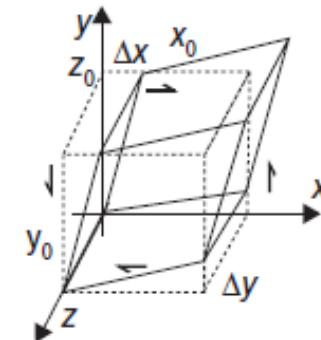
- La constante  $G$  (ou  $\mu$ ) est appelée module d'élasticité au cisaillement du matériau, en MPa.

- Effet hydrostatique sous une pression  $p$  permet de définir le module de compressibilité  $K$  (ou  $\chi$ ) du matériau, en MPa, à partir de la variation relative de volume:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{p}{K}$$

-  $E$  et  $\gamma$  suffisent à caractériser le comportement élastique d'un matériau.

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \quad K = \frac{E}{3(1-2v)} \quad G = \frac{3}{2} \cdot K \cdot \frac{(1-2v)}{(1+v)} \quad E = \frac{9K \cdot G}{G + 3K}$$



## II- Propriétés mécaniques.

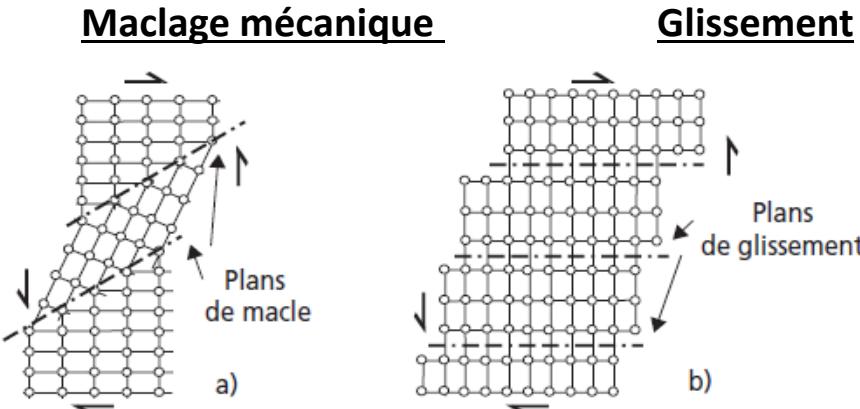
### II-4 Déformation plastique.

Les matériaux concernés sont de type ductile (càd : matériaux pouvant être étirer ou allonger sans se rompre).

Un matériau ductile présente : un allongement important ; une striction importante ; une grande ténacité.

Aspect microscopique de la déformation plastique:

- Quand  $\sigma = R_e$ , les liaisons atomiques sont étirés au maximum.
- Dès que  $\sigma > R_e$ , la seule possibilité de déformer le matériau est de déplacer les atomes.



Schémas de la déformation d'un cristal :  
a) par maclage mécanique; b) par glissement.

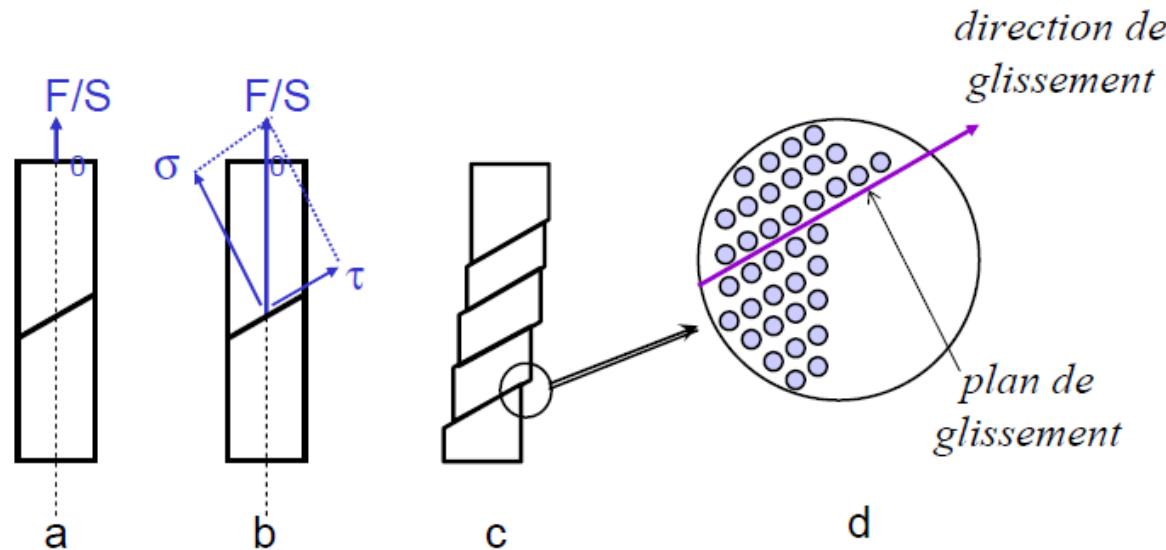


Déformation plastique par glissement  
dans un monocristal de zinc

## II- Propriétés mécaniques.

### II-4 Déformation plastique.

Déformation due au glissement irréversible de certains plans cristallographiques par rapport aux autres



a : cristal avant essai

b : décomposition de la contrainte en une composante normale  $\sigma$  et une composante tangentielle  $\tau$

c : cristal après déformation plastique

d : représentation schématique d'une marche de glissement

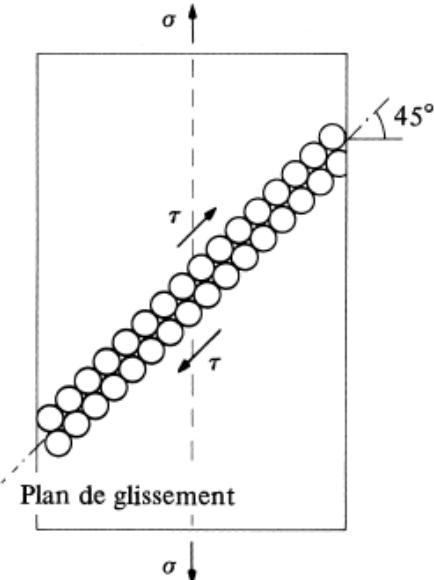
## II- Propriétés mécaniques.

### II-4 Déformation plastique.

#### Traction et cisaillement.

- La déformation plastique se fait par le déplacement successif de dislocations dans des plans atomiques bien déterminés sous l'action de forces de cisaillement (glissement).
- En appliquant une contrainte de traction  $\sigma$  à un échantillon, on induit, dans le cristal, une contrainte de cisaillement (*cission*  $\tau$ ) proportionnelle à  $\sigma$ .
- Déformation plastique → Lorsque la cission  $\tau$  est supérieure à la résistance au glissement des plans les uns par rapport aux autres.
- La contrainte de cisaillement à laquelle s'amorce la déformation plastique est appelée limite d'élasticité en cisaillement  $\tau_e$ .

Déformation sous traction uniaxiale d'un cristal idéal par cisaillement le long d'un plan de glissement séparant deux plans à empilement compact d'atomes. La cission  $\tau$  à  $45^\circ$  de l'axe de traction vaut la moitié de la contrainte de traction:  $\tau = \sigma/2$ .



## II- Propriétés mécaniques.

### II-4 Déformation plastique.

#### Traction et cisaillement.

- Calcul de la contrainte de cisaillement induite dans un plan déterminé  $S_c$  d'un monocristal par une force de traction  $F$ .

-  $\lambda$ : l'angle entre la direction de glissement  $d$  et l'axe de traction.

-  $\phi$ : l'angle entre la normale  $n$  au plan de glissement et la direction de traction.

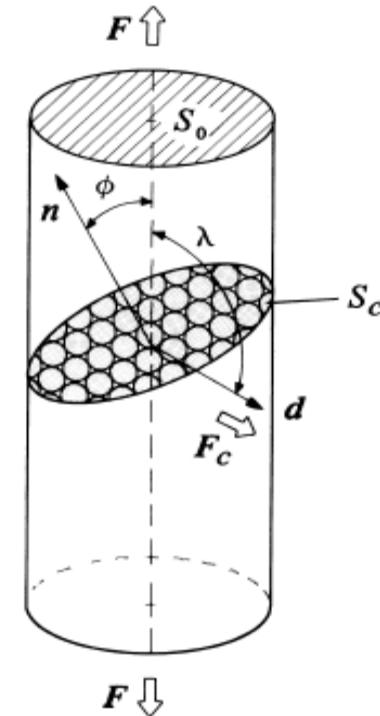
Par définition:  $\tau = F_c / S_c$

on peut écrire:  $F_c = F \cos\lambda$  et  $S_c = \frac{S_0}{\cos\phi}$

$$\tau = \sigma \cos\phi \cos\lambda$$

*loi de Schmid*

le terme  $(\cos\phi \cos\lambda)$  facteur de Schmid



Déformation sous traction uniaxiale d'un cristal idéal par cisaillement le long d'un plan de glissement séparant deux plans à empilement compact d'atomes. La cission  $\tau$  à  $45^\circ$  de l'axe de traction vaut la moitié de la contrainte de traction:  $\tau = \sigma/2$ .

## II- Propriétés mécaniques.

### II-4 Déformation plastique.

Mécanismes mis en jeu lors des déformation plastique:

$R_e < \sigma < R_m$  La densité des dislocations augmente dans le matériau.

$\sigma = R_m$  Le nombre des dislocations atteint son maximum .

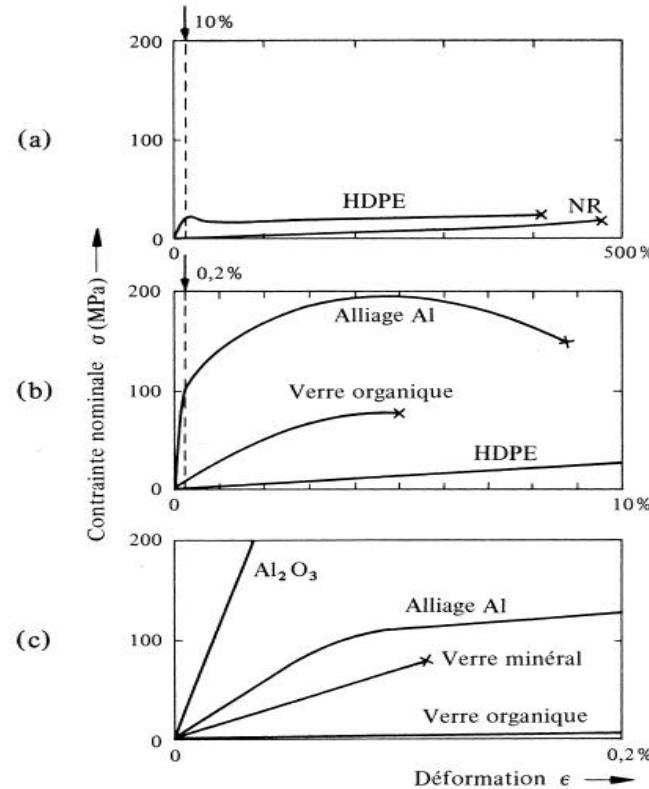
$\sigma > R_m$  Rupture des liaisons atomiques. Création de microfissures qui finissent par se rejoindre



***RUPTURE***

## II- Propriétés mécaniques.

### II-5 Courbes de traction pour divers types de matériaux:



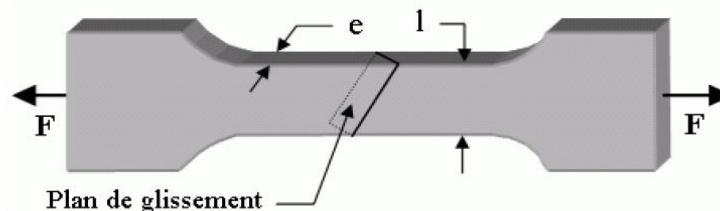
NR	: caoutchouc naturel
HDPE	: polyéthylène haute densité
Alliage Al	: alliage d'aluminium
Verre organique	: polyméthacrylate de méthyle
$\text{Al}_2\text{O}_3$	: oxyde d'aluminium

Courbes de traction pour divers types de matériaux: (a) matériaux fortement déformables  $\varepsilon_{\max} > 100\%$ ; (b) matériaux moyennement déformables  $\varepsilon_{\max} \sim 10\%$ ; (c) matériaux peu déformables  $\varepsilon_{\max} < 0,2\%$ .

## II- Propriétés mécaniques.

On réalise un essai de traction sur un monocristal de fer de haute pureté (% Fe = 99,999 %). Le fer a une structure cristalline C.C. avec un paramètre de maille  $a = 0,287 \text{ nm}$ . Le schéma de l'éprouvette de traction est présenté à la figure ci-dessous et les dimensions de sa section utile sont les suivantes:

largeur  $l = 8 \text{ mm}$ ; épaisseur = 4 mm.



Lorsque la force  $F$  appliquée atteint 2,4 kN au cours de l'essai de traction, on constate l'apparition des premiers signes de glissement cristallographique irréversible dans un plan dont la normale fait un angle  $\chi = 40^\circ$  avec l'axe de traction et selon une direction faisant un angle  $\theta = 65^\circ$  avec l'axe de traction.

b) Quelle est la valeur de la cission critique de glissement  $\tau^*$  du fer monocristallin très pur ?

On applique la loi de Schmid au système de glissement considéré : 
$$\tau^* = \frac{F}{S_0} \cos \theta \cos \chi$$

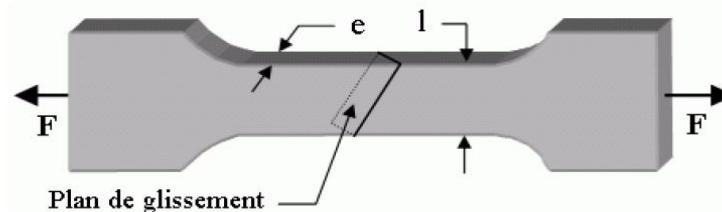
Avec les données numériques disponibles, on obtient ainsi :  $\tau^* = 24,3 \text{ MPa}$

$$\boxed{\tau^* = 24,3 \text{ MPa}}$$

## II- Propriétés mécaniques.

On réalise un essai de traction sur un monocristal de fer de haute pureté (% Fe = 99,999 %). Le fer a une structure cristalline C.C. avec un paramètre de maille  $a = 0,287 \text{ nm}$ . Le schéma de l'éprouvette de traction est présenté à la figure ci-dessous et les dimensions de sa section utile sont les suivantes:

largeur  $l = 8 \text{ mm}$ ; épaisseur = 4 mm.



c) Quelle devrait être la valeur de la limite proportionnelle d'élasticité  $R_e$  d'un polycristal fait de ce même fer très pur ?

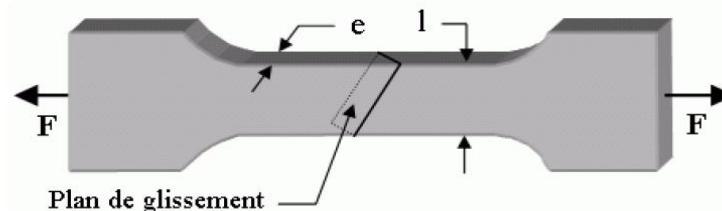
Pour un polycristal, la limite proportionnelle d'élasticité  $R_e$  correspond à l'apparition des premiers glissements cristallographiques dans les grains les mieux orientés, c'est-à-dire ceux dont le facteur de Schmid est le plus élevé et égal à 0,5. Dans ce cas, la contrainte nominale à appliquer est  $R_e = 2\tau^*$

$$R_e = 48,6 \text{ MPa}$$

## II- Propriétés mécaniques.

On réalise un essai de traction sur un monocristal de fer de haute pureté (% Fe = 99,999 %). Le fer a une structure cristalline C.C. avec un paramètre de maille  $a = 0,287 \text{ nm}$ . Le schéma de l'éprouvette de traction est présenté à la figure ci-dessous et les dimensions de sa section utile sont les suivantes:

largeur  $l = 8 \text{ mm}$ ; épaisseur = 4 mm.



À l'état recuit (non déformé), le fer polycristallin commercialement pur (% Fe > 99,6 %) présente une limite proportionnelle d'élasticité  $R_e$  égale à 60 MPa.

d) Pour quelle(s) raison(s) la limite proportionnelle d'élasticité  $R_e$  du fer polycristallin commercialement pur est différente de celle déduite du fer monocristallin très pur ?

Raison
Pour le fer polycristallin de haute pureté, la valeur de $R_e$ , déduite de la cission critique $\tau^*$ mesurée sur un monocristal, ne tient pas compte de l'effet de durcissement dû aux joints de grains présents dans le polycristal.
Dans le fer commercialement pur, il y a présence d'atomes d'impuretés, ce qui entraîne un durcissement par solution solide d'insertion ou de substitution.

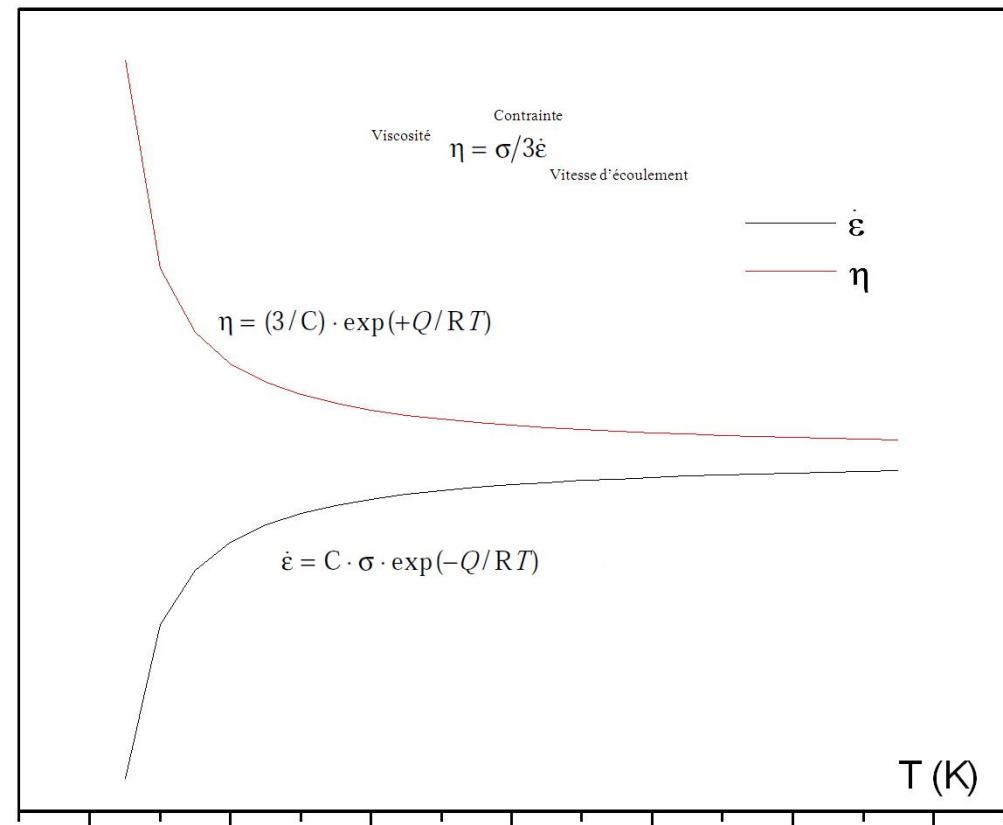
## II- Propriétés mécaniques.

### II-6: Effet de la température.

Mécanisme de déformation à chaud:

-Agitation thermique -> Activation des Mécanismes de déformation plastique.

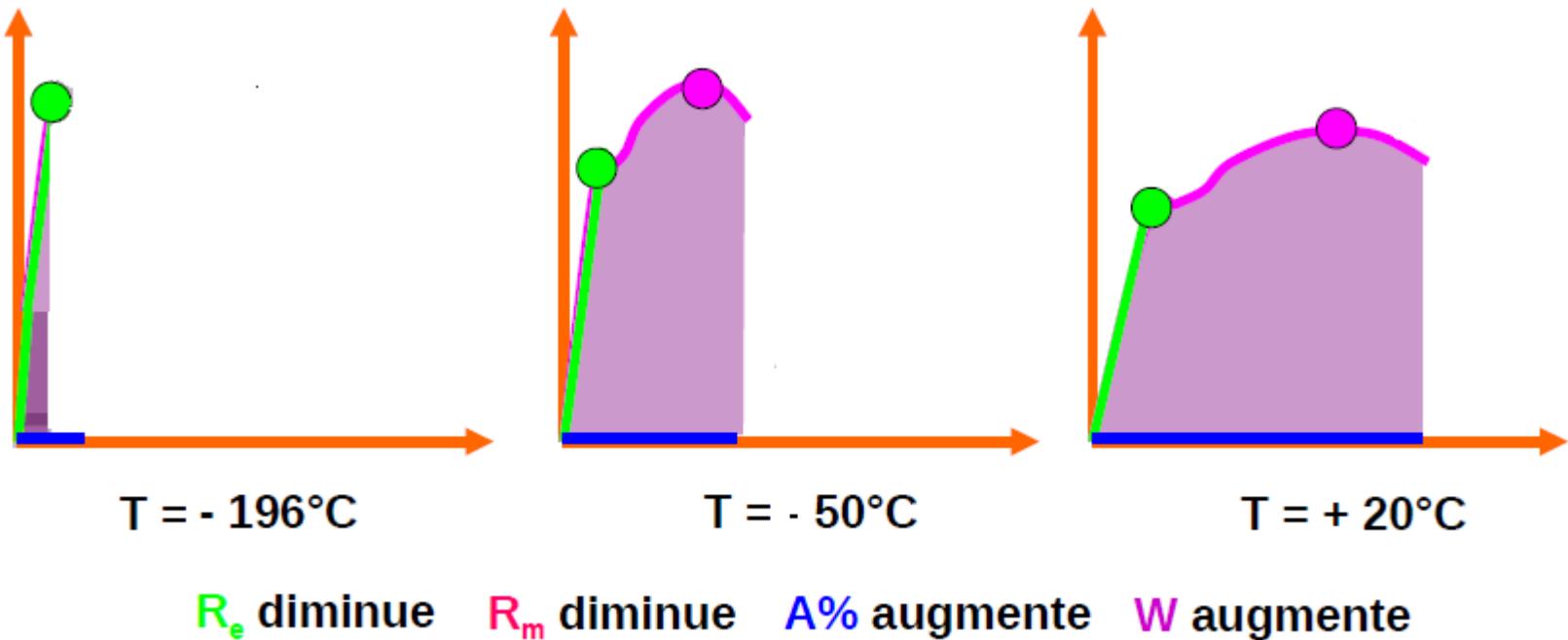
Contrainte  
Viscosité  $\eta = \sigma/3\dot{\epsilon}$   
Vitesse d'écoulement



## II- Propriétés mécaniques.

### II-6: Effet de la température.

Lorsque la température augmente, le domaine plastique apparaît progressivement. Le matériau devient de plus en plus ductile.



## II- Propriétés mécaniques.

### II-6: Fluage.

Le fluage est le phénomène physique qui provoque la déformation irréversible différée (c'est-à-dire non-instantanée) d'un matériau soumis à une contrainte constante, inférieure à la limite d'élasticité du matériau, pendant une durée suffisante.

Le fluage ainsi que la relaxation de contrainte sont deux méthodes en quasi statique de caractérisation des matériaux visqueux (cas du béton).

Application d'une contrainte modérée et permanente

à T grande.

Compétition

T

Effet de la contrainte  $\sigma_0$  (sollicitation)

$$= C_{te} \quad (\sigma_0 < R_e)$$

=> Déplacement des dislocations



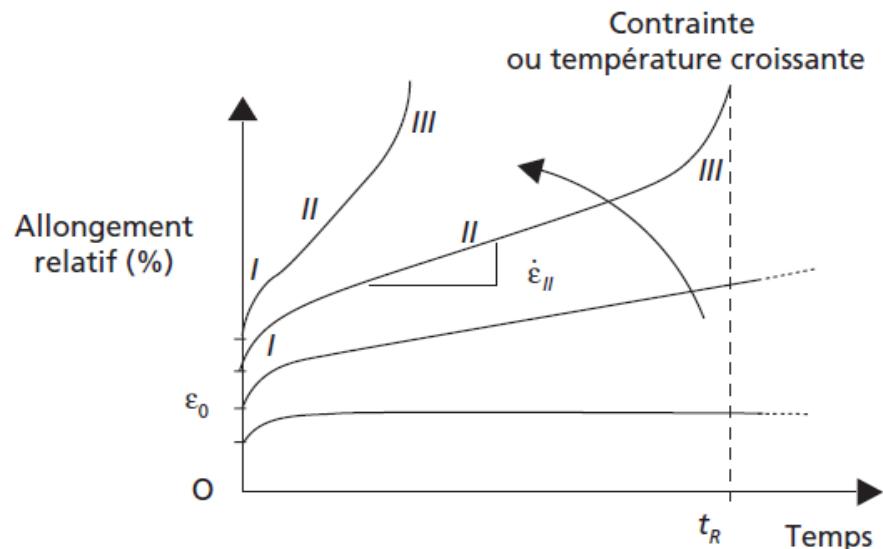
=> Restauration des dislocations

Application: test et prédition des déformation et dégradations des constructions (pont, bâtiments ...)

## II- Propriétés mécaniques.

### II-6: Fluage.

**Ecrouissage:** durcissement d'un métal sous l'effet de sa déformation plastique.



Allures schématiques de courbes de fluage obtenues pour diverses contraintes ou températures appliquées.

- une déformation instantanée  $\epsilon_0$ , élastique, proportionnelle à  $\sigma_0$ ;
- un stade I où la vitesse de fluage ralentit rapidement sous l'effet de l'écrouissage;
- un stade II caractérisé par une vitesse  $\dot{\epsilon}_{II}$  constante, qui peut représenter 90 % de la durée de vie de l'éprouvette et durer des milliers d'heures;
- un stade III précédant immédiatement la rupture, pendant lequel l'endommagement du matériau (accumulation progressive de cavités) s'accompagne d'une accélération rapide du fluage.

## III- Propriétés physique.

- La densité: degré de remplissage de la masse d' un corps par la matière solide. Elle est déterminée par le rapport entre la masse volumique du matériau et celle de l'eau.

$$d_{\text{matériau}} = \frac{\rho_{\text{matériau}}}{\rho_{\text{eau}}} \text{ (sans dimension)}$$

- La masse volumique: C'est la masse sur le volume du matériau.  $\rho = \frac{m}{V}$  ( $\text{kg}/\text{M}^3$ )

- La porosité: c'est le rapport du volume de vide au volume apparent .

- L'homogénéité : un matériau est homogène s'il présente en tout point les mêmes propriétés physiques (et chimiques).

- La résistance aux frottements .

- Malléabilité: c'est la facilité avec laquelle un matériau se laisse façonner, étendre et aplatisir en feuille mince sous un effort de compression. L'or, l'argent et le plomb sont très malléables.

- Perméabilité, Résistivité . Conductivité électrique intrinsèque, Mobilité des électrons, Mobilité des trous, Largeur de la bande interdite. Etc ...

## VI- Propriétés thermiques.

Elles caractérisent le comportement des matériaux en présence d'échanges thermiques (variation de température) .

- Conductivité thermique ( $\lambda$  (w/m. K)): c'est le flux de chaleur traversant un matériau dont la valeur quantifie le pouvoir du matériau à conduire la chaleur.
- Résistance thermique R( m<sup>2</sup>. K/W): Elle quantifie le pouvoir isolant du matériau.
- Diffusivité thermique (a(m<sup>2</sup>/s)): elle caractérise l'aptitude du matériau à transmettre la chaleur.
- Effusivité thermique (b(J/m<sup>2</sup>.K.s<sup>1</sup>/2)): quantifie l'aptitude du matériau à changer de température (plus ou moins rapidement).
- Emissivité ( $\epsilon$ ): c'est l'aptitude du matériau à émettre un rayonnement.
- Capacité thermique (C( J/K.kg)): c'est l'aptitude du matériau à absorber une quantité de chaleur Q et s'échauffer de  $\Delta T$ .
- Pouvoir calorifique (PC(J/kg)): c'est le pouvoir d'un matériau à dégager de la chaleur lors de sa combustion complète.
- Dilatation thermique ( $\Delta l$ ): traduit l'allongement du matériau en fonction de la température.

## V- Propriétés chimiques.

-La corrosion: c'est la détérioration lente et progressive d'un matériau sous l'effet de la combinaison chimique de l'oxygène de l'air et du matériau.

-L'oxydation: c'est la réaction avec l'oxygène pour former un oxyde. La corrosion peut se faire par oxydation.

Exemple :

- L'acier INOX est très résistant à l'oxydation à température ambiante.
- L'or est très résistant à l'oxydation à température ambiante aussi. Ce qui justifie son caractère toujours brillant (pas de formation de couche d'oxyde).
- Un matériau qui ne réagit pas avec l'oxygène (de l'air le plus souvent ou de l'eau) est dit résistant à l'oxydation. Et inversement non résistant à l'oxydation.

-La résistance aux acides et aux bases : les métaux ne sont pas résistants aux acides. Une grande partie des plastiques est résistante aux acides

# **Chap. 5: Métaux et alliages**

## I- Introduction.

On peut considérer les matériaux comme possédant chacun un jeu de caractéristique. Le concepteur ne recherche pas un matériau en tant que tel. Mais une combinaison de caractéristiques, un profil de propriétés...

Le nom du matériau est une façon d'identifier un profil de propriétés particulier, d'où le recours à la désignation pour identifier chaque matériau.

## II- Désignation normalisée des métaux et alliages.

### II- I Alliages ferreux: Désignation normalisée des aciers.

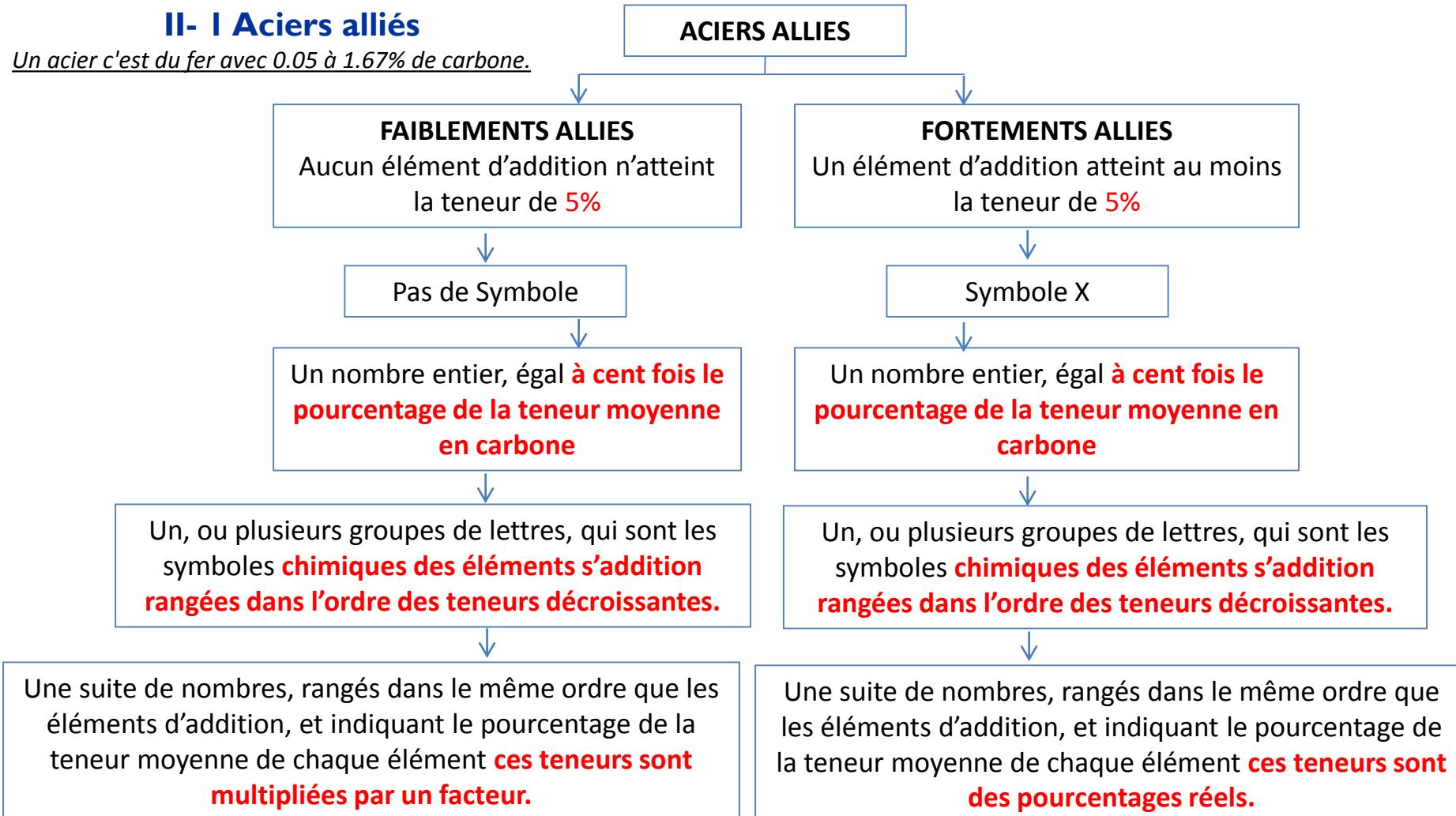
La désignation symbolique par emploi commence par une lettre majuscule suivie par des indications chiffrées relatives à des caractéristiques mécaniques ( $R_e$ ,  $R_m$  ou dureté).

Lettre	Signification	Exemple
B	Aacier pour béton; lettre suivie d'un nombre à 3 chiffres indiquant la valeur minimale de $R_e$ en Mpa.	B500
D	Produit plat pour formage à froid; lettre suivie de : C : produit laminé à froid; D : produit laminé à chaud; X : conditions de laminage non spécifiées; suivie d'un nombre-repère à 2 chiffres (voir la norme); suivi éventuellement de symboles additionnels (voir la norme).	DC04
E	Acier pour construction mécanique; lettre suivie d'un nombre à 3 chiffres indiquant la valeur mini- male de $R_e$ en MPa.	E360
G	Acier moulé; lettre-préfixe, suivie d'une désignation symbolique complète normale.	G15CrMoV6

## II- Désignation normalisée des métaux et alliages.

### II- I Aciers alliés

Un acier c'est du fer avec 0.05 à 1.67% de carbone.



## II- Désignation normalisée des métaux et alliages.

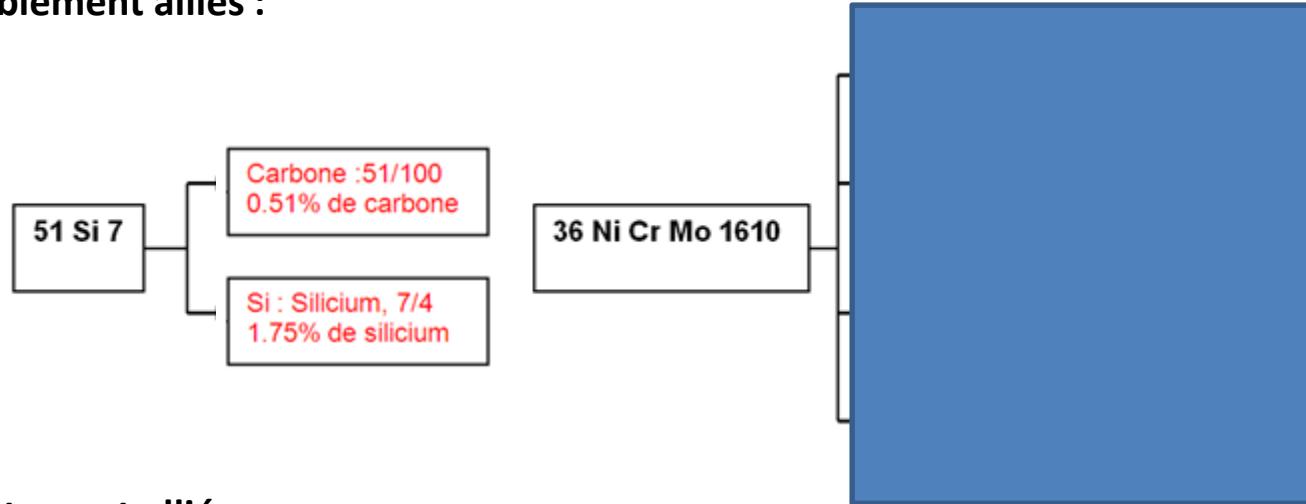
### II- I Aciers alliés

Facteur	
Elément d'alliage	Facteur
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V,	10

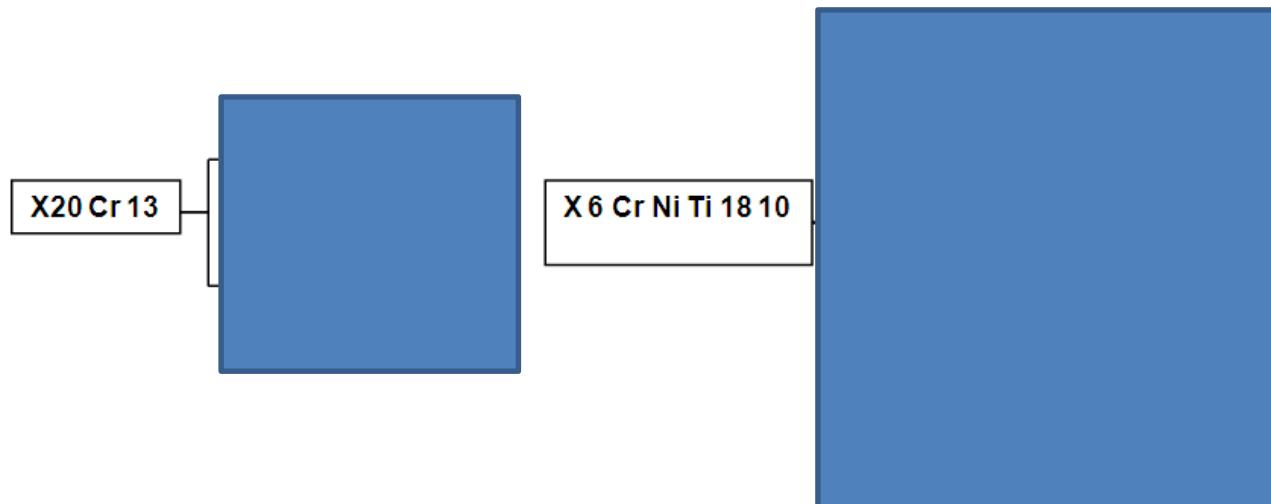
Elément simple	Symbole chimique	Symbole AFNOR	Elément simple	Symbole chimique	Symbole AFNOR	Elément simple	Symbole chimique	Symbole AFNOR
Aluminium	AL	A	Etain	Sn	E	Silicium	Si	S
Azote	N	-	Fer	Fe	Fe	Soufre	S	F
Béryllium	Be	Be	Lithium	Li		Strontium	Sr	-
Bismuth	Bi	Bi	Magnésium	Mg	G	Tantale	Ta	-
Bore	B	B	Manganèse	Mn	M	Titane	Ti	T
Cuivre	Cu	U	Plomb	Pb	Pb			

## Désignation: Exemple

Aciers Faiblement alliés :

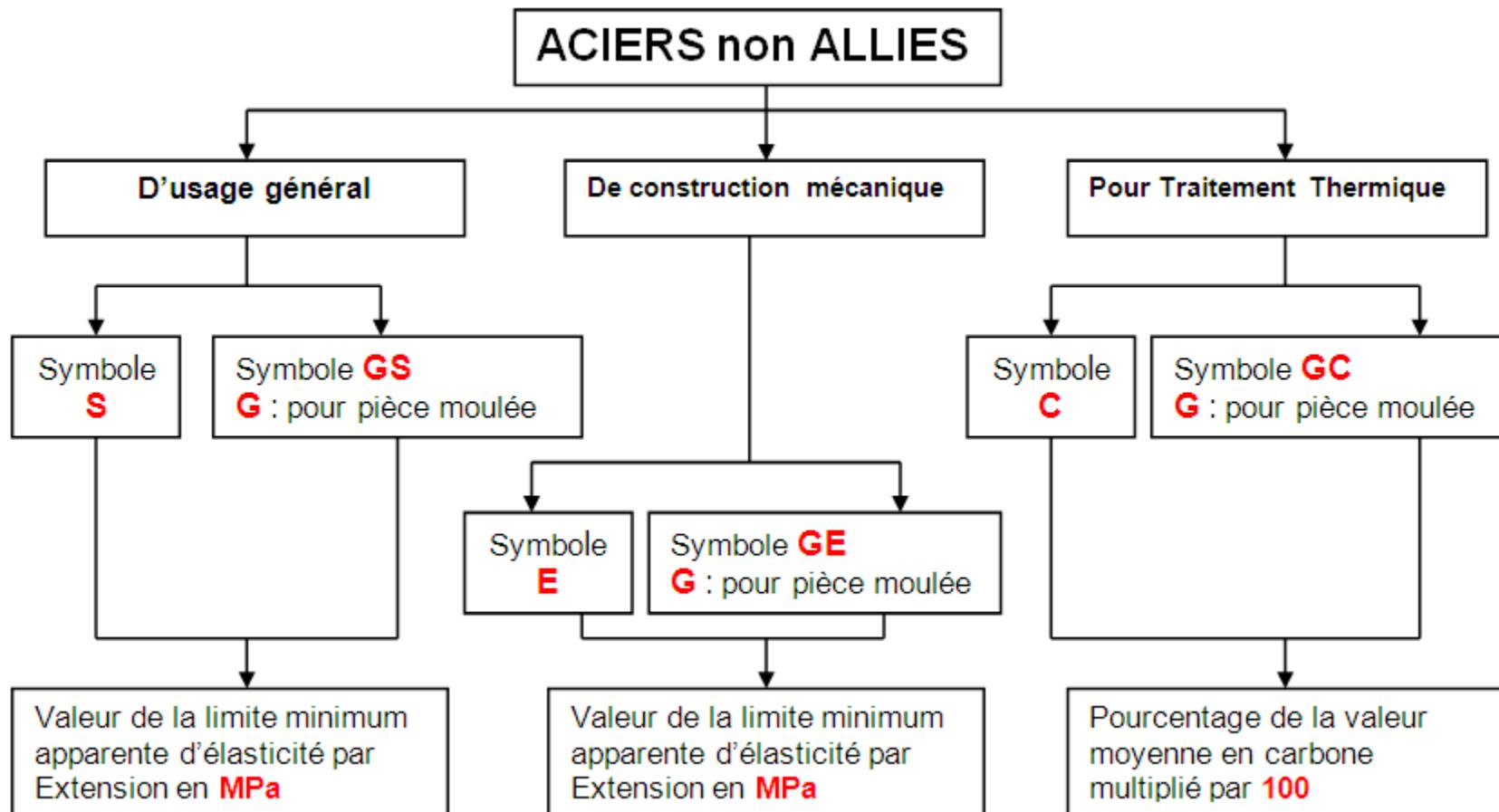


Aciers Fortement alliés :



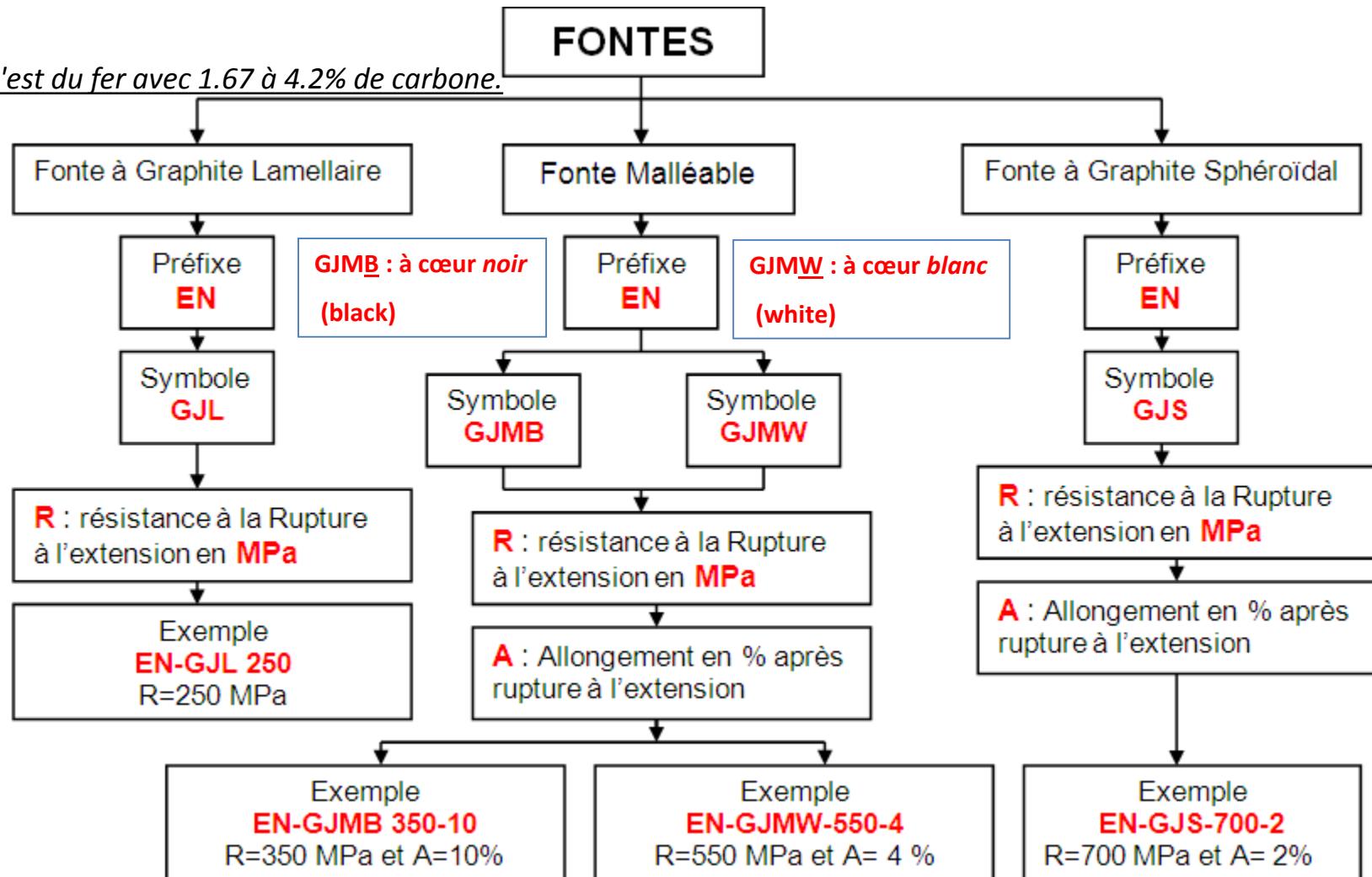
## II- Désignation normalisée des métaux et alliages.

### II- I Aciers non alliés



## Fontes:

Une fonte c'est du fer avec 1.67 à 4.2% de carbone.



## Fontes:

### Fontes à Graphite Lamellaire

Désignation symbolique, exemple :

Préfixe

**EN - GJL - 300**

Symbol

Valeur de la résistance minimale à la  
rupture par extension

### Fontes à Graphite sphéroïdale

Désignation symbolique, exemple :

Préfixe

**EN - GJS - 300 - 22**

Symbol

Pourcentage de  
l'allongement après la  
rupture

Valeur de la résistance  
minimale à la rupture par  
extension en Mpa

Pourcentage de  
l'allongement après la  
rupture

### Fontes à Graphite sphéroïdale

Désignation symbolique, exemple :

Préfixe

**EN - GJM (W ou B) - 300 - 22**

Symbol

GJMW : à cœur *blanc* (white)  
GJMB : à cœur *noir* (black)

Valeur de la résistance  
minimale à la rupture par  
extension en Mpa

## II- Désignation normalisée des métaux et alliages.

## **II- 2 Alliages non ferreux:**

## a- Alliages d'aluminium.

## **Exemple de désignation : Al Cu4 Mg**

**Avec :**

**AL : Symbole du métal de base ALUMINIUM.**

**Cu4 :** 1<sup>er</sup> élément d'addition suivi de son pourcentage réel.

**Mg :2<sup>e</sup> élément d'addition suivi de son pourcentage réel.**

#### **Exemples d'alliage d'Aluminium :**

- **ALPAX** : Aluminium (Al) + Silicium (Si) Al Si 12 (Bonne moulabilité).
  - **DURALIUM** : Aluminium (Al) + Cuivre (Cu) Al Cu 4 Mg Si (Bonne usinabilité).
  - **DURALINOX** : Aluminium (Al) + Magnésium (Mg) Al Mg 4 (Bonne soudabilité).  
(Pièces chaudronnées : Citerne, Tuyauterie).

## II- Désignation normalisée des métaux et alliages.

### II- 2 Alliages non ferreux:

#### b- Alliages de cuivre.

Exemple de désignation : **Cu Zn 39 Pb2**

Avec :

**CU** : Symbole du métal de base **Cuivre**.

**ZN 39** : 1<sup>er</sup> élément d'addition suivi de son Pourcentage réel.

**Pb2** : 2<sup>e</sup> élément d'addition suivi de son Pourcentage réel.

Exemples d'alliage de Cuivre :

- **BRONZE** : Cuivre (Cu) + Etain (Sn)

**Cu Sn 8**

Matériau de frottement (Bague, douille, segments)

- **LAITON** : Cuivre (Cu) + Zinc (Zn)

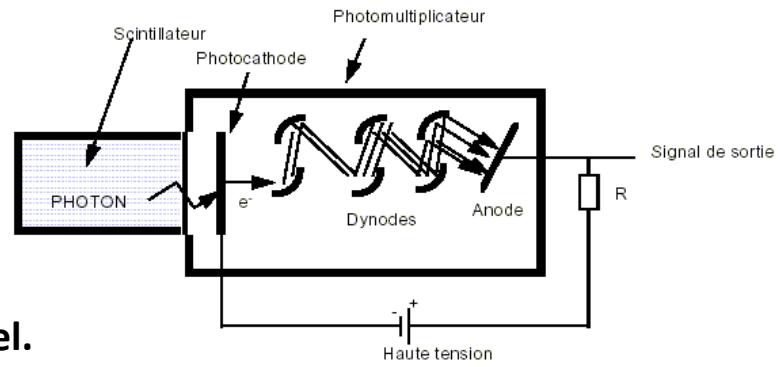
**Cu Zn 15**

Bonne usinabilité (robinetterie, pompe)

- **CUIVRE AU BERYLIUM** : Cuivre (Cu) + Béryllium (Be)

**Cu Be 2**

(Ressorts, rondelles, dynodes d'un photomultiplicateur)



## II- Désignation des matériaux plastiques.

THERMOPLASTIQUES		
Symbol	Désignation	Utilisation
CA	Acétate de cellulose	Plus vieux plastique (1905). Peignes,
ABS	Acétate de cellulose	Carrosserie Auto. Articles ménagers
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle(PLEXIGLASS)	Transparent. Vitres, optiques d'éclairage
PA6/6	Polyamide type 6-6 (NYLON)	Engrenages, coussinets
PA 11	Polyamide type 11 (NYLON)	Canalisations
PC	Polycarbonate	Transparent. Visières de casque.
PE hd	Polyéthylène haute densité	Poches plastiques, récipients
PE bd	Polyéthylène basse densité	Flacons, bidons
PTFE	Polytétrafluoréthylène (TEFLON)	Joints, patins de glissement
POM	Polyoxyméthylène (DELRIN)	Robinets, engrenages
PP	Polypropylène	Tuyaux, bouteilles
PS	Polystyrène	Emballages électroménagers
PSB	Polystyrène résistant aux chocs	Carters électroménagers
PVC U	Polychlorure de vinyle (rigide)	Canalisations
PVC P	Polychlorure de vinyle (souple)	Tuyaux, gaines isolantes

THERMODURCISSABLES		ELASTOMERES	
Symbol	Désignation	Symbol	Désignation
PF 21	Phénoplaste (BAKELITE)	NBR	Butadiène-Acrylonitrile (PERBUNAN)
EP	Epoxyde (ARALDITE)	EPM	Ethylène-Propylène
UP	Polyester	FPM	Fluorocarbone
PUR	Polyuréthane	FKM	Elastomère fluoré (VITON)

## III- Fer et alliages ferreux.

### III- I Propriétés physico-chimique du fer:

Point de fusion :  $\theta_f = 1\ 538^\circ\text{C}$

Structure cristalline : CC (ferrite  $\delta$ ) entre  $\theta_f = 1\ 538^\circ\text{C}$  et  $1\ 394^\circ\text{C}$

CFC (austénite  $\gamma$ ) entre  $1\ 394^\circ\text{C}$  et  $912^\circ\text{C}$

CC (ferrite  $\alpha$ ) entre  $912^\circ\text{C}$  et l'ambiante

Passage de l'état ferromagnétique (à basse température) à l'état paramagnétique (à haute température) à  $768^\circ\text{C}$  (point de Curie).

Masse volumique :  $\rho = 7\ 870 \text{ kg/m}^3$

Conductivité thermique :  $\lambda = 30 \text{ à } 75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$

Coefficient de dilatation linéique  
(fer  $\alpha$  à  $20^\circ\text{C}$ ) :  $\alpha = 12,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Résistivité électrique :  $\rho = 0,104 \mu\Omega \cdot \text{m}$

Caractéristiques mécaniques à  $20^\circ\text{C}$  (fer  $\alpha$  pur) :

$R_m = 180 \text{ à } 290 \text{ MPa}$

$R_e = 100 \text{ à } 170 \text{ MPa}$

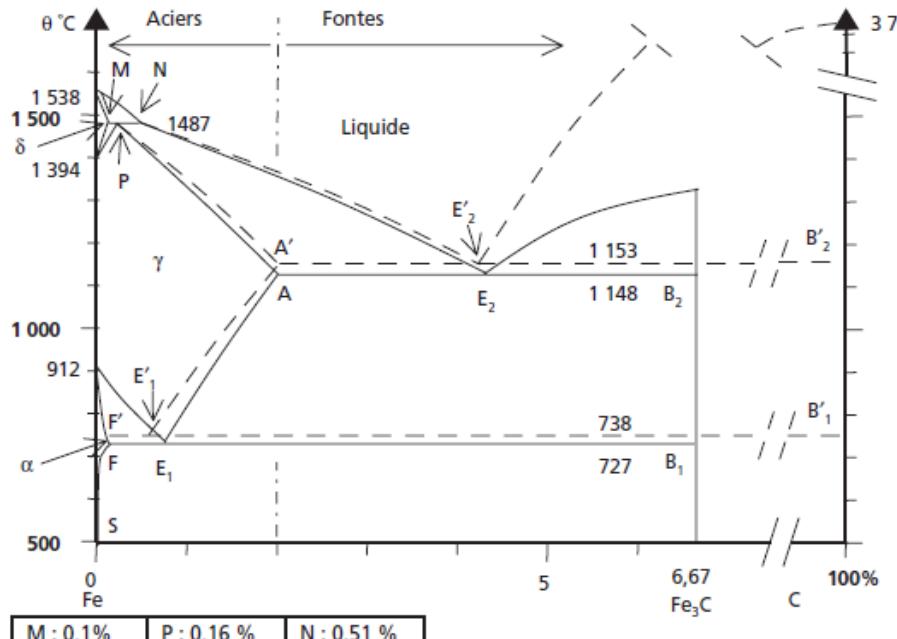
$A \% = 40 \text{ à } 50 \%$

$E = 210\ 000 \text{ MPa}$

## III- Fer et alliages ferreux.

### III-2 Diagrammes de phases fer – carbone

Les phases des alliages fer – carbone peuvent être décrites à l'aide de deux diagrammes:



M : 0,1%	P : 0,16 %	N : 0,51 %
A : 2,11%	E <sub>2</sub> : 4,3 %	B <sub>2</sub> : 6,67 %
F : 0,02%	E <sub>1</sub> : 0,77 %	B <sub>1</sub> : 6,67 %
S(600 °C) : 5,7 10 <sup>-3</sup> %		
S(200 °C) : 7 10 <sup>-7</sup> %		

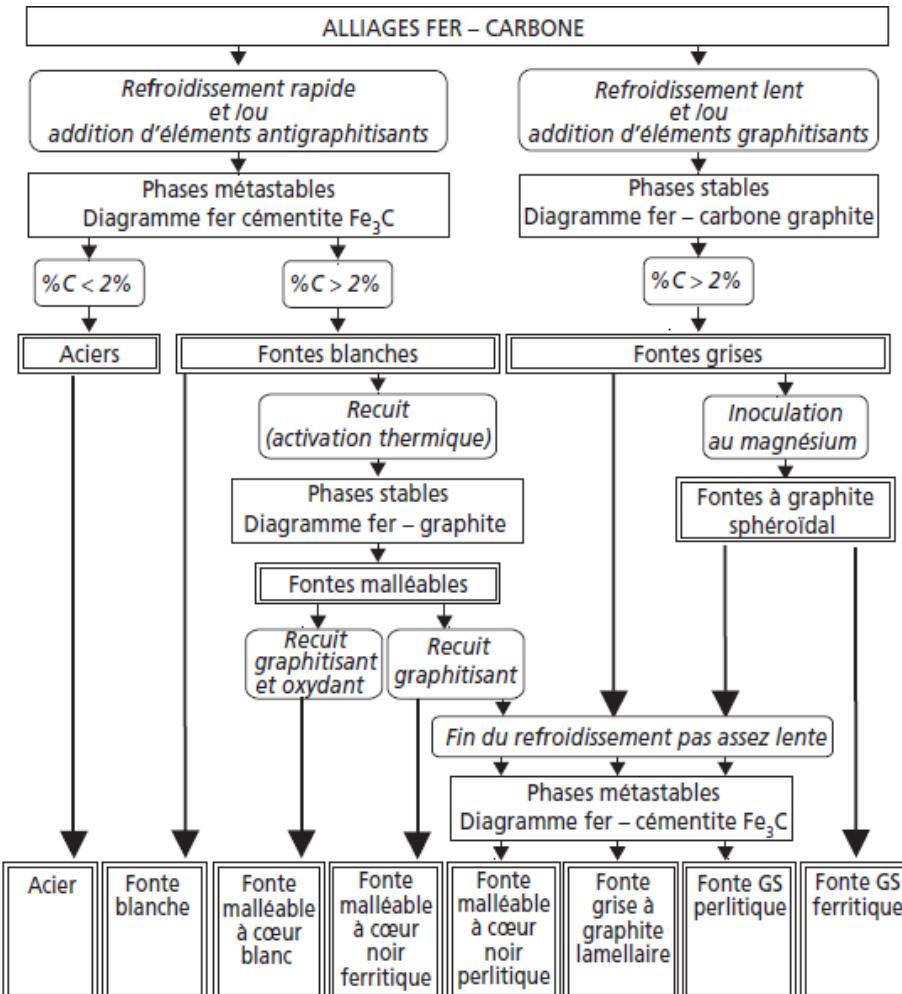
A' : 2,03%	E' <sub>2</sub> : 4,25%	B' <sub>2</sub> : 100%
F' : 0,022%	E' <sub>1</sub> : 0,69%	B' <sub>1</sub> : 100%

- le diagramme Fe –  $Fe_3C$ , représentant des états métastables;
- le diagramme Fe – C, représentant les états stables.

Diagrammes fer – carbone pour les aciers et les fontes.

En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe –  $Fe_3C$ .

## III-2 Diagrammes de phases fer – carbone



Synoptique des diverses possibilités  
de phases et structure des alliages fer – carbone.

- $\text{Fe}_3\text{C}$  (cémentite) se forme lors du refroidissement des mélanges Fe-C (forme métastable).
- Refroidissement lent = diagramme Fe-C.
- Refroidissement rapides = diagramme Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ .
- Eléments d'adition graphitisants activent la décomposition de la cémentite (Si, P, Al, Ni, Cu, Ti, Zr, ...).

## III-3 Acier

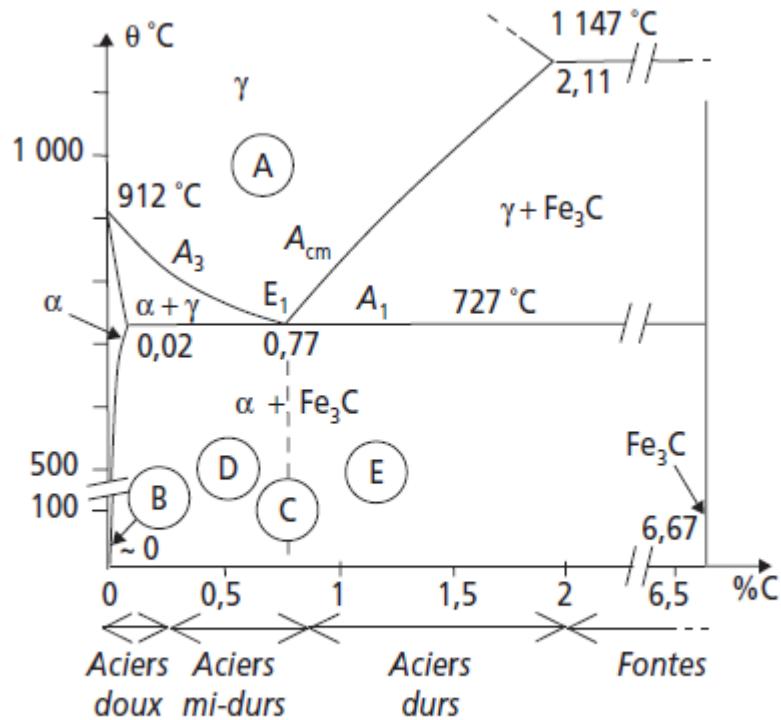


Diagramme de phases des aciers au carbone non alliés

- Les aciers, alliages Fe-C à teneur inférieure à 2 % C, ont des microstructures qui correspondent toujours aux équilibres du diagramme Fe-Fe3C.

- Traitements thermiques des aciers:

### Austénite

Solution solide cfc de carbone dans le fer  $\gamma$ . Ductile. Stable uniquement au-dessus de la ligne  $A_1$  dans les aciers non alliés.

### Ferrite

Solution solide cc de carbone dans le fer  $\alpha$ . Ductile et peu dure ( $R_e = 300$  MPa, HV = 80, A = 50 %).

### Perlite

Mélange eutectoïde d'environ 88 % de ferrite et 12 % de cémentite sous forme de fines lamelles alternées ( $R_e = 800$  MPa, HV = 200, A = 10 %).

### Cémentite

Composé défini  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Carbure de fer à structure cristalline orthorhombique. Très dur et fragile (HV = 700, A = 0 %).

### Ferrite + perlite

Mélange caractéristique des aciers hypoeutectoïdes. Proportions variables selon la teneur en carbone. Les grains de ferrite germent le long des joints de grains de l'austénite au refroidissement à la traversée du domaine  $\alpha + \gamma$ .

### Perlite + cémentite

Mélange caractéristique des aciers hypereutectoïdes. Proportions variables selon la teneur en carbone, mais n'excédant jamais 20 % de cémentite dans les aciers. Le réseau de cémentite se forme le long des joints de grains de l'austénite au refroidissement à la traversée du domaine  $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ .

## ***Exercice :***

Décoder les désignations suivantes :

*EN-GJL-200* ;

*EN-GJMB-450-6* ;

*EN-GJS-400-18* ;

*16 Ni Cr Mo 8-6* ;

*X5CrNi20-10* ;

*CuSn12* ;

*CuZn36Pb2* ;

*EN-GJL-300* ;

*S 235 ; E 295 ; C 40* ;

*25Cr Mo 4-25; Cu Be 3.*