



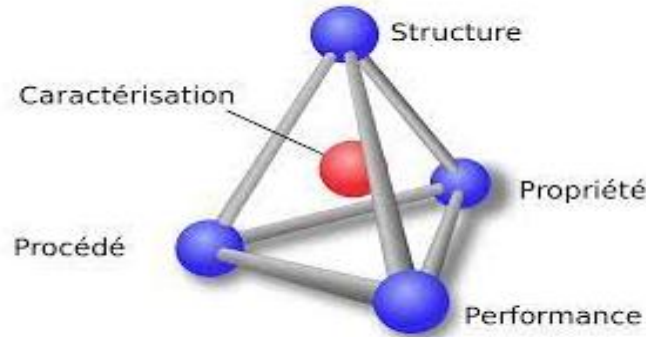
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية  
الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة وهران للعلوم والتكنولوجيا محمد بوضياف  
كلية الهندسة الميكانيكية  
قسم المناجم والتعدين



## CARACTERISATION DES MATERIAUX METALLIQUES

### COURS ET EXERCICES CORRIGES

Réalisé par : Dr.BOUAKSA FETHIA



Année Universitaire

2021-2022

## **Avant propos**

Les propriétés mécaniques des matériaux sont caractérisées par différents paramètres. Notons par exemple, la résistance à la traction, la résistance aux chocs, la dureté, la limite de fatigue... Le module d'élasticité et l'allongement à la rupture sont aussi des paramètres cruciaux. Il est important de connaître ces différents paramètres lors de la conception d'une pièce métallique ou encore après sa fabrication. Il est alors possible de vérifier si le matériau de la pièce est conforme au cahier des charges.

Ce support de cours de Caractérisation des matériaux métallique est destiné aux étudiants de la première année en Master Professionnalisant de spécialité : Ingénierie et Technologie des Matériaux.

### **Contenu du cours :**

- Rappel sur la structure des matériaux ;
- La classification générale des matériaux et des notes générales concernant les grandes familles des matériaux métallique ;
- Les essais de caractérisation de matériaux en partant de la métallographie jusqu'aux certains mécaniques classiques,
- Des notions sur la mécanique de la rupture, et la fatigue des matériaux que doit savoir un futur spécialiste en Ingénierie des Matériaux.

Je remercie mes chers lecteurs pour leurs questions et suggestions qui seront les bienvenus en vue d'améliorer le contenu et la forme de ce présent support.

**Dr.BOUAKSA FETHIA**

## PLAN DE COURS

Titre de Cours :		Caractérisation des Matériaux Métalliques
Parcours :	Master I : Ingénierie et Technologie des Matériaux "	
Horaire	Lundi et Mercredi de 9H30 à 12H30.	
Responsable du module	Dr. BOUAKSA Fethia	
Salle de cours	IGCMO	
Matériel didactique utilisé	Vidéo projecteur	
Contenu et calendrier des rencontres		
Chapitres	Objectifs spécifiques	Evaluation
1. Rappel sur la structure des matériaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Description de l'état solide de la matière</li> <li>✓ Notions sur les réseaux cristallins courants.</li> </ul>	Exercices d'application
2. Désignation normalisées des aciers et fontes	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Notions sur les différentes classes et familles de matériaux.</li> <li>✓ Connaître la désignation normalisée des aciers et des fontes</li> </ul>	Exercices d'application
3. Diagramme de phases binaires Fe-C	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Décrire les structures d'équilibre, à partir des diagrammes de phases Fe-C</li> </ul>	Exercices d'application
4. Méthodes de caractérisation des Matériaux -Examens Métallographiques et Essais Mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Définir l'examen métallographique.</li> <li>✓ Décrire et Connaître les différents essais pour caractériser les matériaux métalliques</li> </ul>	Exercices d'application
5. Concepts Fondamentaux de la mécanique de la rupture	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Des exercices variés illustrent les points essentiels du cours.</li> </ul>	
6. Exercices avec corrigés		

## Bibliographie

- **Cristallographie -Cours et Exercices N.BETTAHAR & F.HMZAoui**
  - **Exercices et problèmes de Cristallographie -François Mathieu**
  - **Caractérisation Expérimentale des Matériaux I. Traité des Matériaux**
    - **-Suzanne Degallaisx et Bernhard Ilchner**
    - **Matériaux -Propriétés et applications -Michael F.Ashby & David RHJones.**
    - **Précis de métallurgie : élaboration, structures-propriétés et normalisation. J. BARRALIS, G. MAEDER, 6ème édition. AFNOR, NATHAN**
    - **Métallurgie cours et Exercices corrigés -Polycopie de M.Belhouel.**
-

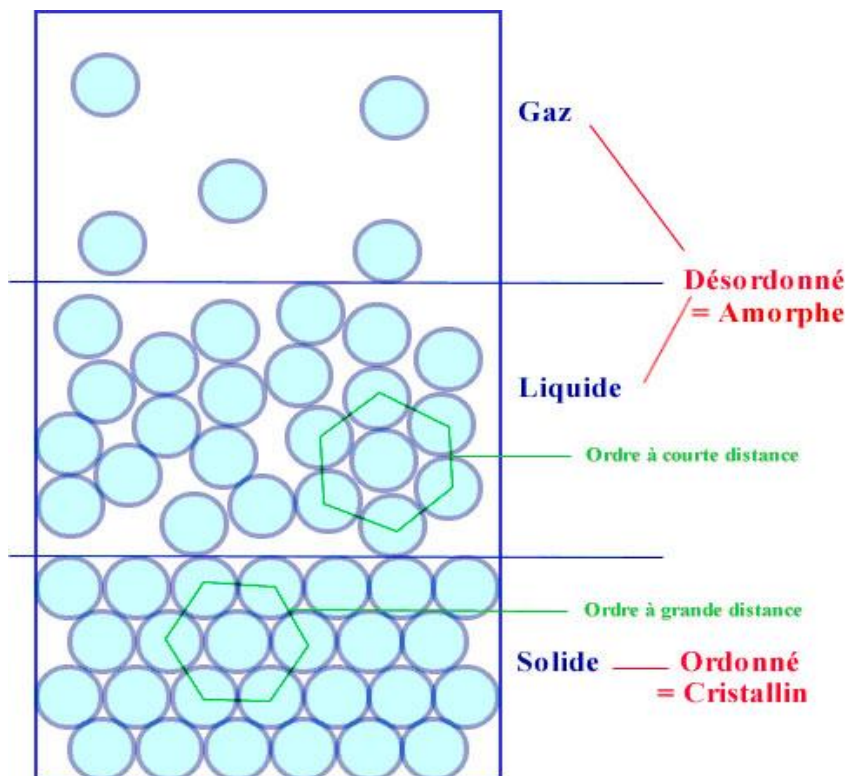
### I. Introduction :

L'évolution spectaculaire de la diversité et des performances des matériaux est due à une compréhension et à une maîtrise de plus en plus fines de leur structure, ainsi que des relations entre structure et propriétés d'emploi. La

diversification des matériaux est également liée à une spécialisation de plus en plus grande, qui repousse toujours plus loin les limites de mise en œuvre et d'utilisation finale de ces matériaux. Ce chapitre introduit les éléments

de base de la structure des matériaux, en partant de l'échelle atomique pour arriver à celle de l'objet « **macroscopique** ».

Tous les matériaux qui nous entourent sont formés d'atomes et de molécules. L'arrangement et la relation qui existent entre ceux-ci expliquent certaines de leurs propriétés. Pendant longtemps les physiciens, en se fondant sur l'apparence immédiate des corps qui nous entourent, ont distingué les états solide, liquide et gazeux. La classification actuelle repose sur la structure atomique des matériaux et ne considère plus que deux états principaux : l'état désordonné et l'état ordonné (Figure 1).



**Figure 1 : Les différents états physiques de la matière**

- **Dans l'état désordonné** : les atomes ou molécules constituant la matière sont disposés de façon essentiellement aléatoire. Les gaz et les liquides de l'ancienne classification appartiennent naturellement à cette catégorie, mais aussi les solides amorphes, tels que les verres ou certains polymères (le polycarbonate, la PMAA, ...etc ).

- **Dans l'état ordonné ou cristallin** : les éléments constitutifs (atomes, ions ou molécules) sont répartis de façon régulière suivant les trois directions de l'espace. Ces matériaux sont parfois qualifiés de « vrais solides ». La plupart des objets qui nous entourent relèvent de cette catégorie.

## II. ARRANGEMENT STRUCTURAL DES SOLIDES CRISTALLINS :

**II.1 L'état cristallin** : est défini par un caractère périodique et ordonné à l'échelle atomique ou moléculaire. Le cristal est obtenu par translation dans toutes les directions d'une unité de base appelée maille élémentaire.

**Le cristal parfait** : 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.**

## II.2 DÉFINITIONS GÉNÉRALES RELATIVES AUX CRISTAUX

**Maille, réseau, motif et structure cristalline :**

**II.2.1 Définition de la maille** : Une maille est une unité de base parallélépipédique à partir de laquelle on peut engendrer tout le cristal uniquement par des translations. Elle est définie par une origine « O » et trois vecteurs de base  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$ , Les longueurs a, b, c sont des arêtes, et les mesures  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sont des angles entre les vecteurs de base (Figure .2).

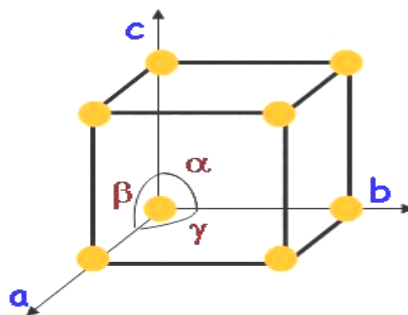
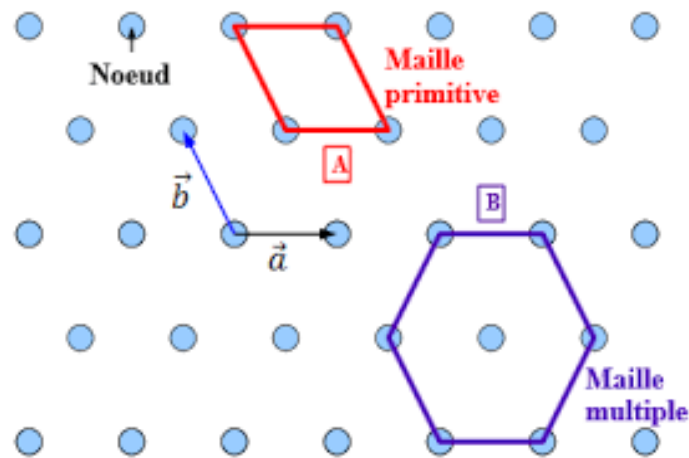


Figure 2 : Représentation d'une maille tridimensionnelle

Le choix d'une maille n'est pas unique. Il existe une infinité de mailles pouvant être choisies pour engendrer un cristal. Parmi celles-ci, on appelle maille élémentaire ou primitive une maille de volume minimal, donné par la valeur du produit mixte des trois vecteurs de base, soit :

$$V = \left| \vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c}) \right|$$

Par ailleurs, la maille de description doit faire apparaître toutes les symétries du système, ce qui n'est pas toujours le cas de la maille élémentaire. Il est alors utile de considérer une maille multiple ou conventionnelle, comportant plusieurs nœuds (qui ne sont pas tous situés aux sommets de la maille), faisant clairement apparaître la symétrie de la structure. Le nombre de nœuds inclus dans la maille est appelé ordre – ou multiplicité – de la maille. Sur la figure 3 apparaît une maille primitive d'ordre 1 qui contient seulement des nœuds aux sommets de la maille. La maille multiple d'ordre 2 contient, plus des nœuds aux sommets, un nœud au centre du volume.



**Figure 3 : Représentation de différentes formes de mailles dans un réseau bidimensionnel.**

**II.2.2 Définition du réseau :** On appelle réseau un ensemble de points équivalents de l'espace appelés nœuds, engendrés par une translation par les vecteurs de base :  $\vec{a}$   $\vec{b}$   $\vec{c}$  . On peut le définir aussi par un ensemble de points qui n'a aucune matérialité (Figure 4). L'ensemble des points M forme les nœuds du réseau, occupés ou non par des particules.

L'origine « O » est un nœud, donné par  $x = y = z = 0$ . Les vecteurs de base ne sont pas uniques pour un réseau et le vecteur de translation est donné par la relation :

$$\vec{T} = u \vec{a} + v \vec{b} + w \vec{c}$$

**II.2.3 Définition du motif :** Le motif est constitué par la plus petite entité discernable qui se répète périodiquement par translation (figure 5). Pour un cristal, à l'échelle microscopique, le motif est un ensemble de particules, constituées d'atomes, d'ions ou de molécules.

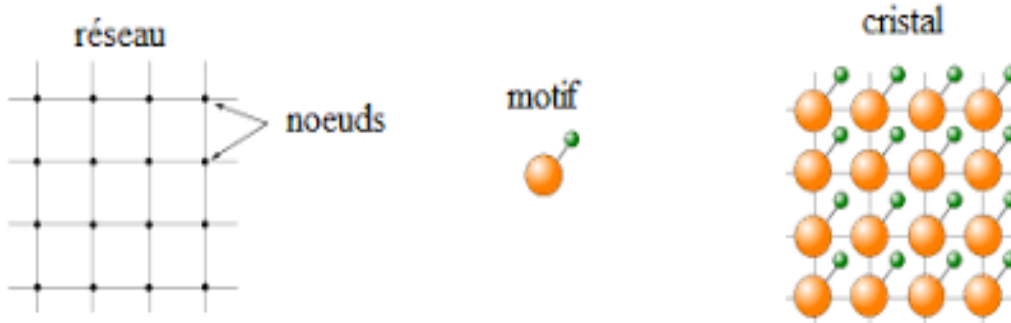


Figure 4 : Réseau et motif cristallin

**II.2.4 Définition de la structure cristalline :** Une structure cristalline est formée d'un réseau de nœuds plus un motif (Figure I.11).

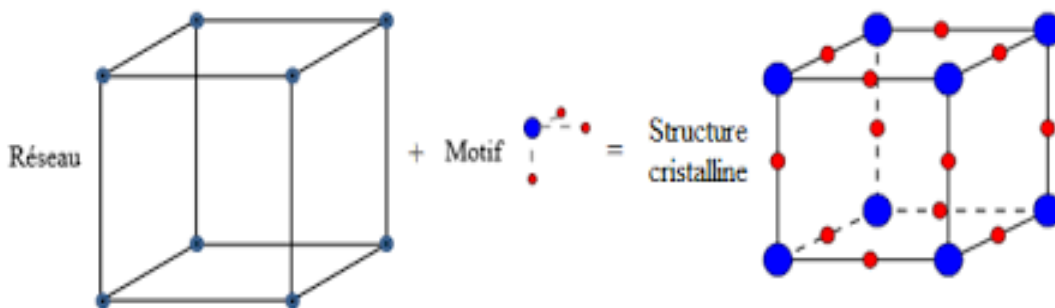


Figure 5 : Structure cristalline tridimensionnelle

Il y a aussi trois définitions qui sont utiles pour l'étude des métaux : la coordinence, la compacité et la population.

**II.3 Coordinence :** La coordinence d'un atome (ou d'un ion) au sein d'un réseau cristallin est le nombre de plus proches voisins que possède cet atome (ou cet ion).

Dans un métal pur, tous les atomes possèdent la même coordinence, sans dire que dans un alliage ou un cristal ionique, les atomes ou les ions peuvent avoir des coordinences différentes.

**II.4 Compacité** : La compacité d'un solide cristallisé est la fraction de volume occupée par la matière en considérant les atomes et les ions comme des sphères dures :

$$c = \frac{\text{Volumés occupé par les atomes}}{\text{Volume de la maille}}$$

**II.5** La compacité d'une structure c.f.c. est calculée à partir des paramètres de maille  $a$  (longueur de l'arête du cube). Le volume occupé par les atomes est :

$$V_{\text{atomes}} = 4 \frac{4}{3} \pi r^3$$

avec  $r$  le rayon de l'atome. L'assemblage étant compact, ce rayon peut être rapporté au paramètre de maille  $a$ . Puisque trois atomes sont accolés sur la diagonale d'une face du cube. donc il en résulte que :

$a = 2 a = 2\sqrt{2} r$  ce qui conduit à la formule suivante :

$$V_{\text{atomes}} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} a^3$$

Le volume occupé par la maille cubique est  $V_{\text{maille}} = a^3$ . La compacité est donc :

$$C_{(cfc)} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0.74$$

**II.6 Population** : la population d'une maille, c'est-à-dire le nombre d'atomes (d'ions, de molécules...) contenus dans une maille.

**Types de réseaux cristallins** : Il existe 7 systèmes cristallins. Bravais (1848) a montré qu'il y avait en fait 14 systèmes cristallins et tous les cristaux appartiennent à ces systèmes.

Une analyse de diffraction des rayons X permet de connaître le système cristallin d'un cristal, une analyse chimique permet de remonter à la composition chimique. Coupler l'analyse chimique et la diffraction des rayons X permet donc de classer une espèce minérale.

Systèmes	Réseaux	Nombre de groupes	Exemples
----------	---------	-------------------	----------

		d'espace	
Triclinique	Simple	2	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>
Monoclinique	simple centré	13	AgS, As <sub>4</sub> S <sub>4</sub> ( <a href="#">réalgar</a> ), ZrO <sub>2</sub> , CuO, MnO(OH)
Orthorhombique	simple centré une face centrée toutes faces centrées	59	TiO <sub>2</sub> , Ag <sub>3</sub> Sb, PtS  AgFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub> S (alpha)
Quadratique	simple centré	68	Ni <sub>4</sub> As <sub>8</sub> CuFeS <sub>2</sub> ( <a href="#">chalcopyrite</a> )
Hexagonal	Simple	52 *	Zn, Cd, Ti, CaCO <sub>3</sub>
Rhomboédrique	Simple		CaCO <sub>3</sub> (calcite), Bi
Cubique	simple centré toutes faces centrées	36	Po Fe, Ta, Sn NaCl, Al, CsBr, W
<b>Total : 7</b>	<b>Total : 14</b>	<b>Total : 230</b>	

**Tableau 1. Les 14 réseaux de BRAVAIS et les groupes d'espace**

Les structures simples se retrouvent dans chacun des 7 systèmes : on y trouve un atome (ou un groupe d'atomes aux 8 sommets du parallélépipède (Fig. 6.1). Comme chaque atome ou groupe d'atomes est partagé dans 8 parallélépipèdes (motifs), on a donc 1 atome ou groupe d'atomes par motif

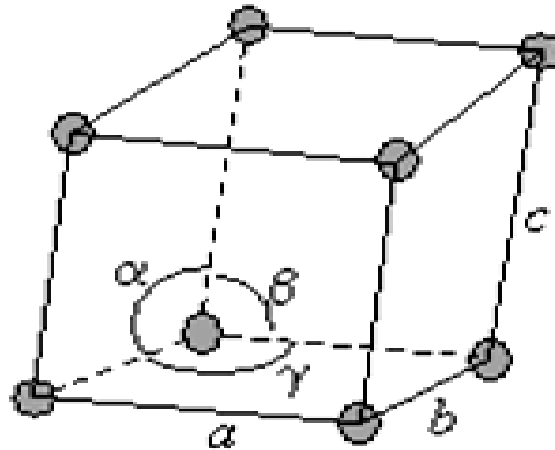


Figure 6.1. Les réseaux simples

Les trois structures orthorhombique, quadratique et cubique adoptent le réseau centré, c'est-à-dire qu'au centre du motif on retrouve un atome ou un groupe d'atomes. On a maintenant 2 atomes ou groupes d'atomes par motif (Fig. 6.2).

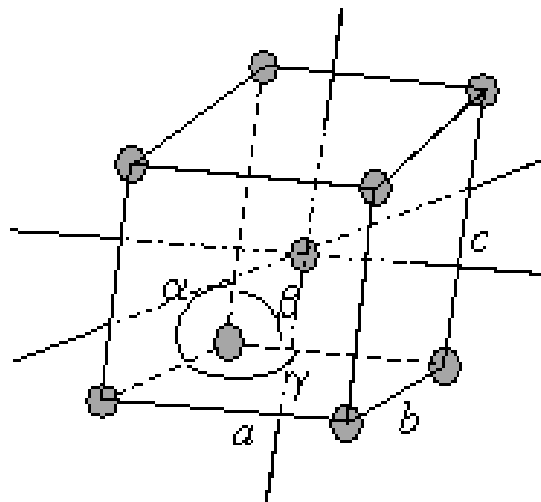


Figure 5 : Les réseaux centrés.

Les systèmes orthorhombique et monoclinique admettent la structure à deux faces centrées : on trouve un atome ou un groupe d'atomes au centre de deux faces opposées. Ces deux atomes ou groupes d'atomes sont partagés entre deux parallélépipèdes, on trouve donc 2 atomes ou groupes d'atomes par motif (Fig. 6.3).

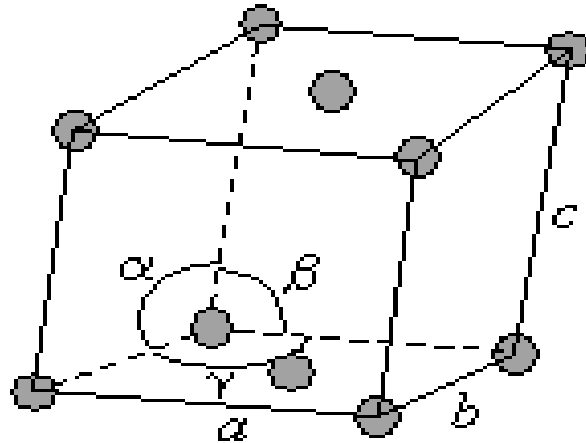


Figure 6 : Les réseaux à deux faces centrées.

Finalement, les systèmes orthorhombiques et cubiques admettent la structure à toutes faces centrées. Chaque motif contient 4 atomes ou groupes d'atomes (Fig. 6.4).

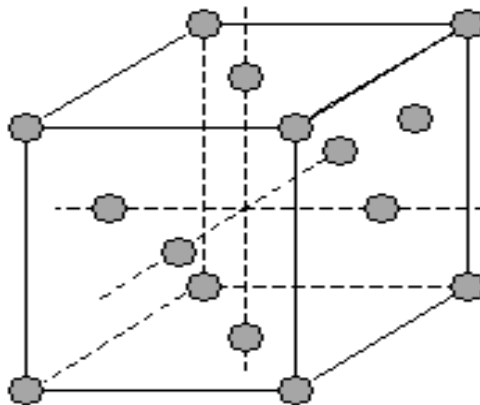


Figure 7 : Les réseaux à toutes faces centrées.

### III. LES SOLUTIONS SOLIDES :

Dans les solutions solides primaires, on trouve différentes dispositions des atomes de l'élément d'alliage par rapport aux atomes de l'élément de base.

Dans le réseau cristallin du métal pur **A**, les atomes de **B** peuvent entrer en solution en se substituant aux atomes de **A** ou en se plaçant dans les interstices de ce réseau. On obtient ainsi les deux grandes classes de solutions solides : les solutions solides de substitution et les solutions solides d'insertion.

#### III.1. Sites cristallographiques

Etant donné que la compacité d'une structure c.f.c. est de 0,74, c'est à dire plus de 25 % du volume de cette structure ne contient pas de matière. Cet espace est susceptible d'accueillir des atomes, des molécules ou des ions selon le cas. Pour déterminer les possibilités d'insertion dans le cristal, il est nécessaire d'effectuer le recensement des sites cristallographiques disponibles et de déterminer leur taille. Les structures compactes c.f.c. (et également h.c.) comportent deux types de sites, les sites octaédriques et les sites tétraédriques.

**Site octaédrique** Les sites octaédriques (sites O) correspondent au volume disponible entre six atomes formant un octaèdre. Ceci est réalisé au moyen de trois atomes d'un plan formant un triangle et de trois atomes d'un plan parallèle formant également un triangle accolé au premier.

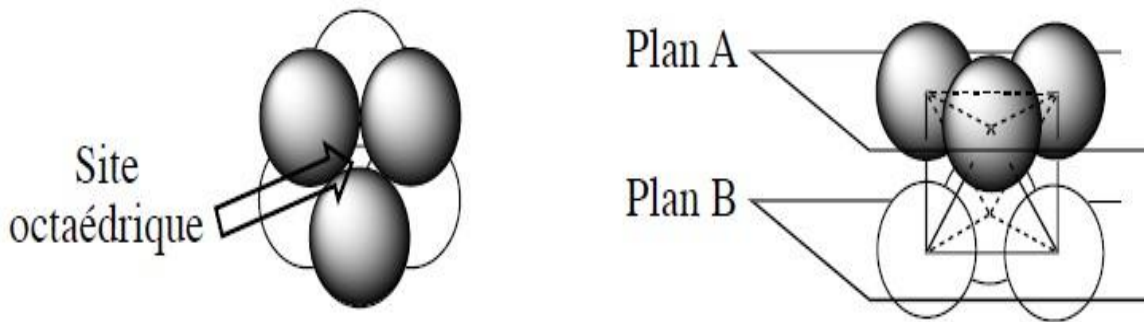


Figure 8 : Site octaédrique

La structure c.f.c. comporte quatre sites octaédriques par maille. Ils sont positionnés au centre et sur les arêtes de la maille.

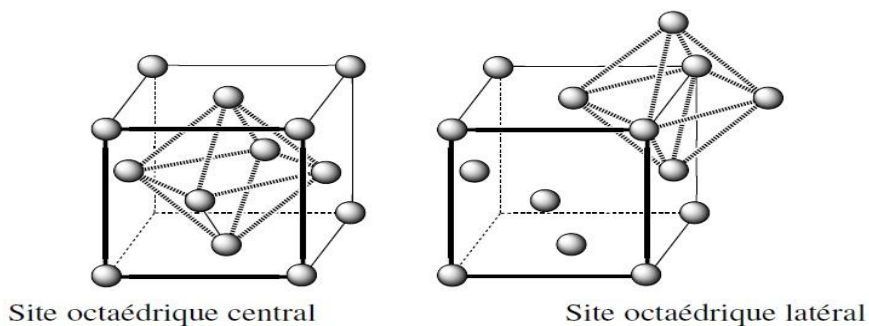


FIGURE 9 : Site octaédrique dans la structure c.f.c.

Le site octaédrique du centre appartient en propre à la maille et ceux des arêtes (12 au total) sont partagés avec les quatre mailles voisines ; ce dénombrement correspond donc à  $1+12/4 = 4$  sites octaédriques par maille.

On appelle habitabilité la valeur maximale du rayon d'une sphère que l'on peut placer au centre de la cavité (octaédrique ou tétraédrique) sans déformer la structure. Le calcul du rayon de cette sphère est réalisé en considérant le carré défini par quatre atomes de l'octaèdre et le rayon d'habitabilité est déterminé à partir du paramètre de maille  $a$ . Le rayon maximal de la sphère qu'il est possible d'insérer au centre de l'octaèdre ( $r_0$ ) est égal à la demi-différence entre le paramètre de maille ( $a$ ) et le diamètre d'un atome ( $2r_{atome}$ ) :

$$r_0 = \frac{a}{2} - r_{atome}$$

Comme les atomes sont tangents selon la diagonale d'une face de la maille,

$$a\sqrt{2} = 4r_{atome}$$

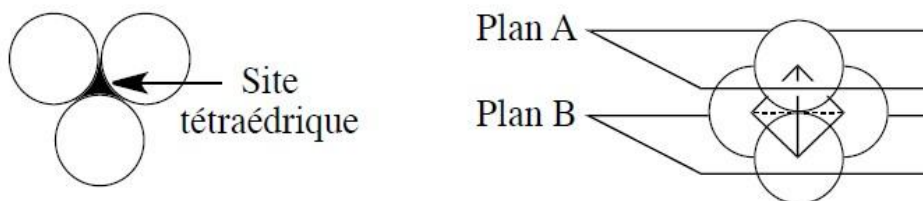
ce qui conduit à :

$$r_0 = \frac{2}{\sqrt{2}}r_{atome} - r_{atome}$$

Avec  $r_0 \approx 0,414 r_{atome}$

### III.1.1 Site tétraédrique :

Les sites tétraédriques (T) correspondent au volume disponible entre trois atomes d'un plan A formant un triangle et un atome d'un plan B voisin accolé aux trois atomes du plan A :



**FIGURE 10 : Site tétraédrique**

La structure c.f.c. possède huit sites tétraédriques par maille. Au sein d'une maille, les sites tétraédriques sont positionnés au centre des tétraèdres définis par l'atome d'un sommet de la maille (atome d'un plan A) et les trois atomes contigus placés au centre des faces passant par ce sommet (atomes d'un plan B).

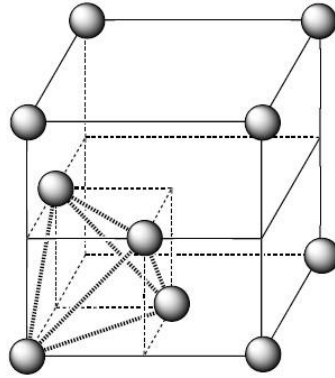


FIGURE 11 : Site tétraédrique dans la structure c.f.c.

Ces positions correspondent aux centres des huit cubes d'arête  $a/2$ . Tous ces sites appartiennent en propre à la maille, il n'existe pas de site tétraédrique partagé entre des mailles contiguës. L'habitabilité de ces sites s'effectue en considérant le tétraèdre défini par les quatre atomes :

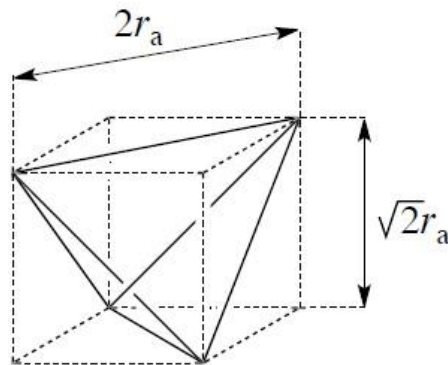


FIGURE 12 : Calcul du rayon maximal d'insertion dans un site tétraédrique

Le rayon d'habitabilité des sites tétraédriques de la structure c.f.c. est calculé de la manière suivante : le site tétraédrique est inscrit dans un cube d'arête  $a/2$ , telle que :  $a \frac{\sqrt{2}}{2} = 2 r_{atome}$  puisque les atomes sont tangents selon la diagonale d'une face de ce cube. Le carré de la

diagonale de ce cube vaut :  $\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(a \frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2$ .

La demi-diagonale du cube est la somme du rayon de l'atome et du rayon du site tétraédrique

$$: r_t + r_{atome} = a \frac{\sqrt{3}}{4}$$

D'après la relation entre  $a$  et  $r_{atome}$ ,  $a = 2\sqrt{2}r_{atome}$ , le rayon d'habitabilité est :

$$r_t = \left( \frac{\sqrt{3}}{2} - 1 \right) r_{\text{atome}} \approx 0.225 r_{\text{atome}}$$

### III.1.2 Site tétraédrique :

Les sites tétraédriques pour les structures compactes, ont une habitabilité plus faible que les sites octaédriques. Les sites tétraédriques de la structure c.f.c. sont disposés tout autour du site octaédrique central. La position relative des différents sites dans la structure est résumée sur la figure 30.

Une règle simple pour le dénombrement des sites est la suivante : la maille d'un assemblage compact contient un nombre de sites octaédriques égal au nombre d'atomes de la maille et un nombre de sites tétraédriques égal au double du nombre d'atomes de la maille.

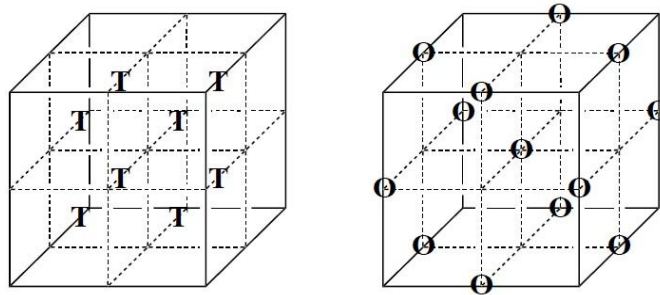


FIGURE 13 : Positions des sites tétraédriques et octaédriques dans la structure c.f.c.

### III. 2 LES SOLUTIONS SOLIDES DE SUSTITUTION :

Dans ces solutions les atomes étrangers B occupent une fraction des sites réticulaires à la place des atomes de base A. La structure cristalline n est pas modifiées mais en général le paramètre varie avec la concentration.

Les atomes de A et de B peuvent être répartis au hasard sur les divers sites du réseau. Dans certains cas, on observe un ordre plus au moins parfait ou une tendance des atomes de même espèce à se regrouper. ils forment alors une solution solide ordonnée.

Peu de métaux sont miscibles en toutes proportions. Pour qu'il en soit ainsi, il faut que :

- A et B purs aient la même structure cristalline ;
- Que les atomes de A et de B aient des dimensions atomiques voisines ;

Exemple : Ag et Au ( C.f.C ), Mo et W ( C.C ) sont très solubles.

Par contre, le molybdène n a qu'une solubilité limitée dans l'argent. La différence des rayons atomiques n est que de 6%, mais leur structure est différente. Ces conditions ne sont pas

suffisantes. Le cuivre, l'Or et l'Argent sont complètement miscible, ils ont une structure cubique à faces centrées et des dimensions atomiques voisines. Cependant le cuivre et l'argent ne sont pas entièrement miscibles.

Actuellement les théories ne sont pas en mesure de prévoir exactement les solubilités des différents éléments. On ne dispose que de règles empiriques qui semblent être des conditions nécessaires mais non suffisantes.

### IV Définition du défaut dans les matériaux :

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**.

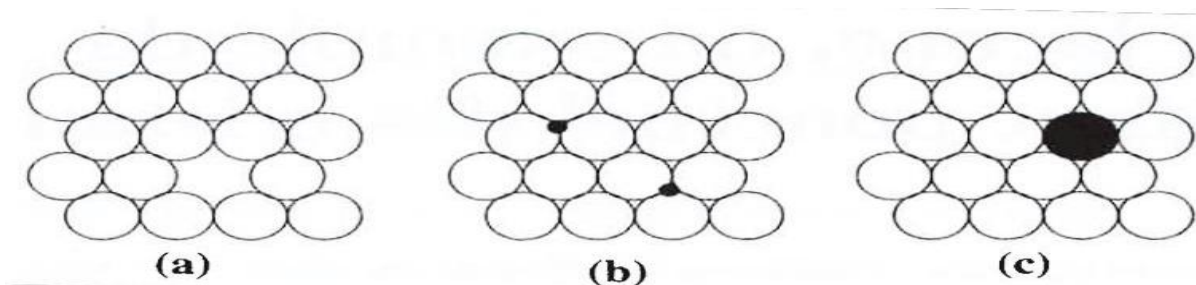
#### IV.1 Classification des défauts :

##### IV.1.1 Défauts ponctuels :

Les défauts ponctuels se traduisent par une perturbation de l'ordre cristallin sur des dimensions limitées à une maille cristallographique typiquement :

- Les lacunes correspondent à un vide laissé dans la structure sur un site normalement occupé par un atome (Figure 11.a).
- Les atomes interstitiels sont des atomes en surnombre dans une structure ou bien des impuretés placés sur des sites normalement vides (Figure 11.b).

Dans le cas où un atome occupe un site normalement occupé par un atome de nature chimique différente, on parle d'impureté substitutionnelle (Figure 11.c).



**Figure 14 : Représentation des défauts ponctuels. (a) Lacune. (b) Atome en position interstitielle. (c) Atome en position substitutionnelle.**

### IV.1.2 Défauts linéaires :

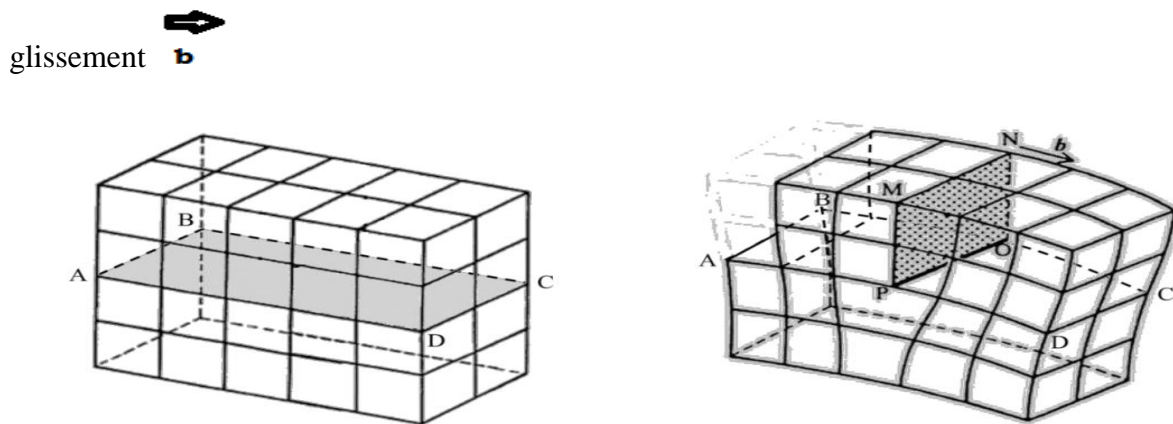
Les défauts linéaires observés dans les cristaux sont appelés dislocations (Figure 12). Les dislocations sont obtenues par le glissement  $\mathbf{b}$  d'une partie du cristal le long d'un plan. La ligne de dislocation proprement dite correspond à la ligne du plan de glissement séparant la partie du cristal qui a glissé de celle qui est restée immobile. Le vecteur de glissement  $\mathbf{b}$  est appelé vecteur de Burgers de la dislocation.

On distingue les dislocations **coin**, pour lesquelles  $\mathbf{b}$  est perpendiculaire à la ligne de dislocation, et les dislocations **vis**, pour lesquelles  $\mathbf{b}$  est parallèle à la ligne de dislocation. Les autres dislocations sont dites mixtes.

#### IV.1.2.1 Les différents types de défauts linéaires

##### a. Dislocation coin

La Figure (13) montre la formation d'une dislocation de type coin par le glissement  $\mathbf{b}$  d'une partie d'un cristal cubique simple le long d'un plan (ABCD). La ligne de dislocation coin (PO) s'étend à l'infini dans le plan de glissement, dans une direction perpendiculaire à la direction de

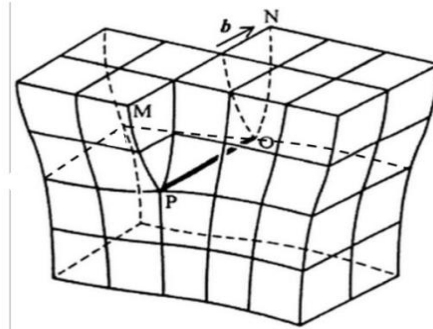
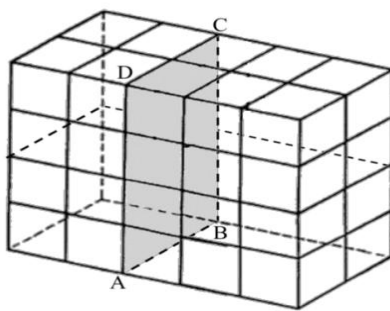


**Figure 15** : Formation d'une dislocation coin (OP) dans le plan de glissement ABCD. La portion de cristal située au-dessus du plan de glissement et à gauche de la ligne de dislocation (OP) subit un glissement  $\mathbf{b}$  par rapport au cristal situé en-dessous. Une dislocation est dite « **coin** » lorsque le vecteur de glissement  $\mathbf{b}$  impliqué dans sa formation lui est perpendiculaire

La dislocation coin peut également être décrite comme faisant suite à l'insertion d'un demi-plan supplémentaire après écartement de deux plans atomiques adjacents. La ligne de dislocation coïncide avec l'extrémité de ce demi-plan supplémentaire.

**b Dislocation vis :**

La Figure (14) montre la formation d'une dislocation de type vis par le glissement  $b$  d'une partie d'un cristal cubique simple le long d'un plan (ABCD). La ligne de dislocation vis (PO) marque la limite entre la région du cristal qui a glissé et celle qui n'a pas glissé. Celle-ci s'étend à l'infini dans le plan de glissement, dans une direction parallèle à la direction de glissement



**Figure 16 :** Formation d'une dislocation vis (**OP**) dans le plan de glissement **ABCD**. La portion de cristal située à droite du plan de glissement et au-dessus de la ligne de dislocation (**OP**) subit un glissement  $b$  par rapport au cristal situé en-dessous.

La dislocation vis peut se produire lorsqu'on fait une coupure plane à travers le cristal, et l'on fait glisser l'un des bords obtenus par rapport à l'autre à une distance interatomique. La ligne de dislocation vis correspond alors au fond de la coupure. Une dislocation vis transforme les plans successifs d'atomes en surfaces hélicoïdales, d'où son nom.

**c. Dislocations mixtes :**

Une dislocation n'est en général pas rectiligne. La Figure (15) schématise une ligne de dislocation courbe ( $VC$ ) séparant les parties immobiles et celles qui ont subi le glissement  $b$  sur le plan défini par les points  $V$ ,  $M$  et  $C$  d'un cristal.

La portion de l'arc ( $VC$ ) perpendiculaire à  $b$ , autour du point  $C$ , a un caractère de dislocation coin. La portion de la dislocation parallèle à  $b$ , autour du point  $V$ , est de type vis. La portion restante de l'arc ( $VC$ ) constitue une portion de dislocation de type mixte.

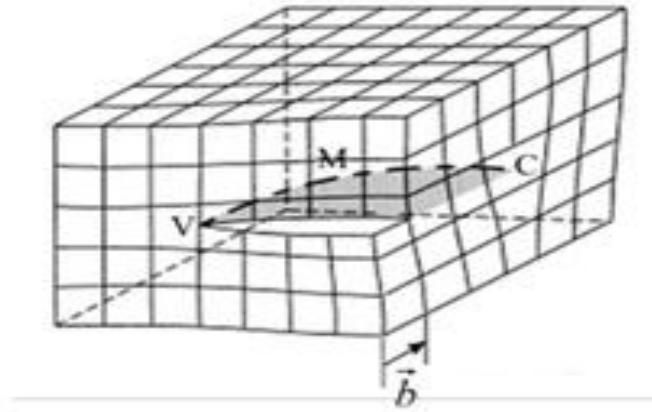


Figure 17 : Dislocation Mixte

### IV.1.3 Défauts planaires

#### IV. 3.1 Définition d'un défaut surfacique :

Les défauts surfaciques sont des défauts à deux dimensions comprenant les joints de grains, les joints de macles, les sous-joints et les parois d'antiphase. Nous nous limitons aux joints de grains et aux macles.

##### a. La macle

Une macle est une association orientée de deux ou plusieurs cristaux identiques, dits individus, reliés par une opération de groupe ponctuel de symétrie.

##### b. Joint de macle.

Il peut exister des plans cristallographiques particuliers autorisant le cristal à se disposer indifféremment dans le prolongement de son orientation initiale « cristal-mère » ou en position symétrique par rapport à ce plan particulier (« cristal maclé »); ceci suppose que les niveaux d'énergie des atomes en position initiale et en position symétrique soient identiques. Les joints de macle sont aisément reconnaissables à leur tracé rectiligne.

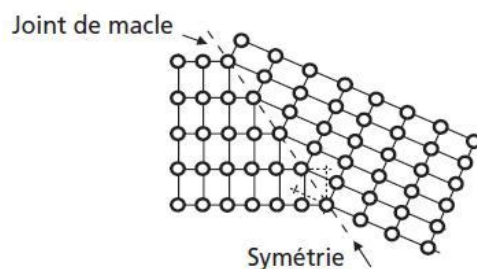


Figure 18 : Schématisation d'un joint de macle.

**c. Les joints de grains**

Un joint de grains est, par définition, la surface qui sépare deux cristaux d'orientations différentes dans un agrégat poly cristallin

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

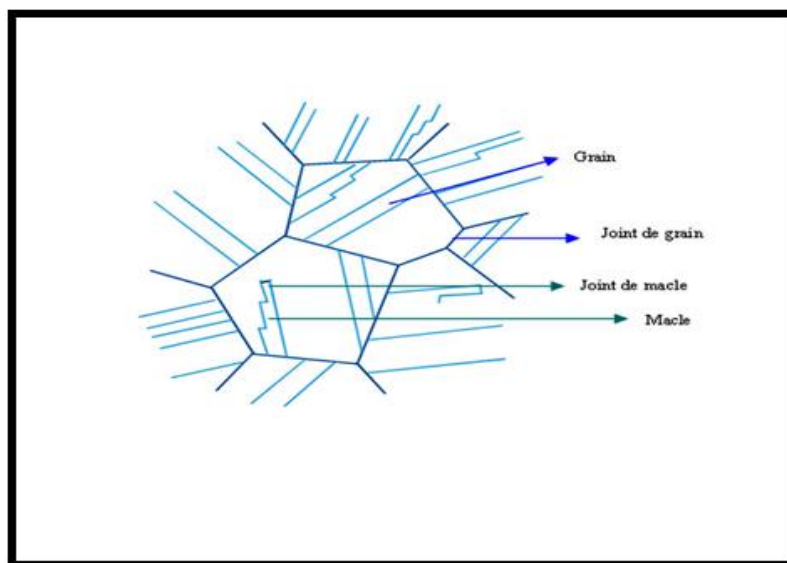


Figure 19 : Structure des joints de grains

**d. Défauts volumiques :**

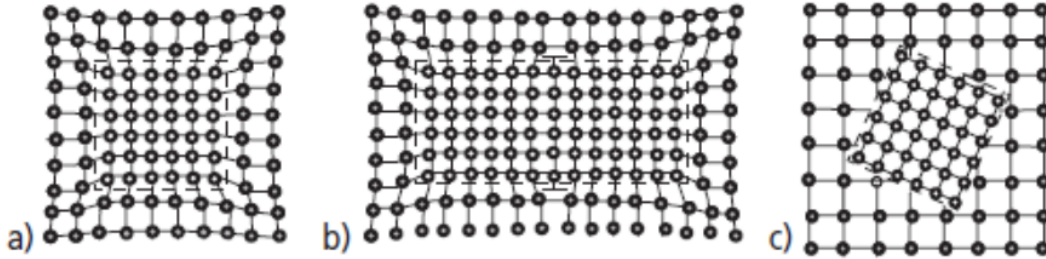
Définition : Un défaut volumique est un défaut à trois dimensions. Lorsque une partie du cristal est remplacée par un volume d'un composé différent, la différence est de nature chimique et peut ou non être accompagnée de différences cristallographiques. La partie étrangère du cristal peut être un précipité, une inclusion, un pore.

Un pore est une cavité fermée à l'intérieur d'un cristal ou d'un poly-cristal.

**Pore :** Cavité fermée à l'intérieur d'un cristal ou d'un poly-cristal.

**Inclusion :** Particule d'un solide de nature différente enrobée dans le solide principale ou matrice.

**Précipité** : Particule solide de petite taille entièrement enrobée à l'intérieur d'un grain qui constitue sa matrice.



**a ) Précipité cohérent ( continuité de certains plans cristallins entre précipité et la matrice.**

**b) Précipité semi cohérent : Les déformations sont relaxées par la présence de dislocations aux interfaces**

**c) précipité incohérent**

Figure 20 : Schématisation des défauts volumiques.

Qu'est-ce qu'un matériau ?

**II.1 Définition** : Un matériau ( naturel ou artificiel ) désigne toute matière utilisée pour réaliser un objet au sens large. Ce dernier est souvent une pièce d'un sous-ensemble. C'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique.

Il peut être:

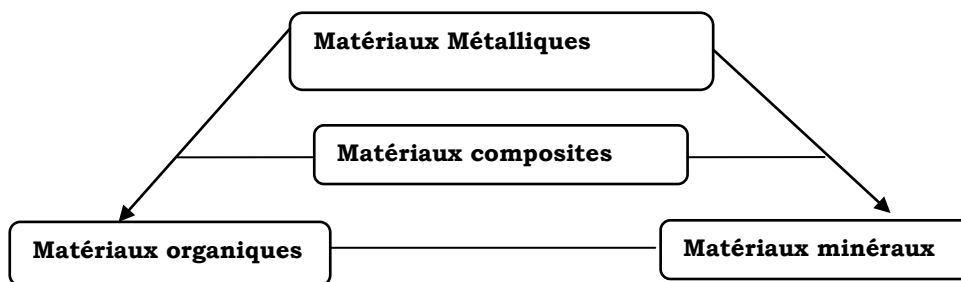
➤ **D'origines naturelles comme :**

- ✚ les minéraux : ils sont extraits du sol (eau, terre, sable...)
- ✚ les organiques d'origine végétale (bois, coton, lin...)
- ✚ les organiques d'origine animale (laine, viande, lait, corne...)

➤ **D'origines artificielles** : C'est ce qu'on appelle les matériaux de synthèse.

- ✚ les métaux que l'on extrait à partir des minéraux (cuivre, zinc, argent, aluminium, plomb...)
- ✚ les alliages qui sont des mélanges de plusieurs métaux (bronze, laiton, zamac...)
- ✚ les plastiques que l'on crée à partir d'éléments naturels comme le bois, le charbon , le pétrole et les polymères telle que (PVC, caoutchouc, polystyrène, ...etc ).

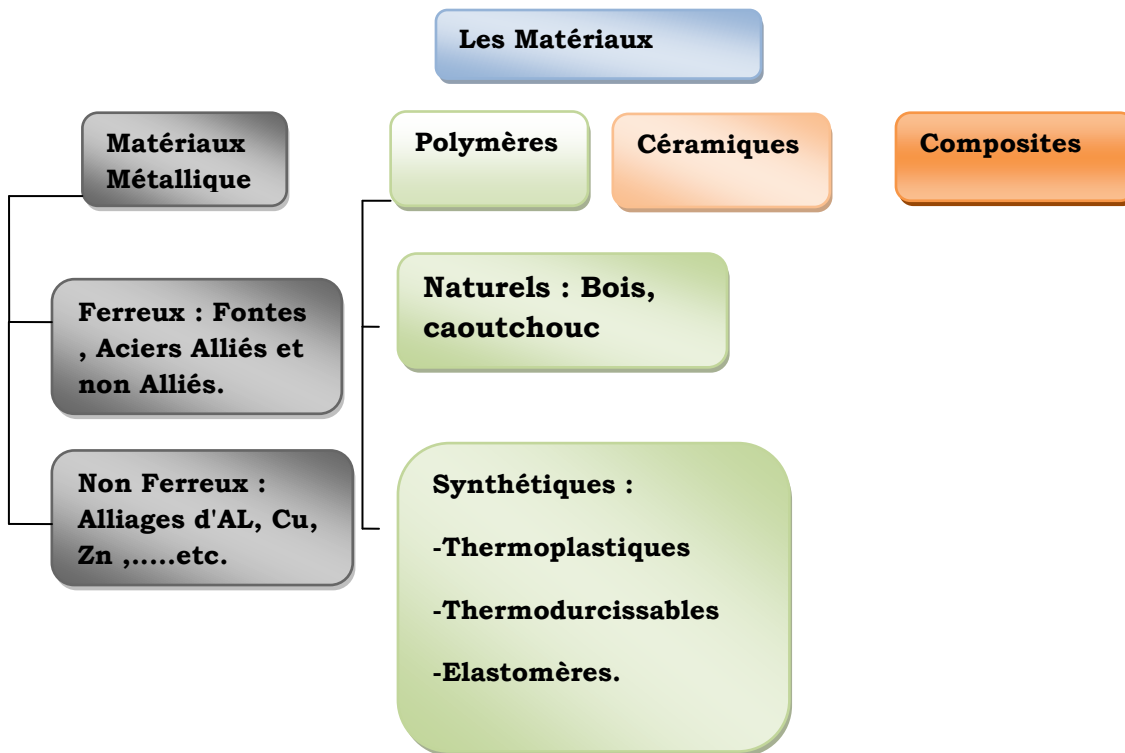
Une famille de matériaux est un ensemble de matériaux regroupés en fonction de leurs différentes propriétés. Ces matériaux peuvent être regroupés en grandes classes selon l'organigramme suivant :



**Figure II.1 : Les grandes familles de matériaux**

**II.2 Rappel sur les grandes familles des matériaux** : Dans la science des matériaux, selon la composition et la structure, les matériaux sont classés comme suit :

- Métaux et alliages
- Polymères
- Céramiques.



**Figure II.2 : Les grandes classes de matériaux utilisés par les spécialistes en Matériaux**

### **II.3 Désignation normalisée des métaux**

Le choix d'une nuance est le résultat d'un compromis entre des exigences souvent contradictoires : dureté, résilience, ténacité, ductilité, aptitude à la mise en forme, etc. Cette base documentaire permettra aux spécialistes des matériaux de sélectionner une nuance d'un matériau répondant à un usage défini. Donc, Il est indispensable de savoir classifier les métaux et alliages suivant leurs désignations normalisées.

#### **II.3.1 Aciers non alliés :**

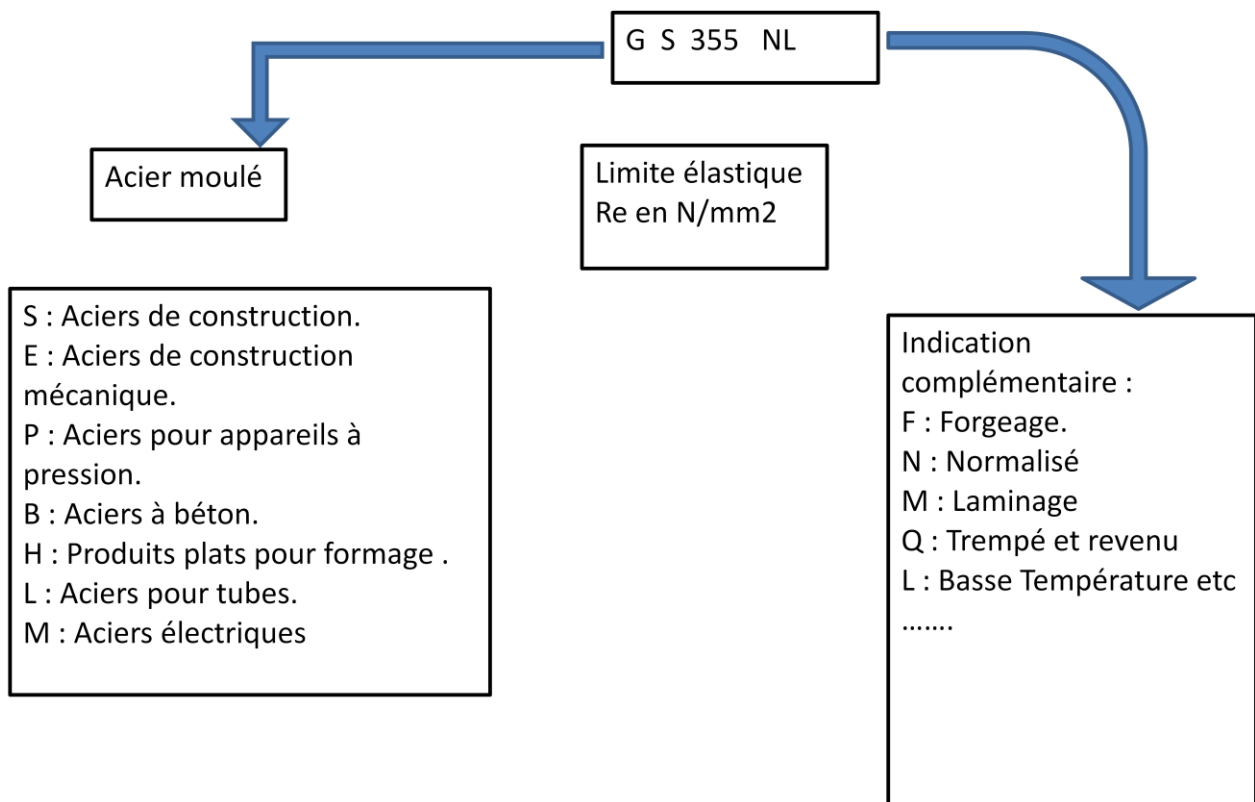
##### **II.3.1.1 Aciers non alliés d'usage général (S, E, etc.) :**

Cette catégorie est caractérisée par une faible teneur en carbone, ce sont les plus utilisés. Ils existent dans des qualités diverses (JR, JO, J2, K2...) et des variantes réservées à des usages particuliers

(moulage, soudage...). La plupart sont disponibles sous forme de laminés marchands (Profilés, poutrelles, barres, tôles...) aux dimensions normalisées. Certains sont proposés en semi – fini : pré laqués, galvanisés, nervurés, ondulés etc...

**Applications :** (Construction soudée, formage à froid ou à chaud, emboutissage, étirage, laminage, pliage...) : carrosseries, fers, et profilés pour le bâtiment, construction navale, plate-forme pétrolière, trains chaudronnerie, ameublement, électroménager.

**Exemple :** GE 335, GS 235.



**Figure II.3 : Désignation normalisée des aciers ordinaires**

**Remarques :** les valeurs de Rr, Re, A% et Kv indiquées varient d'une qualité à l'autre, dépendent des procédés de fabrication, des traitements, des épaisseurs d'un produit à l'autre.

### II.3.1.2 Aciers spéciaux, non alliés, de type C :

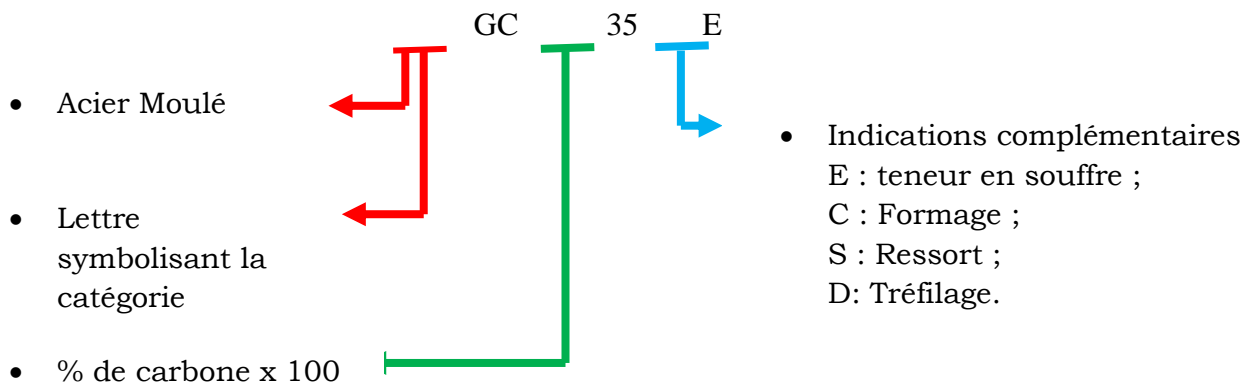
**Applications :** ce type d'acier est destinés aux traitements thermiques (trempe, cémentation) des pièces petites ou moyennes, ils sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition chimique, une plus grande pureté et des éléments d'addition en très faible quantité (Mn < 1% ; Cr+Ni+Mo < 0,63%).

**Désignation** : La désignation comprend la lettre C suivi du pourcentage de carbone multiplié par 100 plus au besoin des indications complémentaires (E : teneur en soufre, C : formage à froid, S : ressort, D : tréfilage...).

**Exemple** : GC35 E : 0,35 % de carbone, G = acier moulé, E = teneur maxi en soufre.

**II.4 Aciers au carbone non alliés** : sont caractérisés par une plus grande teneur en carbone, et très faible quantité d'éléments d'addition ( $Mn < 1\%$ ,  $Cr+Mo+Ni < 0,63\%$ ).

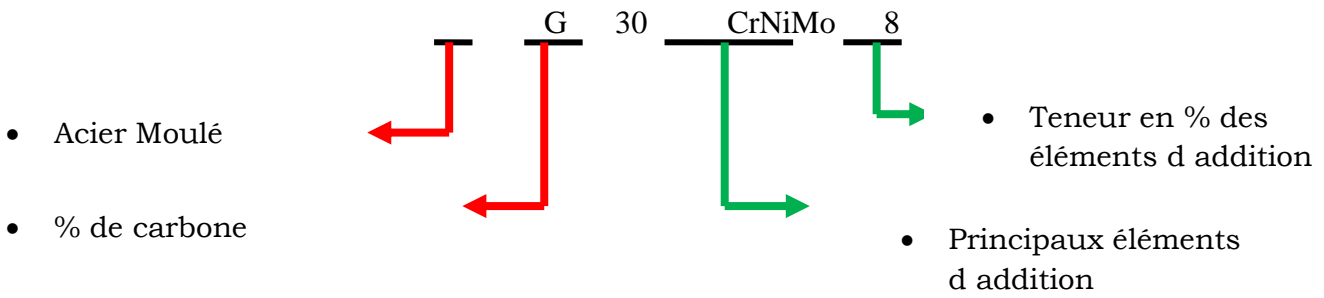
- Utilisation : aciers pour traitements thermiques, pièces petites ou moyennes.
- Désignation : lettre C suivie de la teneur en carbone en pourcentage multipliée par 100 (et précédé de G si moulé).
- Exemple : C40 (contient 0,4% de carbone).



**Figure II.4 : Désignation normalisée des aciers non alliés**

**II.4.1 Aciers faiblement alliés** : aucun élément d'addition ne dépasse 5%

- Utilisation : aciers pour traitements thermiques et hautes résistances...
- Désignation : pourcentage de carbone  $\times 100$ , symbole chimiques des principaux éléments d'addition classés par ordre décroissant et dans le même ordre, pourcentage de ces mêmes éléments (avec multiplicateur selon l'élément).
- Exemple : 30 CrNiMo 8 (acier ayant 0,30% de carbone, 2% de chrome, et moins de 1% de nickel et de molybdène).



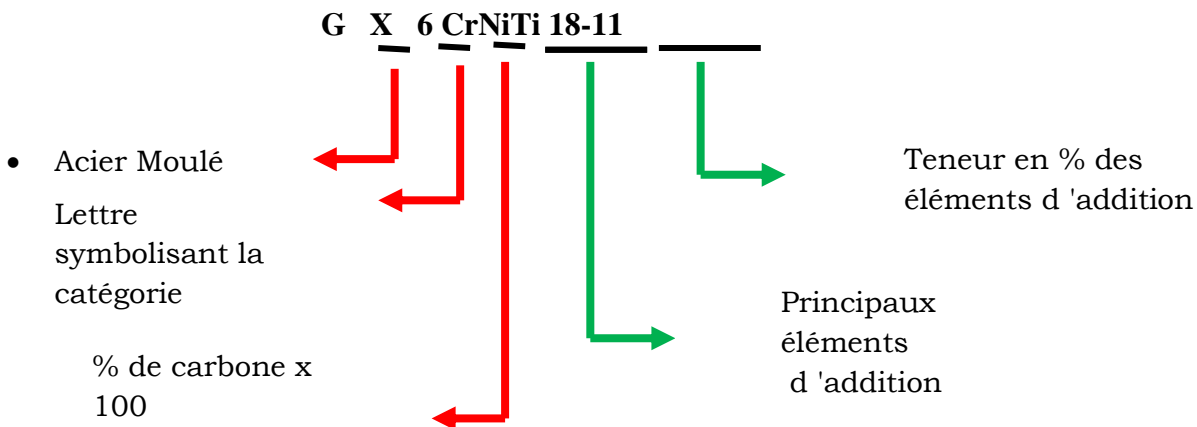
**Figure II.5 : Désignation normalisée des aciers faiblement alliés**

X4	X10	X100	X1000
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	Ce, N, P, S	B

**Figure II.6 : Multiplicateurs pour les éléments d'addition.**

**II.4.2 Aciers fortement alliés** : au moins un élément d'addition dépasse 5% en masse.

- Utilisation : usages particuliers comme les aciers inoxydables, aciers réfractaires, aciers à outils...
- Désignation : lettre X suivie du pourcentage en carbone, symbole chimiques des principaux éléments d'addition classés par ordre décroissant et dans le même ordre, pourcentage de ces mêmes éléments.
- Exemple : X5 CrNiMo 17-12 (acier inoxydable avec 0,05% de carbone, 17% de chrome, 12% de nickel et moins de 1% de molybdène).



**Figure II.7 : Désignation normalisée des aciers fortement alliés**

### Remarque :

Les aciers fortement alliés sont généralement les aciers inoxydables, couramment appelé Inox. cette famille d'aciers joue un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie mécanique, agroalimentaire, ...etc. Les aciers inoxydables peuvent être divisés en trois types : martensitique, ferritique et austénitique. Ils sont utilisés lorsqu'il faut une résistance mécanique importante.

### **II.4.2.1. Types Aciers inoxydables :**

**a) Austénitique :** Cette nuance est caractérisée par une teneur en nickel de plus de 7%, entre 16 et 28% de chrome, et une très faible teneur en carbone, ce qui les rend très résistants à la corrosion, ils ont une bonne malléabilité et soudabilité et excellentes propriétés mécaniques.

**b) Ferritique :** Ces aciers sont essentiellement des alliages de chrome dans une fourchette de 10,5% à 30%, mais à très faible teneur en carbone (0,08% par rapport aux martensitiques), ce qui les rend économiques et avec des propriétés de résistance à la corrosion et de dureté raisonnablement bonnes. De plus, contrairement aux austénitiques, ils sont magnétiques. Certains degrés peuvent contenir du molybdène, du silicium, de l'aluminium, du titane et du niobium qui leur confèrent des caractéristiques différentes

**c) Martensitique :** il a une teneur en carbone élevée ou faible (jusqu'à 1,2%), 12% de chrome et est construit autour du fer type 410. Sa microstructure de martensite tétragonale centrée sur le corps, le rend durcissable par traitement thermique (par refroidissement), apporte dureté et résistance. Il est principalement utilisé pour les outils médicaux (scalpels, rasoirs et pinces internes). La martensite non trempée est de faible dureté et donc cassant.

**d) Duplex :** il a une teneur élevée en chrome (19–32%) et en molybdène (jusqu'à 5%) et une teneur en nickel inférieure à celle des aciers inoxydables austénitiques, ce qui le rend deux fois plus résistant. Sa microstructure mixte offre une résistance améliorée à la fissuration par corrosion sous contrainte de chlorure par rapport aux aciers inoxydables austénitiques types 304 et 316. Cela le rend plus cher.

**e) Durci par précipitation :** ils ont du chrome et du nickel, qui offrent une combinaison optimale des propriétés des aciers inoxydables martensitiques et austénitiques. Avec les premiers, ils partagent leur capacité à obtenir une résistance élevée grâce au traitement thermique, et les seconds ont une grande résistance à la corrosion. Ceci est réalisé après l'addition d'un ou plusieurs des éléments de cuivre, aluminium, titane, niobium et molybdène à une matrice martensitique ou austénitique soumise à un processus de traitement thermique qui conduit à son durcissement.

## Désignation normalisée des aciers et fontes -Chapitre II

Le tableau ci dessous rassemble les principales propriétés des cinq types d'aciers Inox.

Propriétés / type d'acier	Austénitique	Ferritique	Martensitique	Durci par précipitation	Duplex
Résistance à la corrosion	Haute	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Très haute
Soudabilité	Généralement non	Oui	Oui	Oui	Oui
Résistance aux hautes températures	Très bonne	Basse	Basse	Haute	Haute
Résistance aux basses températures	Très haute	Haute	Basse	Basse	Basse
Ductilité	Très élevée	Moyenne	Basse	Moyenne	Moyenne
Rythme de durcissement	Très élevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Durcissable	À froid	Non	Par trempage et refroidissement	Par vieillissement	Non

**Tableau I. : Les principales propriétés des cinq types d'Inox**

**II.5 Fontes :** La fonte est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Eventuellement une fonte contient d'autres éléments introduits volontairement ou non. Leur grande coulabilité permet d'obtenir des pièces de fonderie aux formes complexes.

Elles sont en général :

- Assez fragiles ;
- Peu ductiles (inadaptées aux déformations à froid : forgeage, laminage...);
- Difficilement soudables.

Les fontes se divisent en deux groupes selon leur mode d'élaboration, suivant l'état d'existence du carbone sous forme de cémentite ou de graphite.

**II.5.1 Fonte à graphite lamellaire EN-GJL (ex FGL) :**

Cette catégorie est la plus économique, la plus utilisée, c'est la fonte de moulage par excellence. Le carbone se présente sous forme de fines lamelles de graphite qui lui donne une couleur « grise ».

**Propriétés :** bonne coulabilité, bonne usinabilité, grande résistance en compression et grande capacités d'amortissement des vibrations

**Applications :** Bâtis de machines, supports carters, blocs moteurs...

**II.5.2 Fontes à graphite sphéroïdale EN-GJS (ex FGS) :**

Ce type de fonte est le plus utilisé après les fontes à graphite lamellaire, obtenue par addition de petites quantités de magnésium juste avant moulage, le graphite s'agglomère pendant le traitement sous forme de nodules ou sphères d'où le nom sphéroïdale.

**Propriétés :** Ductilité, résilience et bonne usinabilité.

**Applications :** Vilebrequins, arbres de transmission, pièces de voitures, tuyauteries...etc.

**II.5.3 Fontes malléables : EN-GJMW et GJMB (ex FMB et FMN) :**

Cette nuance est obtenue par malléabilisation de la fonte blanche et a des propriétés mécaniques voisines de celles de l'acier. Elles peut être moulé en faibles épaisseurs et est facilement usinable.

**Applications:** Carters, boîtiers...etc.

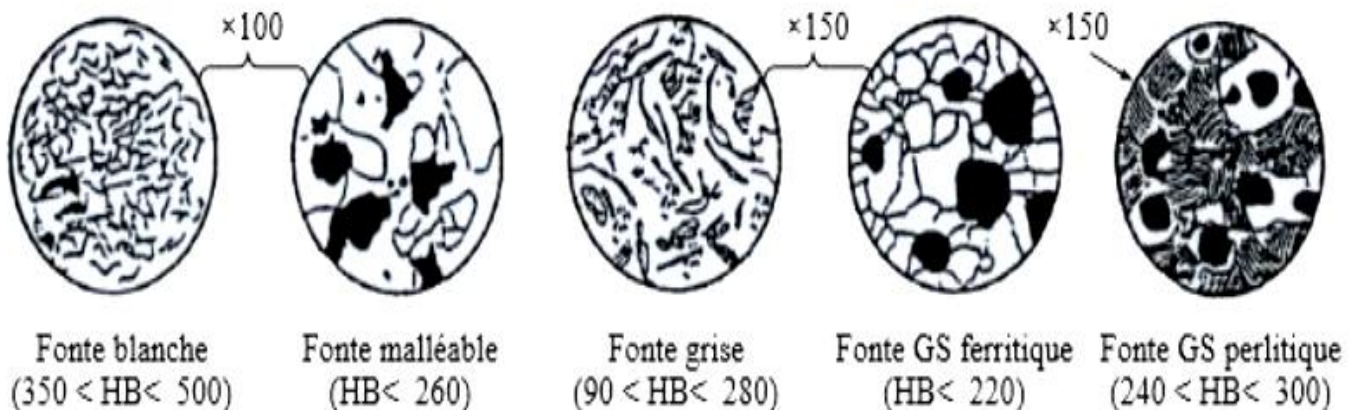
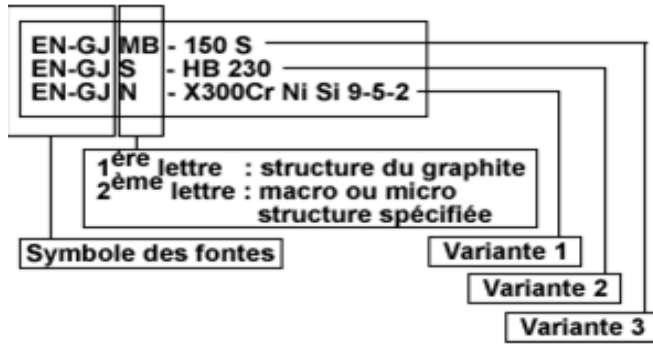


Figure II.8 : Microstructures des différents types de Fontes

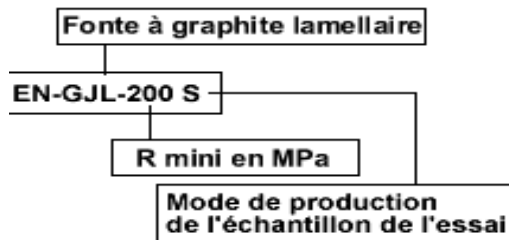
**II. 5.4 Désignation des fontes : (NF EN 1580)**



Lettres en option pour la désignation des fontes. Elles suivent EN-GJ				
Première lettre Structure du graphite		Ancienne désignation	Seconde lettre macro ou microstructure spécifiée	
<b>L</b>	lamellaire	<b>FGL</b>	<b>A</b>	austénitique
<b>S</b>	sphéroïdale	<b>FGS</b>	<b>F</b>	ferritique
<b>M</b>	graphite de recuit (malléable)	<b>FBC</b>	<b>P</b>	perlitique
<b>V</b>	vermiculaire	<b>FBV</b>	<b>L</b>	lédeburique
<b>Y</b>	structure spéciale		<b>Q</b>	état trempé
<b>N</b>	absence de graphite		<b>T</b>	état trempé et revenu
			<b>B</b>	malléable à cœur noir
			<b>W</b>	malléable à cœur blanc

**II.5.4.1 Fonte à graphite lamellaire (variante 1) (NF EN 1560)**

Les fontes peuvent être classées selon les caractéristiques mécaniques comme suit :



Mode de préparation de l'échantillon	
<b>S</b>	Echantillon coulé séparément
<b>U</b>	Echantillon attenant
<b>C</b>	Echantillon prélevé sur une pièce

D'autres indications peuvent être ajoutées après un tiret :

- Allongement minimal exigé en %. Ex : EN-GJS-350-22C;

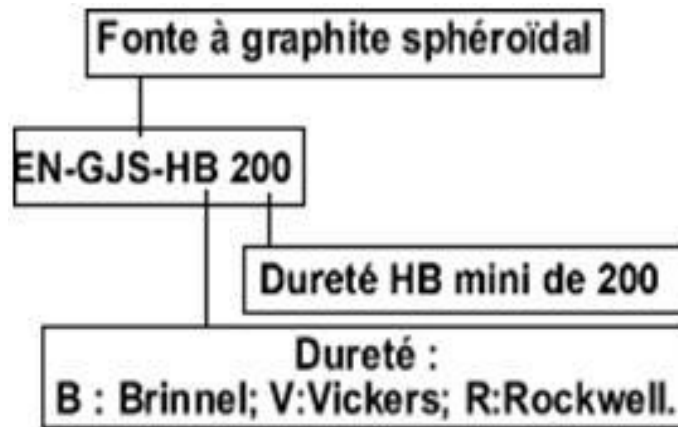
- La résilience minimale exigée. Ex : EN GJS-400-18U-RT.

Avec :

RT : essai effectué à température ambiante.

LT : essai effectué à basse température.

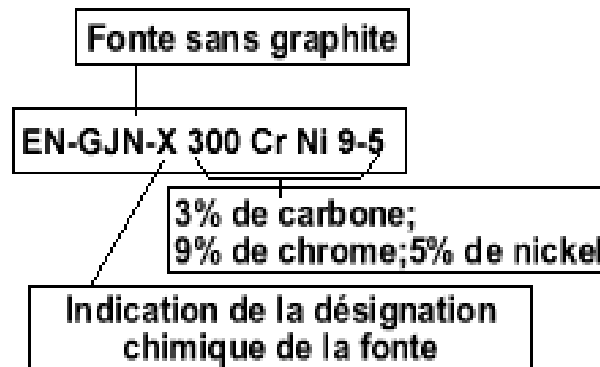
#### II.5.4.2 Fonte à graphite sphéroïdal (variante 2) (NF EN 1560)



Selon les types de dureté, cette catégorie est classée comme suit :

- EN-GJS-HB 230 ; ( HB : Brinell )
- EN-GJL-HV 190 ; ( HV : Vickers )
- EN-GJMW-HC 30 ; ( HC : Rockwell )

#### II.5.4.3 Fonte sans graphite (variante 3) (NF EN 1560)



La désignation peut se faire sans indication de carbone.

**Exemple** : EN-GJL-XNiMn13-7.

Ou avec indication de carbone, dans ce cas le % de carbone indiqué est multiplié par 100.Ex : EN-

### **GJN-X300CrNiSi9-5-2.**

Les éléments d'addition sont représentés par les symboles chimiques et sont classés par ordre de grandeur décroissant. Leur teneurs sont indiquée en % et arrondie au nombre le plus proche.

### III.1 Généralités :

Un métal pur se solidifie à température constante contrairement à un alliage. En effet la solidification débute à une température  $T_1$  et termine à une température  $T_2 < T_1$ , la solidification a lieu dans un intervalle de  $T^\circ$ . Les lieux géométriques des températures  $T_1$  et  $T_2$  sont appelés respectivement "Liquidus" ( $T_1$ ) et "Solidus" ( $T_2$ ).

Au dessus du liquidus, l'alliage est liquide, au dessous du solidus l'alliage est solide. Entre le liquidus et le solidus, l'alliage est biphasé (Solide + Liquide).

### III.2 Définitions :

**A) Phase** : une phase est une région ou un ensemble de régions d'un corps caractérisé par une structure et par un arrangement atomique identique, c'est une partie homogène d'un corps.

#### **B) loi des phases ( Loi de Gibbs )**

La variance d'un système en équilibre est donnée par:

$$V = n + 2 - \Phi$$

Avec :

- $n$  correspond au nombre de corps purs constituant l'alliage
- $\Phi$  correspond au nombre de phases dans l'alliage
- $2$  correspond aux deux paramètres Pression  $P$  et température  $T$

**Remarque** : pour une transformation isobare (à pression constante), il y a que la température et donc la loi des phases devient :

$$V = n + 1 - \Phi$$

Dans le cas d'un système binaire ( $C = 2$ ) le nombre des variables est égal à  $(3 - \Phi)$ , donc on peut distinguer trois cas de figure possibles et qui sont les suivants :

1)  $\Phi = 1$  : il y a une seule phase et sa composition chimique est celle de l'alliage donc la température et la composition sont deux variables indépendantes (le système est bivariant).

2)  $\Phi = 2$  : il y a deux phases en équilibre les trois variables  $x_1$ ,  $x_2$  et  $T$  sont fixés dès que l'une des trois variables est imposées (le système est monovariant).  $x_1$ ,  $x_2$  : désignent respectivement la composition chimique des phases  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ .

3)  $\Phi = 3$  : Il y a trois phases en équilibre, le système est invariant ( $v = 0$ ).

L'équilibre entre les trois phases a lieu à une température bien déterminée et pour une composition chimique fixés.

**Exemple :** Soit un système composé par deux phases solides (Fe et FeO), et une phase gazeuse composée par un mélange de CO et CO<sub>2</sub> la variance dans ce cas sera:

$$\Phi = 3 : 2 \text{ phases solides et une phase gazeuse}$$

$$n = 3 : \text{Le Fer, le carbone et l'oxygène à pression constante } V = 3 - 3 + 1 = 1$$

### III.3 Alliage binaire constitué de deux phases en équilibre

#### III.3.1 Règle de l'horizontale:

Soit deux métaux M et N de concentration M% et placés à  $T^\circ = T$ , la règle de l'horizontale permet de déterminer (compte tenu de c et T) la composition de la phase liquide et la composition de la phase solide. Donc la composition de la phase liquide : a% en M et (100%-a% en N)

et la composition de la phase solide : b% en M et (100%-b% en N).

#### III.3.2 Règle des segments inverses :

La règle des segments inverses, permet de déterminer la proportion de la phase solide et la proportion de la phase liquide ;

**\* proportion de la phase liquide :**

$$L\% = (b - c) / (b - a) = BC / AB \text{ * proportion de la}$$

$$\text{phase solide : } S\% = (c - a) / (b - a) = AC / AB$$

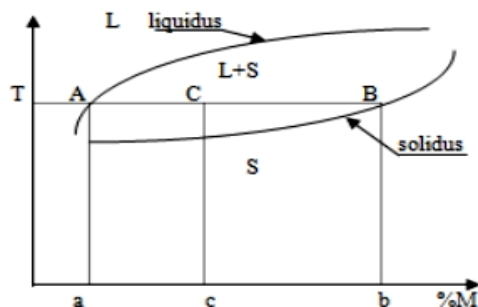


Fig **ment inverse.**

### III.4 Courbes de solidification des métaux et alliages

Les courbes de solidification peuvent se distinguer en trois familles :

#### 1- Courbes de solidification caractérisée par un palier

Lorsqu' un palier isotherme existe, la solidification se fait à une température constante l'analyse chimique montre que le solide qui se dépose et le liquide, conservent la même composition. Un alliage binaire qui se solidifie à température constante est soit un composé chimiquement défini soit un mélange hétérogène particulier appelé alliage eutectique ( courbe a ).

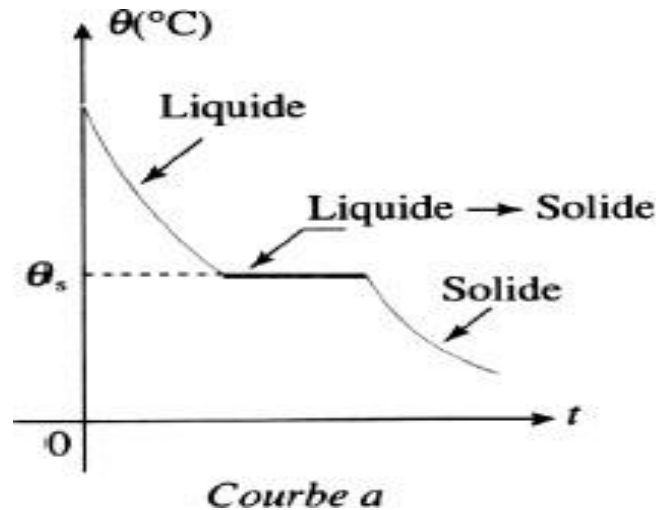


Figure III.2 : Courbe de solidification d'un seul palier

## 2. Courbes de solidification présentant une anomalie simple

Dans ce cas, la solidification se fait à température variable. Elle commence à une température  $\theta_i$  et se termine à une température  $\theta_f$  ( inférieure à  $\theta_i$  ).

Lorsque la courbe de solidification ne présente pas de palier isotherme, l'alliage obtenu est sous forme de mélange homogène solide ou solution solide ( courbe b ).

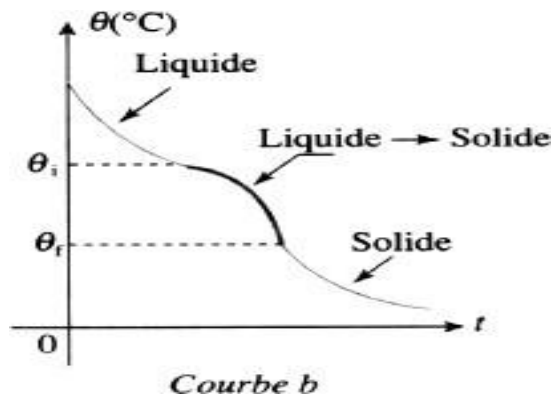


Figure III.3 : Courbes de solidification présentant une anomalie simple

3. Courbes de solidification en présence d'une anomalie simple suivie de palier

La solidification se fait en deux temps. Au début, la température est variable entre  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , puis elle devient constante et égale à  $\theta_2$ . Lorsque la solidification se fait en deux temps, l'alliage obtenu est généralement hétérogène, formé de deux constituants, l'un homogène et l'autre hétérogène ( Courbe C ).

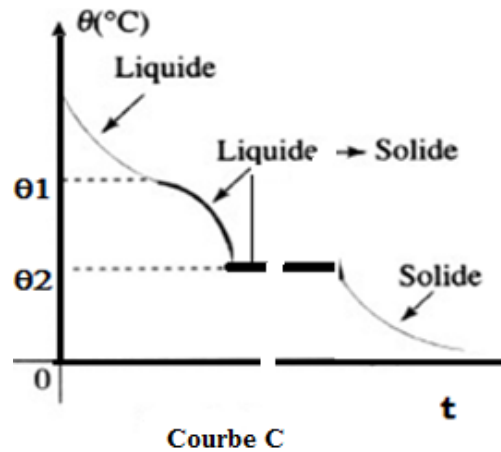


Figure III.4 : Courbe de solidification présentant une anomalie simple suivie d'un palier

III.4.1 Les étapes de construction d'un diagramme d'équilibre

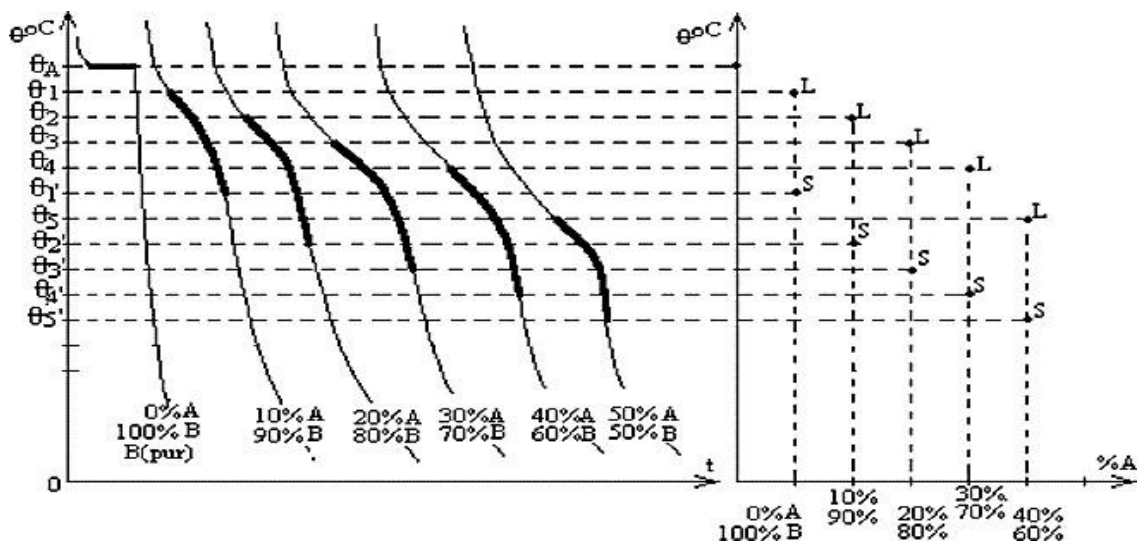
En effet, un alliage ne se solidifie pas comme un métal pur c'est-à-dire à température constante. La solidification peut commencer à une température  $T_1$  et se termine à une température  $T_2$  parfois très inférieure à  $T_1$  et on dit dans ce cas, qu'il y a un intervalle de solidification. pour déterminer cet intervalle, il est recommandé d'utiliser l'analyse par diffraction des rayons X, l'analyse thermique simple ou différentielle (A.T.D). Soit l'alliage de deux métaux (A-B), dont la composition varie de façon continue de 0% au point A et 100% de point B à 100%, de A et 0% de B. On trace la courbe d'analyse thermique de chaque alliage et on marque la température de début de solidification en point L, et la température de fin de solidification en point S.

Ensuite, sur le même graphe on place toutes les courbes d'analyse thermique comme l'indique la figure ci dessous. La jonction de l'ensemble des points L donne naissance à une courbe appelée **LIQUIDUS**. Et celle donnée par les points S s'appelle le **SOLIDUS**. On peut remarquer que :

✚ L'ensemble des liquidus et des solidus forme le diagramme de solidification des alliages

formés par les composants A et B.

- ✚ Tout point du diagramme correspond à un alliage dont la composition est donnée par la projection orthogonale du point sur l'axe des abscisses.
- ✚ Tout point au-dessus du liquidus correspond à un alliage entièrement liquide.
- ✚ Tout point en dessous du solidus correspond à un alliage entièrement solide.
- ✚ Tout point compris entre le liquidus et le solidus correspond à un alliage en cours de solidification c'est-à-dire en partie liquide et en partie solide.



**Figure III.5 : Principe de construction d'un diagramme de phase binaire**

### III.5 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone-Diagramme stable- diagramme métastable.

Ce type de diagramme, constitue la base de toute étude rationnelle des alliages métalliques. L'alliage Fer-carbone se trouve en deux types, l'un contient du carbone libre (graphite) et correspond à un état stable ; l'autre contient de la cémentite et correspond à un état métastable. On doit donc considérer deux diagrammes d'équilibres : diagramme Fer-cémentite et diagramme Fer-graphite

Les différences entre ces deux diagrammes sont les suivantes :

- La teneur en carbone varie de : 0 à 6.67% → diagramme métastable,
- La teneur en carbone varie de : 0 à 100 % → diagramme stable
- La transformation eutectoïde s'effectue : à la température de 727°C pour le diagramme métastable
- La transformation eutectoïde s'effectue : à la température de 738°C pour le diagramme stable

- La transformation eutectique s'effectue à la température de 1148°C pour le diagramme métastable
- La transformation eutectique s'effectue à la température de 1152°C pour le diagramme stable.

### III.5.1. Variétés allotropiques du fer

Le Fer existe sous deux variétés allotropiques différentes, c'est-à-dire avec deux formes cristallines : CC et CFC.

- À des basses températures et jusqu'à 912°C (A3), ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique centré (CC) : On l'appelle alors Fer  $\alpha$ . Le fer  $\alpha$  ne dissout pratiquement pas le carbone : 0.02%C au maximum à 723°C, moins de 0.01%C à 300°C.
- À des températures supérieures à 912 °C et jusqu'à 1394°C (A4) le réseau cristallin est du type cubiques à faces centrées (CFC) : on l'appelle Fer  $\gamma$ . Le fer  $\gamma$  dissout facilement le carbone : 0.8%C à 723°C, 2.14%C à 1147°C.
- Au-dessus de 1394°C et jusqu'au point de fusion à 1538°C, le fer retrouve la structure cubique centrée du Fer  $\alpha$  : On l'appelle alors Fer  $\delta$ . Il dissout un peu mieux le carbone que le Fer  $\alpha$  (0.07%C au maximum à 1493°C).
- Jusqu'à 768°C (A2) point de Curie, le fer est ferromagnétique, au-delà il devient paramagnétique. Le caractère ferromagnétique se dit d'une substance qui peut prendre une forte aimantation.

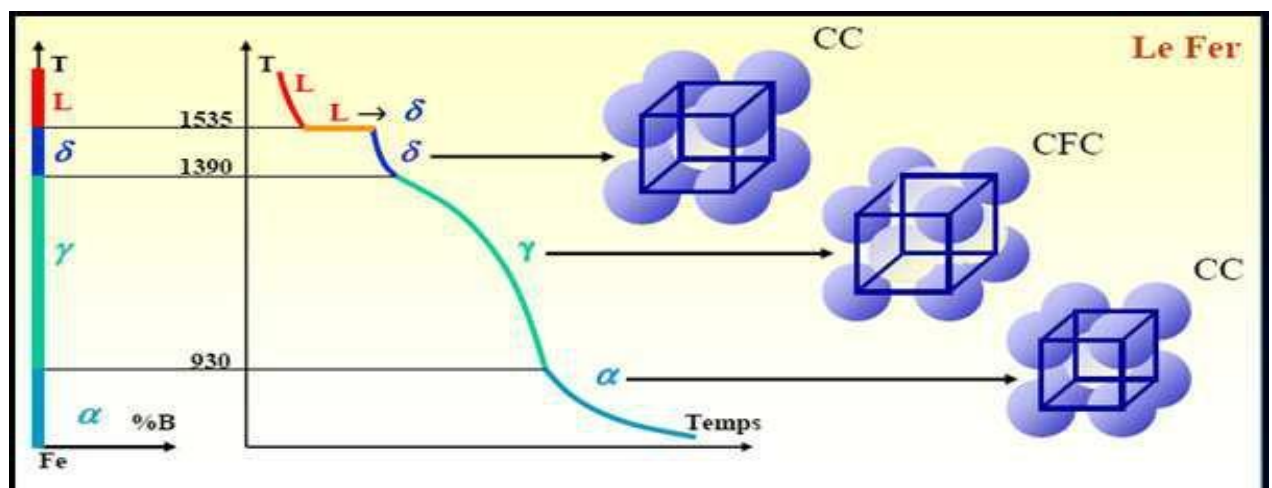


Figure III.6 Transformation allotropique du Fer en fonction de la température

### III.3.2 Les différentes phases du système Fer-Carbone

#### III.3.2.1 La ferrite $\alpha$

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer  $\alpha$ , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre ( $HB \approx 80$ ), peu tenace ( $R \approx 300$  MPa), mais très ductile ( $A \approx 35\%$ ).

#### III.3.2.2 La ferrite $\delta$

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer  $\delta$ . Sa structure est cubique centré CC. Il se forme à la marge  $1394-1538$  °C et renferme 0.11% de carbone.

#### III.3.2.3 L'austénite $\gamma$

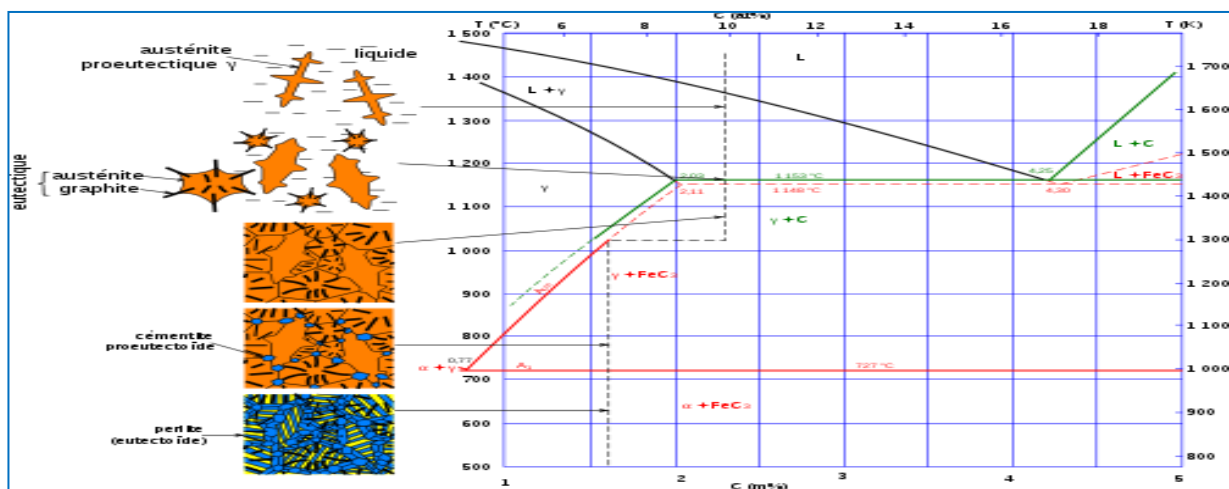
Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer  $\gamma$ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint  $\approx 2\%C$  à  $1145^\circ C$ . Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

#### III.3.2.4 La cémentite (Carbone de fer $Fe_3C$ )

La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile.

#### III.3.2.5 La perlite

Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure ( $HB \approx 200$ ), résistante ( $R_m \approx 850$  MPa) et assez ductile ( $A\% \approx 10$ ).



**Figure III.7 Illustration schématique des principaux constituants du système  $Fe_3-C$ .**

**Les points et courbes importantes dans le diagramme sont :**

## Diagramme de phases binaires -Fe-C. Chapitre III

- **Acm** : Indique la fin de la dissolution après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.
- **A0** : (210°C) précise la température de la transformation magnétique de la cémentite.
- **A1** : Précise la fin de la transformation au refroidissement de l'austénite. L'austénite n'existe plus au-dessous de cette ligne.
- **A2** : (point de Curie  $\approx 768^\circ\text{C}$ ) Précise la température de la perte de magnétisme du Fer  $\alpha$ . en générale ce point ne figure pas sur le diagramme Fer-C.
- **A3** : Précise la fin de la transformation au chauffage de la ferrite en austénite. La ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.
- **A4** : Précise la fin de la transformation au chauffage de l'austénite en ferrite  $\delta$  et/ou liquide. L'austénite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

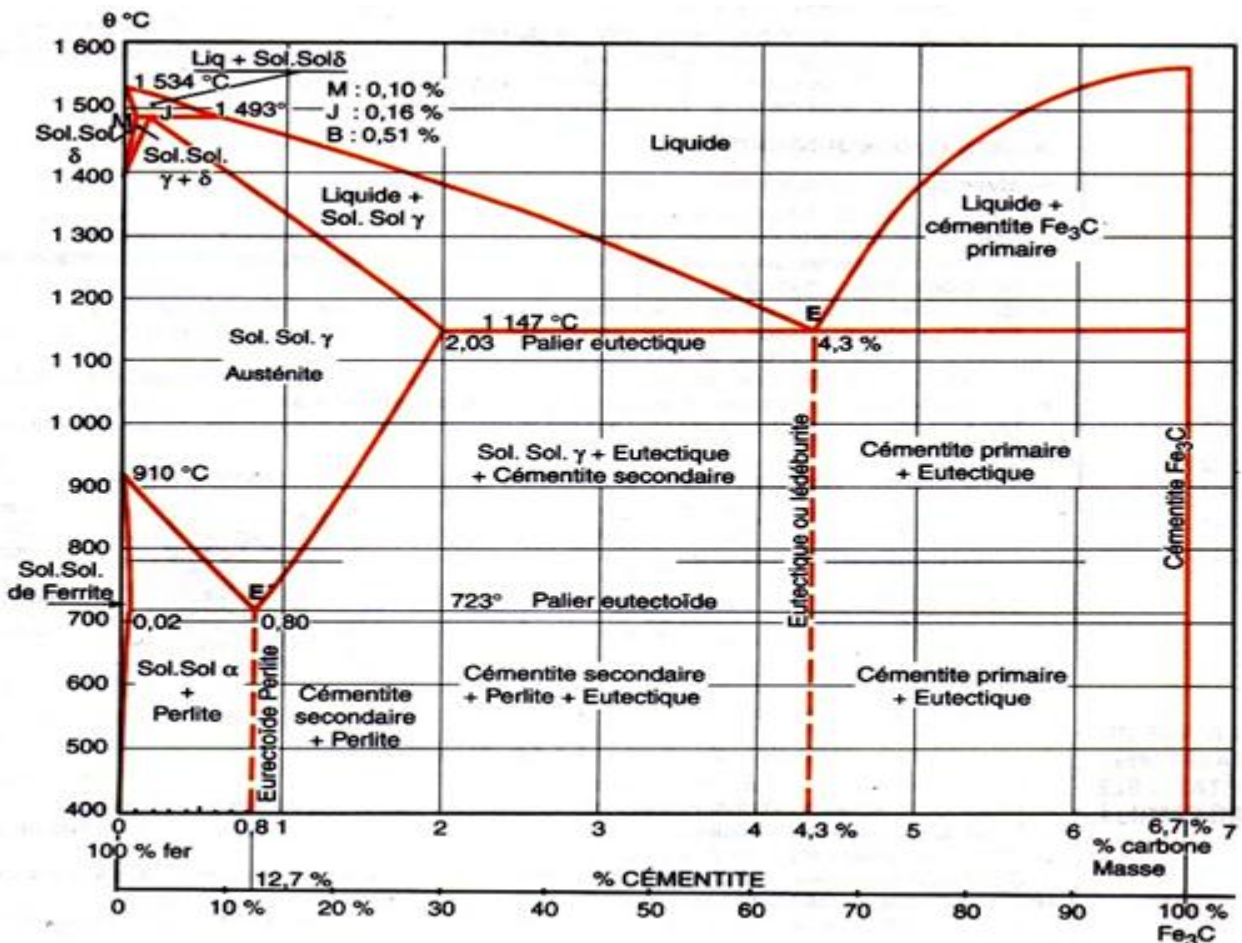


Figure III.8 : Diagramme Fe-C, illustration des principaux points

### III.4.3 Influence des éléments d'addition

La mise en solution solide d'éléments d'alliage dans le fer modifie la position des points A3 et A4 et on a classé les éléments tout en considérant leur influence sur la position de ces points.

### III.4.3.1 . Éléments Alphagènes : Cr, Mo, Ti, W, V, Nb, Si, B, S

On appelle  $\alpha$ -gènes tout élément qui stabilise la phase CC, il élève la température du point A3 et abaisse celle du point A4.

### III.4.3.2 Éléments gammagènes : Mn, Ni,

On appelle  $\gamma$ -gènes tout élément qui stabilise la phase CFC, il abaisse la température du point A3 et élève celle du point A4.

### III.4.3.3 Éléments qui forment des carbures : W, Mo, V, Ti, Nb

Se substituent en partie au fer dans  $Fe_3C$  ce qui améliore nettement la résistance à l'usure.

## III.5 Constituants de l'acier et la Fonte :

Le diagramme fer-cémentite, permet de définir les aciers et les fontes suivant leur teneur en carbone comme l'indique le tableau ci après.

Désignation	% de carbone
Acier hypoeutectoïde	0.02 à 0.8
Acier eutectoïde	0.8
Acier hypereutectoïde	0.8 à 2
Fonte hypoeutectique	2 à 4.3
Fonte eutectique	4.3
Fonte hypereutectique	4.3 à 6.67

Tableau 3.: Classification de l'acier et la fonte selon la teneur en C%.

### III.5.1 Etude de refroidissement de l'acier et la fonte selon la teneur en C%.

Une description qualitative de différentes phases et constituants est présentée pour quelques nuances d'aciers et fontes :

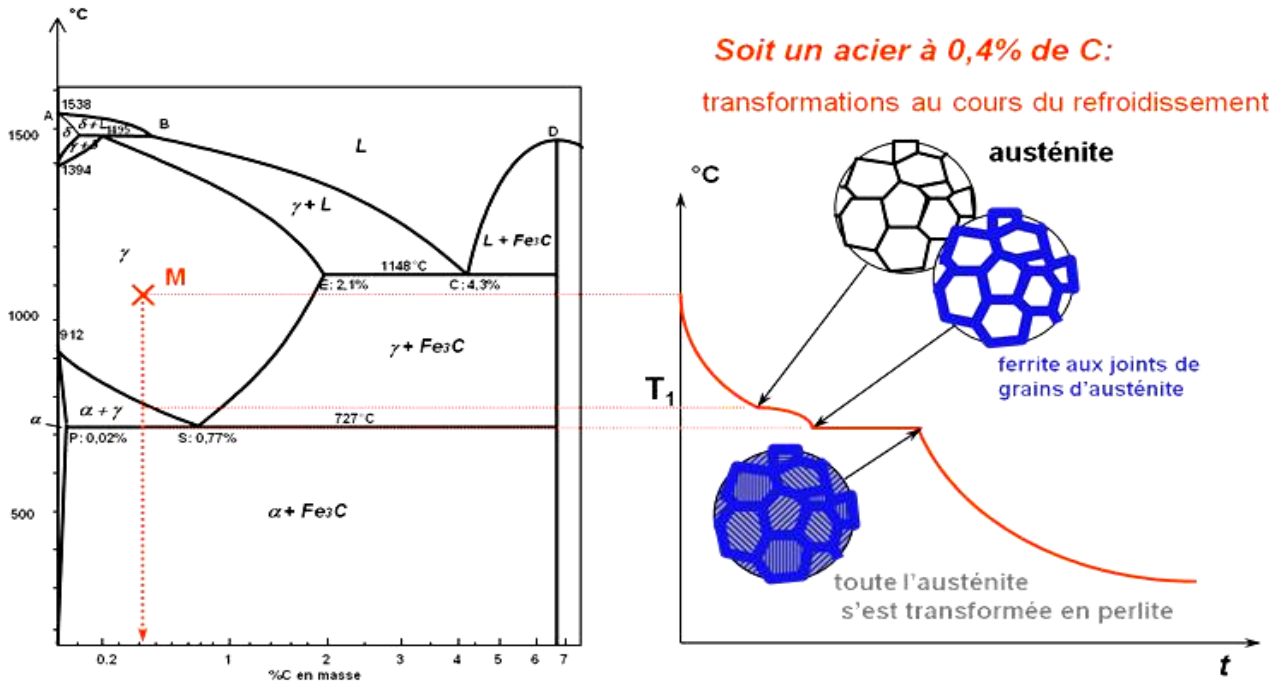
#### A) Cas d'un Acier hypoeutectoïde à 0.4%C

✚ À  $T_1$  : début de germination des premiers cristaux de la ferrite  $\alpha$  proeutectoïde aux joints de grains austénites.

✚ À  $T = 727 + \epsilon$  : le domaine est biphasé, constitué de ferrite proeutectoïde et de

d'austénite.

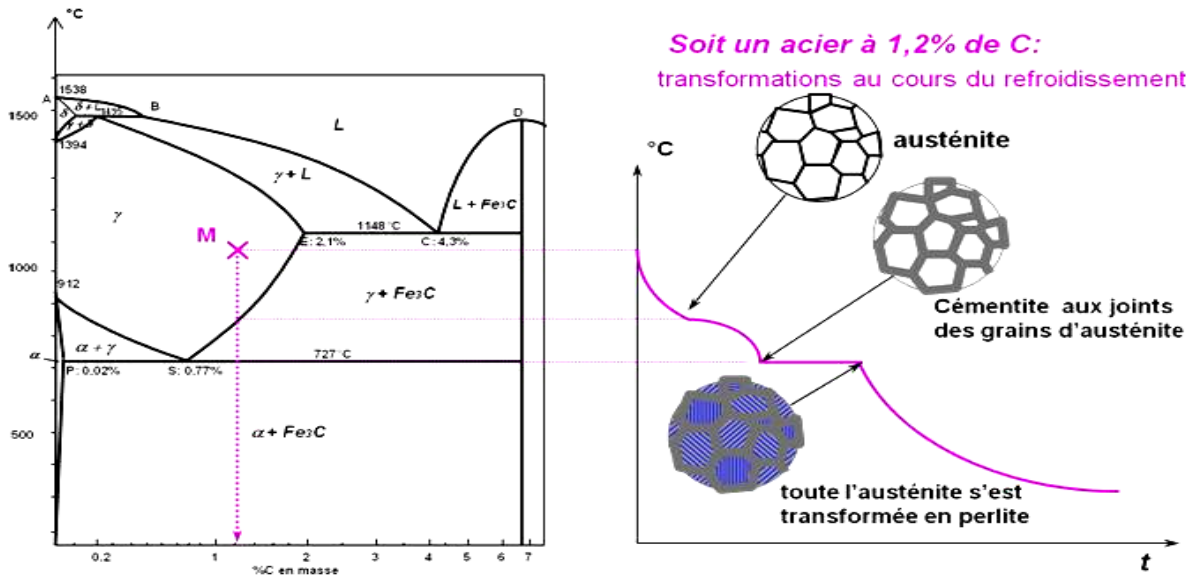
- ✚ À cette température l'austénite a une composition chimique très proche de celle de l'eutectoïde soit  $\approx 0.77\%C$
- ✚ À  $T = 727$  : température de transformation eutectoïde: L'austénite  $\gamma$  subit la transformation eutectoïde pour donner naissance à la perlite.
- ✚ La structure finale typique des aciers hypoeutectoïdes à la température ambiante est : **Ferrite proeutectoïde + Perlite.**



**Figure III. 9 : Refroidissement d'un acier à 0.4% C.**

**B) Cas d'un acier hypereutectoïde 1. 2%C**

La description du refroidissement des aciers hypereutectoïde est identique à celle décrite pour les aciers hypoeutectoïdes sauf que la phase produite est de la cémentite appelé aussi cémentite primaire (figure III.4). La structure finale obtenue à la température ambiante est : **Cémentite (proeutectoïde) + Perlite.**



**Figure III.10 : Refroidissement d'un acier à 1.2% C**

**C) Cas de l'acier eutectoïde à 0.77% C**

l'alliage eutectoïde est constitué de deux phases, la ferrite et la cémentite. A la température  $T = 727^{\circ}\text{C}$  et avec un refroidissement lent, se produit la perlite lamellaire à cause de la présence d'une grande quantité de ferrite (88%) et d'une faible quantité de cémentite (12%) dans l'alliage. La morphologie lamellaire de la cémentite peut être modifiée soit par un refroidissement extra-long, dans le domaine de l'austénite, ou par trempe de plusieurs heures de la perlite lamellaire à la température  $T = 700^{\circ}\text{C}$ .

Cet acier ne possède pas de phase primaire proeutectoïde, c'est à dire que toute l'austénite se transforme en perlite à la température eutectoïde lors du refroidissement. Donc sa structure finale à la température ambiante est : Perlite (100%).

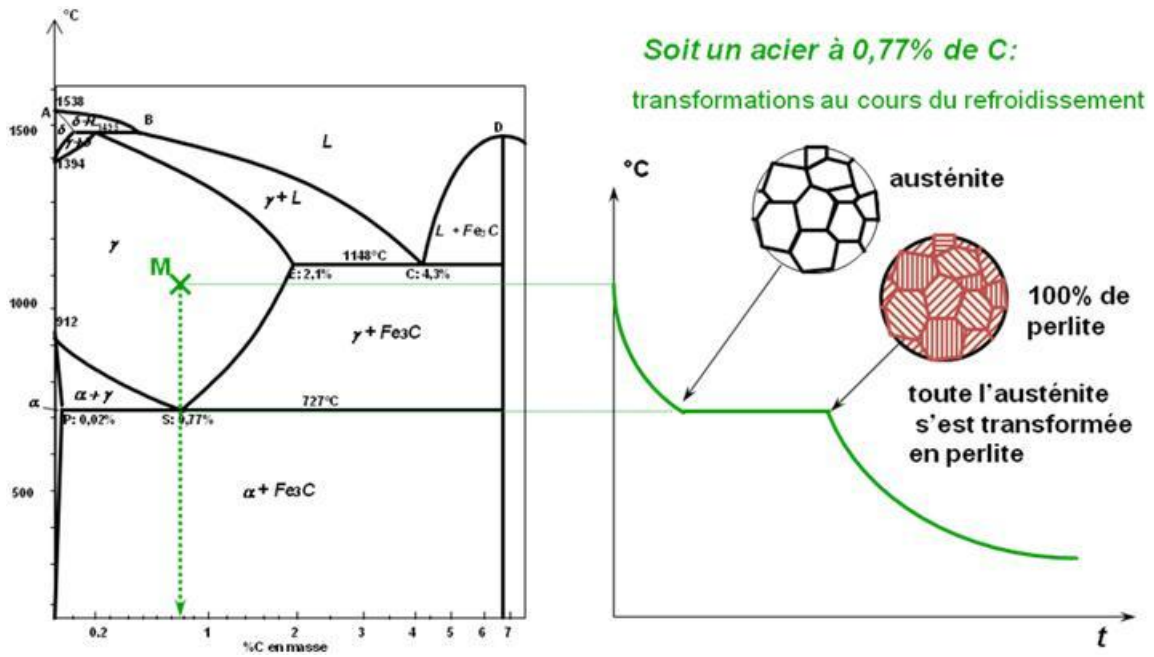


Figure III.11 : Refroidissement de l'acier eutectoïde

**Introduction :** Pour caractériser certains matériaux, on utilise plusieurs types de méthodes soit par observations (à l'œil nu, ou par microscope) soit à l'aide des essais mécaniques, ou autres. On va s'intéresser dans cette partie aux méthodes de caractérisation de matériaux par des examens métallographiques et quelques essais mécaniques.

#### **IV.1 Examen Métallographique :**

La micrographie a pour objectif, à l'aide d'examens des caractéristiques de la structure, l'appréciation de certaines propriétés, le plus souvent mécaniques, des échantillons étudiés

L'examen métallographique consiste à visualiser la microstructure d'un métal, et la mise en évidence des inclusions non métalliques lors de l'observation au microscope optique.

La réalisation d'une micrographie nécessite un certain nombre d'opérations :

- Choix du plan de coupe ;
- Découpe ;
- Enrobage, polissage ;
- Examen, et compte rendu.

#### **IV.2 Technique de préparation micrographique de l'échantillon**

Le prélèvement de l'échantillon est défini par la **norme EN 15614-1**. Pour obtenir une surface d'examen correcte en micrographie, des précautions doivent être prises pour éviter une modification de la structure du métal, résultant soit d'un échauffement, soit d'une déformation du métal entraînant un écrouissage.

##### **IV.2.1 Plan de découpe :**

Le prélèvement se fera aux emplacements les plus susceptibles de livrer des renseignements sur les hétérogénéités du métal.

La découpe des échantillons que ce soit par tronçonnage, par sciage, .....etc. Peut provoquer, si elle est mal conduite, un échauffement, une fissuration des matériaux fragiles ou des écaillages des revêtements superficiels.

Pour éviter ces artefacts, il faut :

- ✓ contrôler l'avance de la meule qui ne doit pas être trop rapide ;
- ✓ Adapter la dureté de meule à celle de la pièce ;

✓ Veiller à ce que le débit d'arrosage soit suffisant et bien orienté.

#### **IV.2.2 L'enrobage :**

L'enrobage des échantillons est nécessaire avant l'opération de polissage. Il permet en effet de polir les échantillons trop petits pour être manipulés et d'assurer une bonne préparation des bords.

##### **IV.2.2.1 : L'enrobage à Chaud :**

La méthode la plus fréquente pour enrober un échantillon avec une résine thermodurcissable ou thermoplastique utilise la pression et la chaleur. Les résines phénoliques (PhenoCure), le diallyl phtalate et les résines époxy (EpoMet) comptent parmi les résines thermodurcissables courantes, tandis que le méthacrylate de méthyle (TransOptic) est la résine d'enrobage thermoplastique la plus utilisée pour la transparence.

##### **IV.2.2.2 L'enrobage à froid :**

Les résines d'enrobage à froid ont des duretés plus faibles que celles qui polymérisent à chaud. Il existe deux types de résines d'enrobage à froid : les résines époxy et les résines acryliques. Les résines époxy sont adaptées à l'enrobage de tous les types de matériaux et sont spécialement recommandées pour l'imprégnation sous vide.

Les résines acryliques sont faciles à mettre en œuvre et présentent des temps de polymérisation courts, un retrait très limité et d'excellentes propriétés

d'enrobage. Elles sont adaptées à la fois à l'enrobage en série d'échantillons de forme irrégulière pour le contrôle de routine ou aux échantillons individuels.



**Figure IV.1. : Machine d'enrobage à chaud**

### **-1) Le pré-polissage**

Le pré-polissage se fait par frottement avec des papiers abrasifs de plus en plus fins. Souvent les pré-polissages se font sur des platines qui tournent de 150 ou 300 tours/minutes. Les disques abrasifs sont arrosés par eau pour limiter les échauffements. Le pré-polissage a pour but d'éliminer les traces du polissage précédent. Par exemple, le premier polissage avec une granulométrie de P120 consistera à éliminer les traces du sciage. Puis le polissage avec un disque de granulométrie P180 effacera les traces de rayures du polissage à P120. A chaque changement d'abrasif, l'échantillon doit être lavé et séché.



**Figure IV.2 : Polisseuse.**

Des vitesses de rotation des disques abrasifs de l'ordre de 150 à 300 tr.min<sup>-1</sup>.

Des granulométries de 120-180-320-400-600 pour l'échantillon brut de tronçonnage, de **180-320-400-600** pour l'échantillon passé à la bande abrasive, de 320-400-600 pour l'échantillon rectifié.

Une durée de polissage variable, que l'on peut estimer de 2 à 3 minutes par granulométrie.

Polissage de finition : Trois principaux modes de polissage de finition sont généralement utilisés :

- Polissage électrolytique ;
- Polissage à l'alumine ;
- Polissage à la pâte ou suspension diamantées.

### 1.1 Polissage électrolytique :

Le polissage électrolytique est basé sur le principe de la dissolution anodique.

L'échantillon constitue l'anode d'une cellule électrolytique ( **Figure IV.2** ).

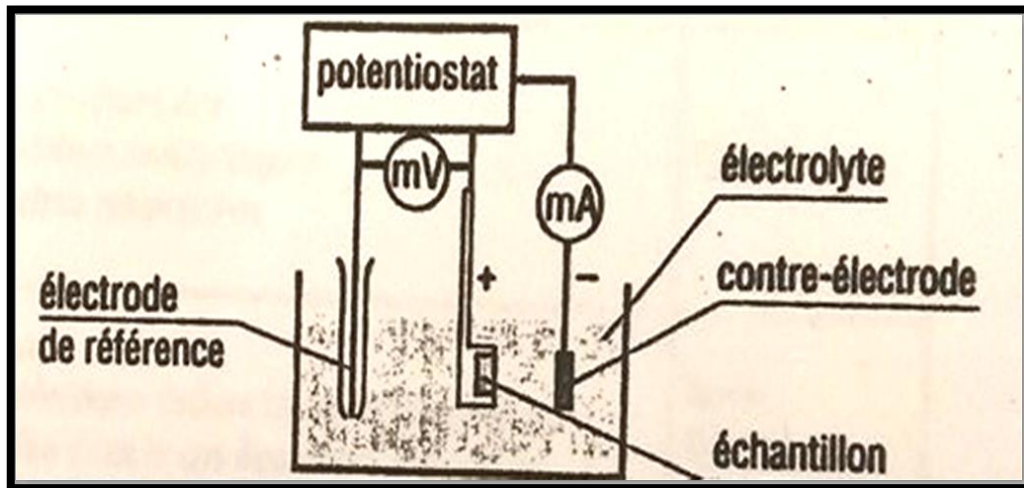


Figure IV.2 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour effectuer le polissage électrolytique.

### 1.2 : Polissage à l' alumine

Ce polissage consiste à frotter l'échantillon sur des disques de feutre ou de drap imbibés d'une suspension d'alumine. La granulométrie de l'alumine est caractérisée par le temps nécessaire au dépôt de l'alumine en suspension, après agitation. Plus l'alumine est fine, plus cette durée est longue ( 12h, 24h, 48h).

### 1.3 Polissage à la pate diamantée :

Le polissage se fait comme précédemment, l'agent de polissage étant une pâte ou une suspension diamantée répartie à l'aide d'un diluant sur le disque. Les différentes granulométries utilisées sont : 14, 6, 3, 1, 1/4.

Un lavage de l'échantillon, à l'aide d'un solvant adapté à la pâte diamantée, est effectué à chaque changement de granulométrie et en fin de polissage. L'échantillon est ensuite séché à l'air chaud.

## **2. Attaques Micrographiques**

On peut observer directement l'échantillon poli sans attaque macrographique s'il s'agit d'examen d'inclusions non métalliques, de fissures, de porosités,...etc.

## **3. Attaques chimiques**

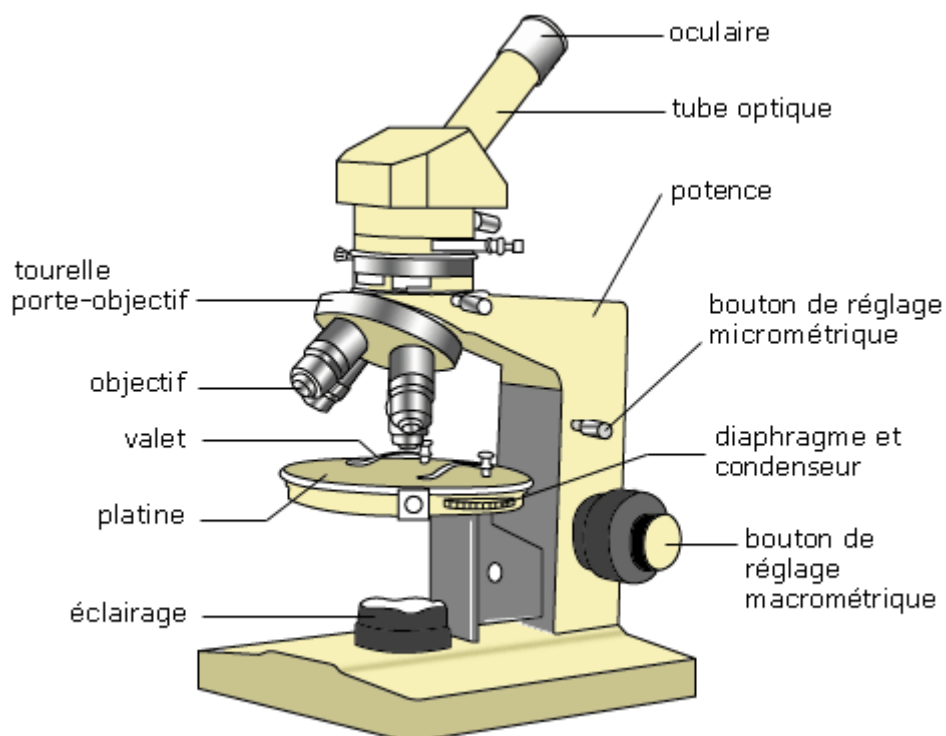
Les réactifs sont classés en deux groupes :

- 1- Les réactifs d'attaque chimique
- 2- Les réactifs d'attaque électrolytique

## **4. Microscope Métallographique**

Le microscope utilisé en métallographie ( figure III.3) est constitué des parties suivantes :

- 1- Dispositif d'éclairage
- 2- un dispositif d'observation constitué d'un objectif oculaire et d'un projectif sur écran.
- 3- prise de vue photographique, reprise par système de vidéo.



**Figure IV.3 : Microscope Métallographique.**

### **Pourquoi caractériser les matériaux ?**

1. La caractérisation des matériaux c'est la quantification des propriétés :

- Mécanique
- Électrique
- Thermique, etc.

2. Déterminer les données à utiliser en conception

- est-ce qu'une pièce va casser !!!
- est-ce qu'une pièce va se déformer !!!

Il est possible de caractériser les métaux par :

- ✚ La couleur
- ✚ La conductibilité électrique et thermique
- ✚ La finition de surface
- ✚ La limite d'élasticité (à la traction ou compression )
- ✚ La résistance au cisaillement, Flexion , Torsion,
- ✚ La dureté, ..etc.

### **IV.3- Les essais pour caractérisation mécaniques :**

#### **IV.3.1 But des essais :**

Connaitre les propriétés mécaniques d'un matériau, c'est un indice technique indispensable pour les ingénieurs qui s'occupent des calculs des structures à chaque étape de mise en œuvre des matériaux. Il est évident que ces calculs ne peuvent être menés à bien sans une connaissance précise des lois de comportement mécanique des matériaux souvent influencées par d'autres phénomènes extérieurs telles que : la vitesse de sollicitation, la température, ou même les interactions entre les propriétés mécaniques et les évolutions de la structure microscopique.

Dans ce chapitre, Nous définissons les principaux essais fondamentaux (dureté, traction, ténacité, fatigue ) qui intéressent d'une voie directe ou indirecte la résistance à la rupture du matériau et caractérisent sa consolidation.

**IV.3.2 Essai de dureté :** L'essai de dureté a une grande utilité pour le spécialiste en matériaux à cause de sa simplicité et de son caractère peu destructif. Un matériaux dont la dureté est importante est considéré comme dur, ou doux dans le cas contraire.

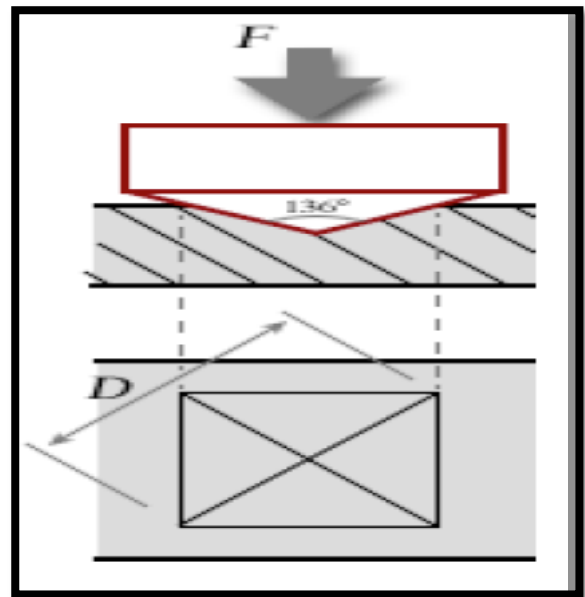
La dureté caractérise la résistance à la déformation. Principe de La méthode consiste à faire pénétrer une bille sous une charge déterminée dans la surface de l'éprouvette. La profondeur de pénétration est mesurée pendant l'application de la charge. L'aire de l'empreinte est calculée à partir de cette profondeur. La dureté à la bille par pénétration est ensuite calculée à l'aide de la relation suivante :

$$\text{Dureté à la bille par pénétration} = \frac{\text{Charge appliqué}}{\text{Aire de l'empreinte}}$$

#### IV.3.3 Les différents types de l'essai dureté :

##### 1- Dureté VICKERS :

Appareil de Mesure :



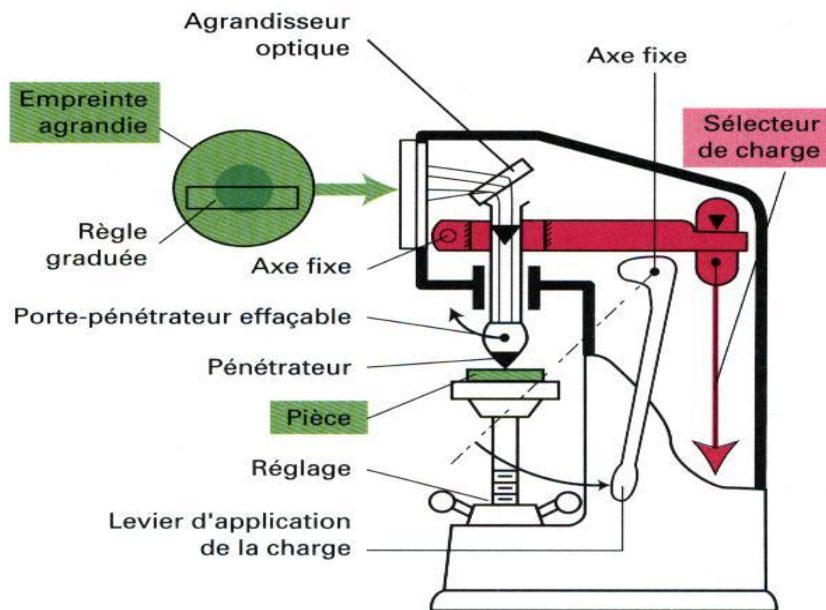


Figure IV. 4 : Machine de mesure de dureté "Duromètre "

L' appareillage comprend :

- 1- Un bâti munie d'un plateau porte-éprouvette, un pénétrateur avec ses accessoires et un dispositif d'application de la charge sans choc. Sous la force maximale, le bâti ne doit pas se déformer de plus de 0,05 mm, cette déformation étant mesurée suivant l'axe principal de la force appliquée.
- 2- Un pénétrateur pyramidal à quatre faces de type Vickers. Après l'essai, le pénétrateur ne doit être ni déformé ni endommagé ;
- 3- Dispositif optique pour la mesure des deux diagonales de l'empreinte (D1 et D2) ;
- 4- Affichage digital automatique de la dureté HV après mesure de D1 et D2
- 5- Gamme de charges sur le pénétrateur : de 0,3 à 30 kgf (HV0, 3 à HV30).

La dureté Vickers (HV) est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 1.854F/D^2$$

Où **F** est la charge d'essai de 1 à 120 daN ;

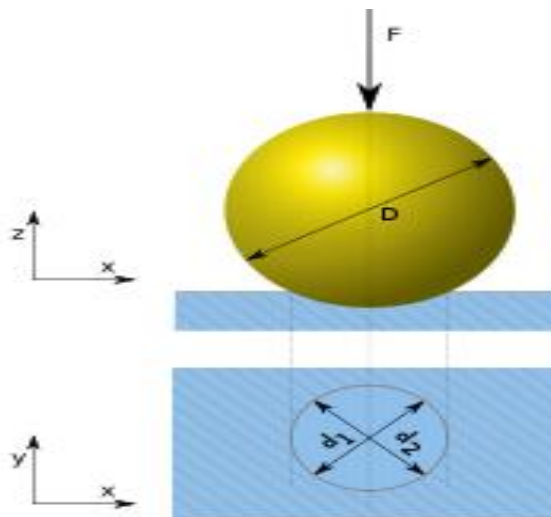
**D** : la diagonale de l'empreinte en millimètres ( Moyenne de d1 et d2 ) ;

Cet essai est adapté pour les alliages durs et les céramiques.

## 2- Dureté Brinell :

Lors de l'essai de dureté Brinell, on mesure la taille de l'empreinte laissée par un pénétrateur sphérique. Plus l'empreinte laissée par le pénétrateur Brinell de diamètre défini sur la surface d'une pièce (un échantillon) avec une force d'essai définie est grande, plus le matériau testé sera tendre.

Selon ISO 6506, pour la détermination de la dureté Brinell (HBW), le pénétrateur sphérique en carbure de tungstène est pressé avec une charge d'essai définie (entre 1 kgf et 3000 kgf) contre l'échantillon (pièce).



**Figure IV.5 : Principe de Dureté Brinell**

Pour le calcul de la surface de l'empreinte sphérique rémanente, on utilise la valeur moyenne mathématique  $d$  des deux diagonales perpendiculaires  $d_1$  et  $d_2$  (en mm), la base des empreintes Brinell n'étant souvent pas exactement ronde. La dureté BRINELL se mesure selon la formule suivante:

$$HB = (0,102 \cdot 2F) / [D (D - (D^2 - d^2))]^0,5$$

$$F = K \cdot 9,81 \cdot D^2$$

$K = 30$  pour les aciers.

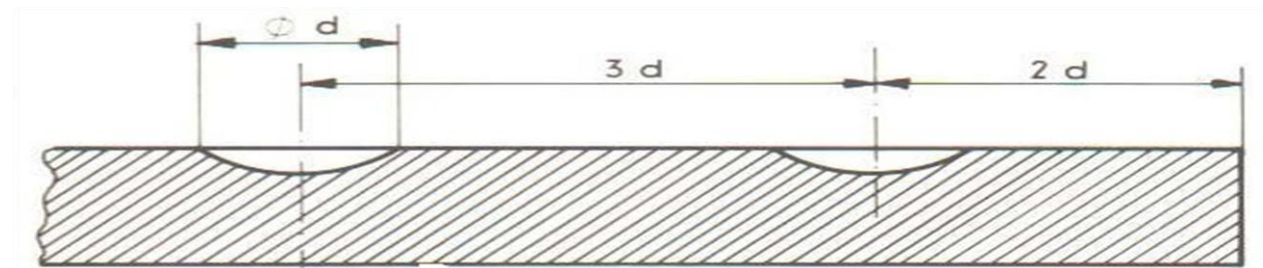
$D$  : diamètre de la bille en mm

$F$  : charge d'essai en newtons.

**d** : diamètre de l'empreinte.

### 2.1 Conditions d'essai :

- **l'essai doit être fait à la température ambiante.**
- **La pièce à essayer doit reposer sur un support rigide.**
- **Surface de la pièce à contrôler :** L'essai doit être effectué sur une surface rendue lisse et plane, en prenant garde que cette préparation n'entraîne pas **d'altération** par échauffement ou écrouissage.
- **L'épaisseur :** la pièce à essayer ne devrait pas être inférieure à 8 fois la profondeur de l'empreinte, et après essai, aucune déformation ne doit être visible sur la face opposée à celle de l'application de l'effort.
- **Position de l'empreinte :** En règle générale, la distance entre le centre de l'empreinte et le bord de la pièce ne devrait pas être inférieure à 2 fois le diamètre de celle-ci. De même, la distance entre les centres de deux empreintes voisines doit être au moins égale à 3 fois leur diamètre.



**Figure IV.6 : Schéma de position de l' empreinte**

### 2.2 Mode opératoire :

- Amener la bille au contact de l'échantillon, puis appliquer la charge avec le levier.
- Retirer la charge immédiatement, puis revenir au contact de la pièce.
- Appliquer de nouveau la charge, et la maintenir pendant 15 secondes.
- Libérer la charge, enlever l'éprouvette
- Mesurer le diamètre de l'empreinte au projecteur de surface NIKON.
- Déterminer la dureté HBS ou HBW.

### Exemple :

600 HBW 1/30/20 correspond à une dureté Brinell de 600 mesurée avec une bille en carbure de tungstène de 1 mm de diamètre, sous une charge de 294,2 N (30 kgf) maintenue pendant 20 secondes.

La dispersion des résultats est nettement plus forte pour l'essai Brinell, et il est généralement nécessaire de prendre la moyenne de trois mesures.

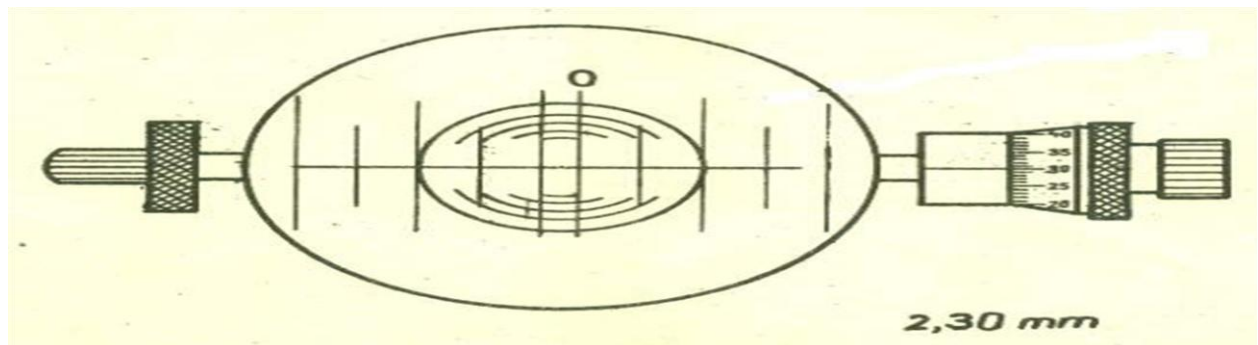


Figure IV.7 : Mesure de l'empreinte

### 3- Dureté Rockwell

Essai Rockwell : mesure de la dureté d'un métal selon l'enfoncement d'une bille d'acier, appelé dureté Rockwell B (HRB) ou d'un cône de diamant de 120°, dureté Rockwell C (HRC).

#### 3.1 Essai Rockwell C - HRC

Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° d'angle et de charge égale à 1373 N. On mesure l'accroissement "e" en profondeur ou enfoncement rémanent.

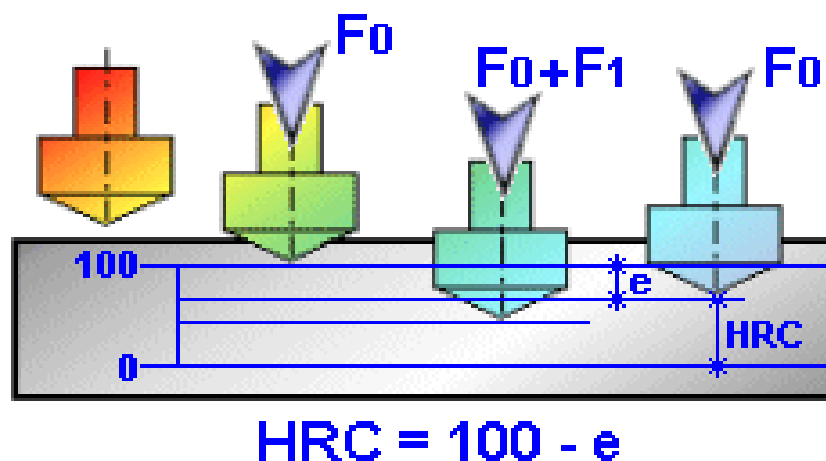


Figure IV.8 : Principe de Dureté Rockwell-HRC

Exemple : HRC = 60

La profondeur de l'empreinte  $e$  :  $100 - 60 = 40$

$40 \times 0,002 = 0,08 \text{ mm}$

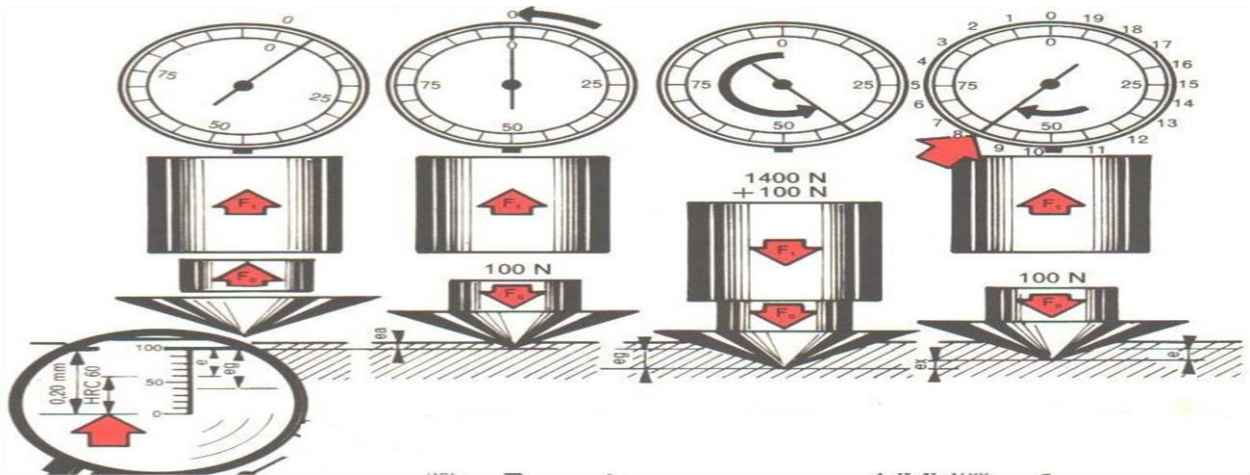


Figure IV.9 : Mesure par la méthode Rockwell

### 3.1.2 Comparaison entre les différentes duretés :

A cause des différents processus micromécaniques mis en jeu dans les différentes méthodes de mesure de dureté, on comprend bien qu'il n'existe pas de formule de traduction entre les valeurs de dureté HB, HV et HR. Néanmoins, les résultats de nombreuses séries d'essais sur aciers ont permis d'établir des cartes de conversion qui font l'objet de la norme NF A 03-172 (1980). Une estimation peut tout de même être effectuée à l'aide de relations empiriques telles que  $HB=0.95 HV$ , ou  $HRC=1/10 HV$  (dans le domaine 200-400 HV). Enfin l'essai de dureté étant un essai quasiment non destructif comparativement à un essai de traction, il peut être pratiqué directement sur pièce de structure.

### 3.2 Essai Rockwell B - HRB

Le pénétrateur est une bille en acier trempé de 1,6 mm de diamètre et de charge égale à 883 N. On mesure l'accroissement "e" en profondeur ou enfoncement rémanent.

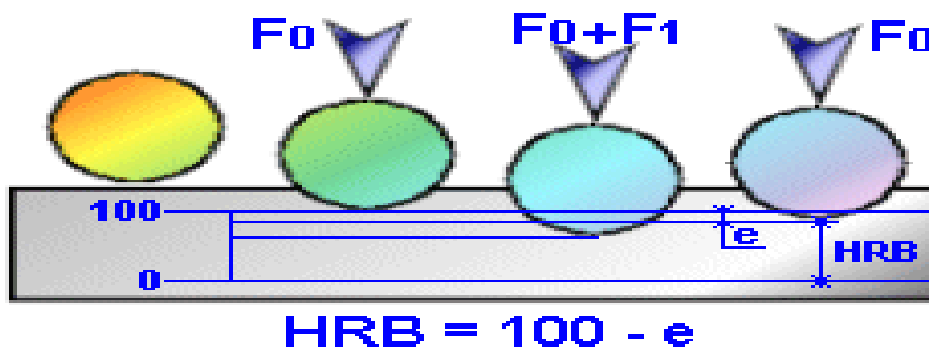
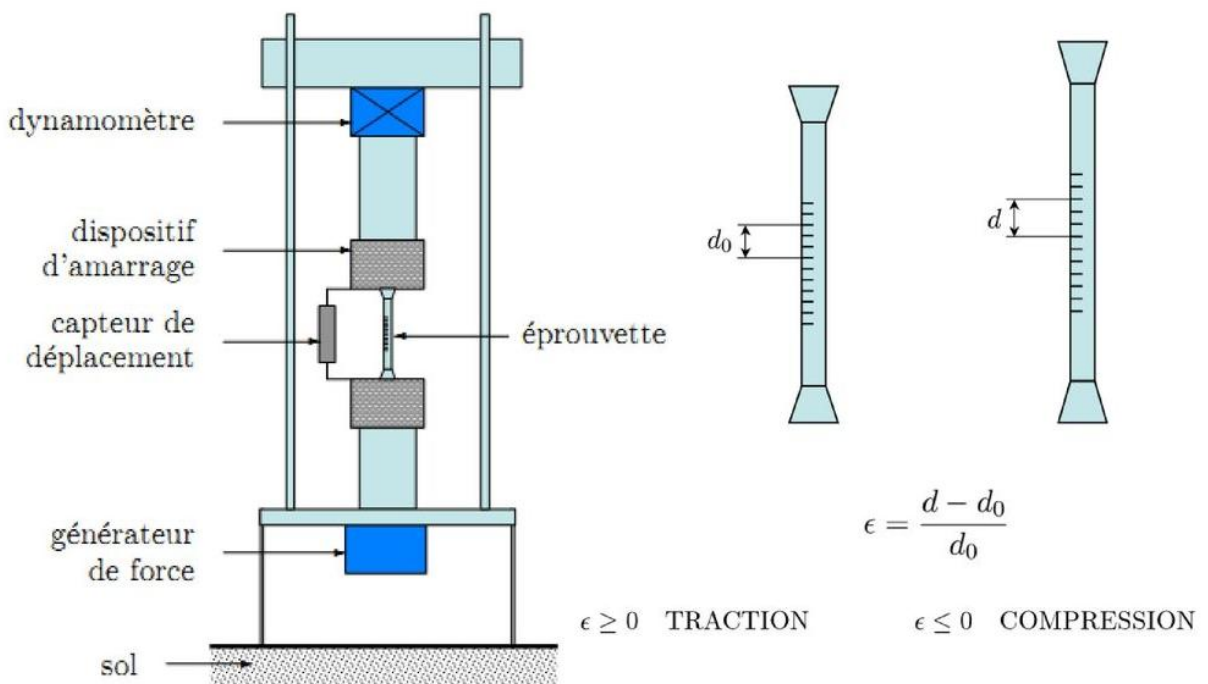


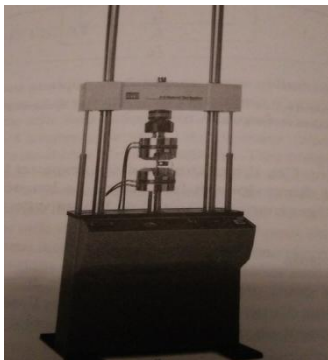
Figure IV.10 : Principe de Dureté Rockwell-HRB.

**IV.4 Essai de traction :** l'essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique ou plate à section rectangulaire à une charge uni-axiale longitudinale jusqu'à la rupture et à enregistrer simultanément durant l'essai la charge et l'allongement de l'éprouvette. Un tel enregistrement permet d'obtenir des grandeurs caractéristiques de la résistance mécanique du matériau (propriétés élastiques, plastiques et de ductilité). il permet aussi de définir la loi de comportement contrainte-déformation, utilisable dans un calcul de structure.

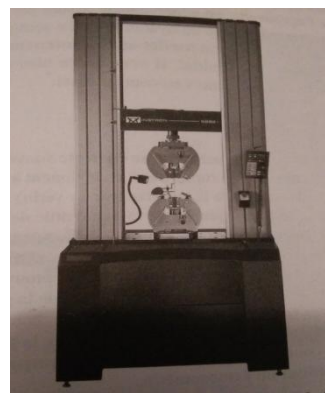
**IV.4.1 Machine d'essai :**



a)



b)

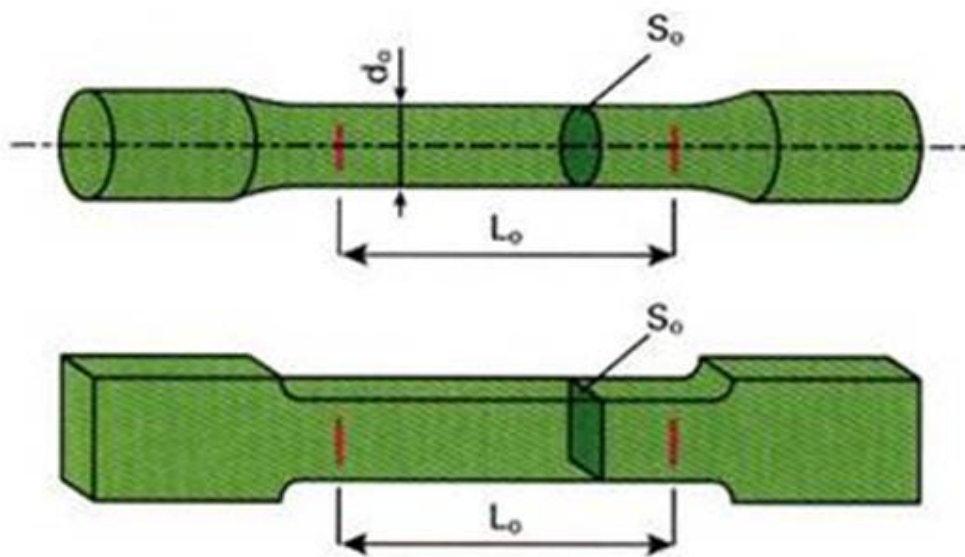


c)

**Figure IV.10 : Machine d'essai de traction uniaxiale, a) Dispositif de l'essai de traction ou compression ; b) Machine électrohydraulique ; c) Machine électromécanique**

Les machines d'essai de traction sont soit des machines électrohydrauliques ( fig (6.b), soit électromécanique fig (6.c). Ces machines comportent en général une traverse fixe liée au bâti, un verin hydraulique dont le corps est fixé à cette traverse, et une traverse mobile guidée en translation par deux colonnes cylindriques liées au bâti.

## 2 Eprouvettes :



**Figure IV.11 : Types des éprouvettes normalisées pour essai de traction.**

L'enregistrement de la force mesurée en fonction de l'allongement de l'éprouvette, donne un **Diagramme de traction**( Figure 7 ).

### Première partie du diagramme (OA) rectiligne :

L'allongement est proportionnel à la force appliquée

La déformation est réversible : c'est le domaine élastique Au point A la force indique la limite du domaine élastique

### Deuxième partie du diagramme AB

Les déformations sont irréversibles : domaine de la déformation permanente ou plastique.

Au point B la force correspond à la force maximale appliquée.

### Troisième partie du diagramme BC

La déformation de l'éprouvette se localise à une partie de l'éprouvette, c'est la striction.

Au point C l'éprouvette casse à l'endroit de la striction

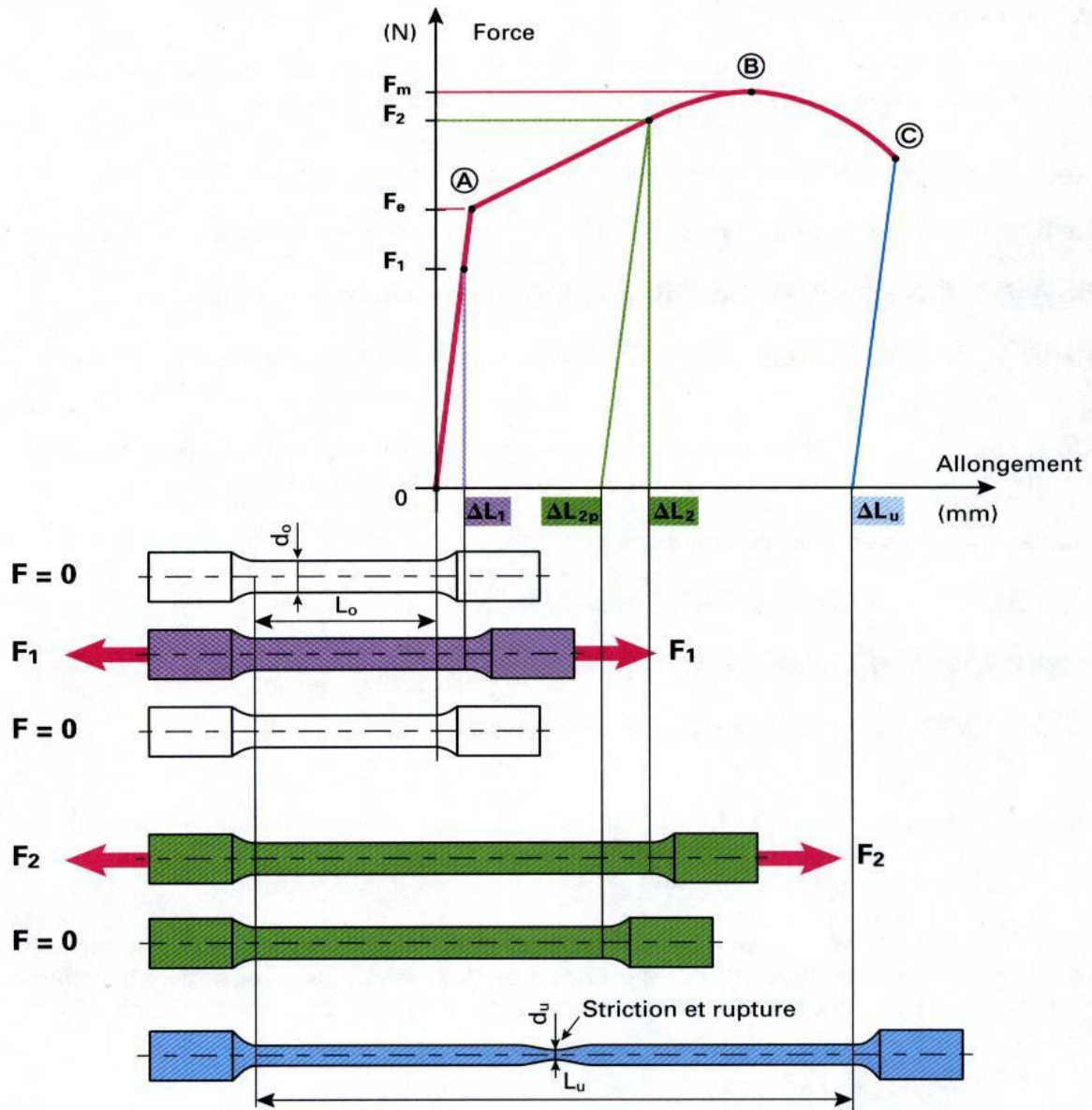
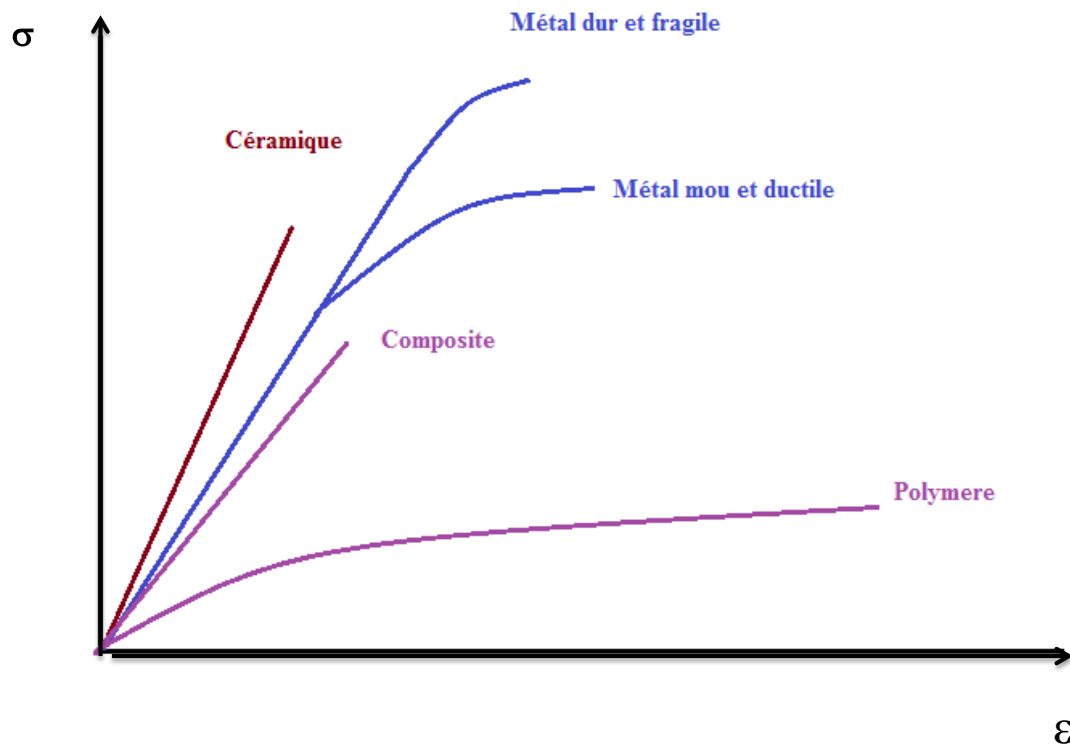


Figure IV.12 : Diagramme de Traction.

Le dépouillement des essais consiste ensuite souvent à transformer les courbes "Force-Déplacement" obtenues en courbes "Contrainte-Déformation", appelées "Courbes rationnelles". La figure 8 donne une courbe rationnelle typique obtenue pour différents types de matériaux.



**Figure IV.13 : Courbes rationnelles typiques des différents matériaux.**

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile.

Tous les matériaux contiennent un certain nombre de microfissures qui deviennent instables et conduisent à la rupture lorsque la force appliquée dépasse une valeur critique. L'étude élémentaire de la mécanique de la rupture montre que la rupture dépend de deux grandeurs : la contrainte appliquée ( $\sigma$ ) et la dimension  $l$  des microfissures. Ces deux grandeurs sont combinées dans le facteur d'intensité des contraintes  $K$ . La rupture se produit lorsque l'on atteint la valeur critique  $K_c$ .

Nous avons visualisé dans l'essai de traction une rupture ductile. Elle se produit après une déformation plastique plus ou moins grande. Elle semble liée essentiellement à la présence d'inclusions plus dures que le métal. Il y a déformation plastique autour des inclusions, formation de microcavités, allongement et coalescence de ces microcavités aboutissant à la rupture. Il existe un autre type de rupture dite fragile. Elle se produit après une déformation plastique très

faible voire nulle. Elle est caractérisée par la propagation très rapide possible des fissures (consommation d'énergie faible) soit au travers des grains, soit le long des joints de grains.

#### **IV.4.2 Les essais de résilience**

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile. La rupture est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties sous l'action d'une contrainte. Cette séparation se produit à plus ou moins grande vitesse par propagations de fissures existant dans le matériau. La rupture est donc fortement influencée par la présence de microfissures, de pores, d'inclusions de particules fragiles (défauts internes) et par la présence d'entailles (macrofissures) résultant de défauts de fabrication ou de conception.

Nous avons visualisé dans l'essai de traction une rupture ductile. Elle se produit après une déformation plastique plus ou moins grande. Elle semble liée essentiellement à la présence d'inclusions plus dures que le métal. Il y a déformation plastique autour des inclusions, formation de microcavités, allongement et coalescence de ces microcavités aboutissant à la rupture.

Il existe un autre type de rupture dite fragile. Elle se produit après une déformation plastique très faible voire nulle. Elle est caractérisée par la propagation très rapide possible des fissures (consommation d'énergie faible) soit au travers des grains, soit le long des joints de grains.

**L'essai de résilience** a été élaboré pour prendre en compte ces phénomènes de rupture.

La résilience est désignée par le symbole **K**, et c'est l'aptitude que possède un matériau à résister plus ou moins bien aux chocs. Les essais de résilience permettent de mesurer la ténacité des matériaux. La ténacité est caractérisée par la propagation brutale de fissures.

Une des mesures possibles de la ténacité est la détermination de l'énergie nécessaire provoquant la rupture. C'est le français **Georges Charpy** qui a mis au point ces essais.

Définition de la Résilience

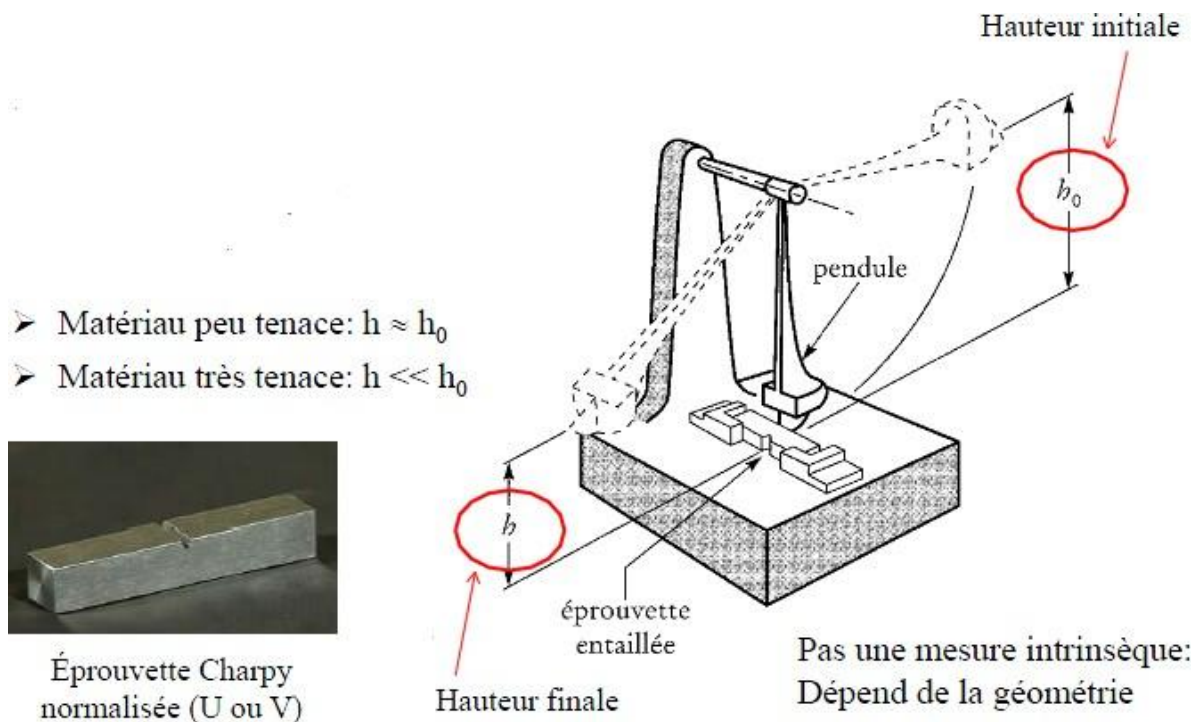
##### **IV.4.2.1 Principe de l'essai de résilience.**

L'essai de résilience (essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie  $W$  (en joules) absorbée par la rupture

La résilience représente alors un simple rapport :

**Résilience  $K$  = Travail nécessaire pour briser l'éprouvette entaillée / section au droit de l'entaille.**

La résilience est définie par la lettre K et s'exprime en (Joules/cm<sup>2</sup>). Cet essai se réalise sur une machine appelée mouton pendule rotatif.( **Fig IV.13** ). La mesure de la résistance au choc du matériau s'effectue selon la Normes : EN 10045 :1990 et EN 875.



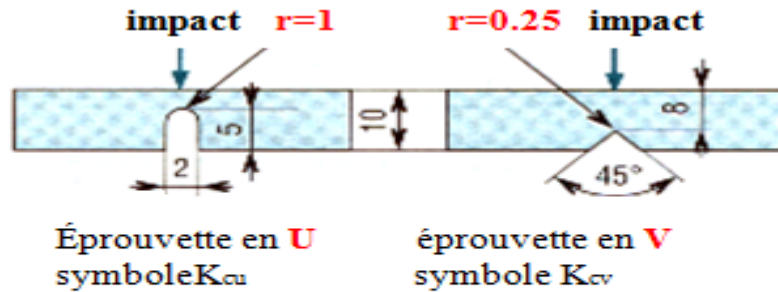
**Figure IV.13 : Le Mouton Pendule de Charpy**

$$\text{La résilience} = \frac{\text{Travail Nécessaire}}{\text{Section après entaille}} \quad ; \quad K = \frac{Wn}{S} \quad W \text{ en joules} ; S \text{ en cm}^2$$

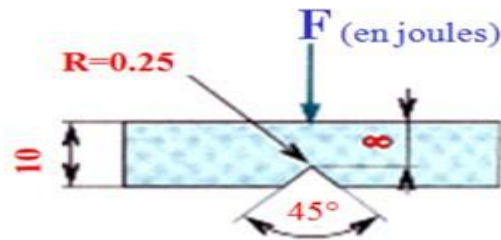
**IV.4.2.2 Les éprouvettes de l'essai de résilience :** Pour effectuer cet essai on peut utiliser deux types d'éprouvettes :

- Une éprouvette en forme barreau usiné de section carrée de 10 mm de coté et dont la longueur est 55mm. L'entaille de 2 mm de largeur et de 5 mm de profondeur se termine par un fond cylindrique de 1 mm de rayon. La résilience est alors mesurée et précisée selon le symbole Kcu.
- Une éprouvette en forme barreau usiné de section carrée de 10 mm de coté et dont la longueur est 55mm. L'entaille est en V de 2 mm de profondeur et avec un angle de 45° dont les

dimensions sont les mêmes que pour les éprouvettes Charpy U. On précise par le symbole Kcv l'essai de résilience en V.



$$K = \frac{\text{énergie absorbée } W}{\text{section au droit de l'entaille}}$$



**Normalisation ( NFA 03-161 )**

- ✳ Longueur de l'éprouvette → **55mm<sub>±0.6</sub>**
- ✳ Hauteur de l'éprouvette → **10mm<sub>±0.06</sub>**
- ✳ Largeur de l'éprouvette → **10mm<sub>±0.11</sub>**
- ✳ Angle de l'entaille → **45°<sub>±2°</sub>**
- ✳ Rayon à fond d'entaille → **0.25mm<sub>±0.025</sub>**
- ✳ Profondeur de l'entaille → **2mm**

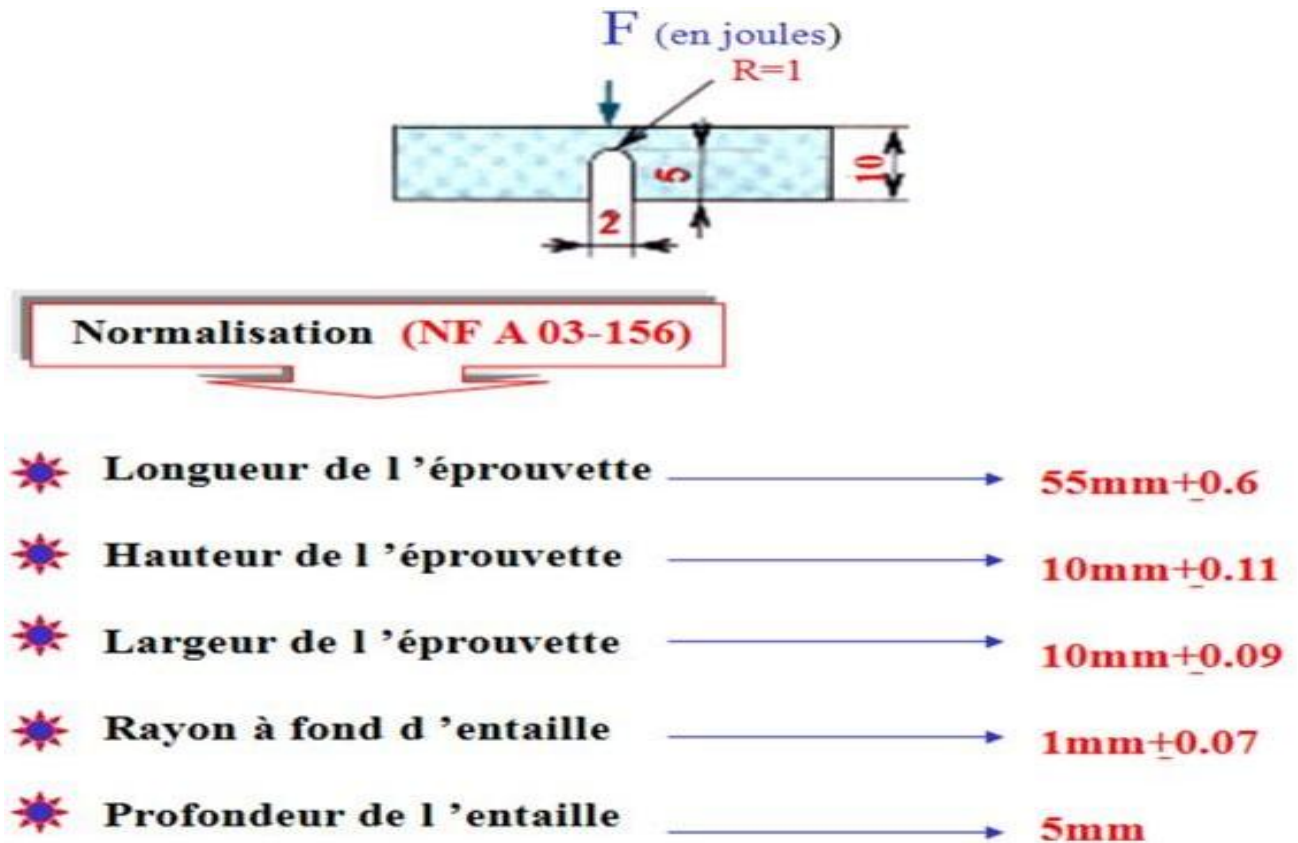


Figure IV.14 : Caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes de Résilience.

#### IV.4.2.3 Déroulement de l'essai :

- ✚ Le bras qui porte le couteau, qui en mouvement de rotation, vient percuter l'éprouvette, puis remonte en sens inverse, après la rupture de l'éprouvette.
- ✚ La valeur résultat de l'essai, est alors enregistrée sur le cadran, de mouton, pendule de Charpy

✚ Ainsi, l'énergie potentielle du pendule est égale à : à l'état initial  $W_0 = Ph_0$ ,

à l'arrivée  $W_1 = Ph_1$

✚ L'énergie absorbée par l'éprouvette est :

$$W = W_0 - W_1 = P(h_0 - h_1)$$

#### IV.4.2.4 Conditions d'utilisation de l'essai de résilience

- ✓ L'essai doit se faire à la température ambiante sauf spécification contraire
- ✓ L'éprouvette doit être déposée sur les appuis de mouton de Charpy
- ✓ L'éprouvette doit être saine, elle ne doit pas comporter d'amorce de rupture, ni de défauts.
- ✓ Pour l'essai normal, l'énergie nominale doit être de 300 Joules +/- 10

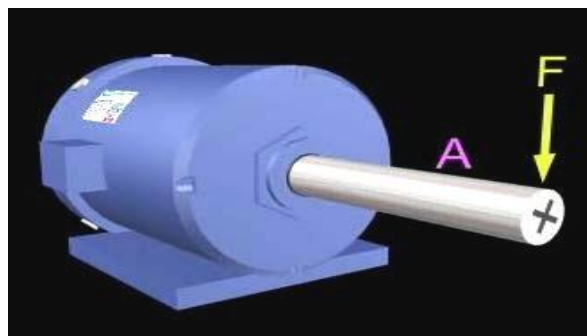
**Remarque :** Si pendant l'essai, l'éprouvette ne se rompt pas, la valeur obtenue pour la résilience est incertaine, Il faut noter que l'éprouvette ne se rompt pas.

#### IV.5 Essai de Fatigue

La fatigue des matériaux est l'endommagement ou la défaillance d'un matériau. Lorsque l'on soumet un matériau à des cycles répétés d'efforts, il subit des modifications de microstructure regroupés sous le terme général d'endommagement par fatigue. Cet endommagement ne se signale par aucune modification macroscopiquement décelable et la rupture peut intervenir à des niveaux de contraintes peu élevés, souvent inférieurs à la résistance à la traction ou même à la limite d'élasticité. Le processus de fatigue implique l'apparition d'une fissuration qui se développe progressivement sous l'action de la répétition des sollicitations ou d'un composant soumis à des contraintes variables dans le temps et fréquemment répétées. La rupture du métal sous l'effet des contraintes répétées ou alternées s'appelle la **fatigue du métal** et son **aptitude à résister à la rupture de fatigue** porte le nom **d'endurance**. L'importance de la fatigue réside dans le fait qu'elle constitue la cause de quelque 90 % de toutes les défaillances des pièces.



Pour étudier la fatigue, on utilise le plus souvent l'essai de flexion rotative :



1. On soumet les éprouvettes à des efforts simples de flexion rotative à divers niveaux d'amplitude de contrainte  $\sigma_A$
2. On mesure le nombre  $N$  de cycles requis pour entraîner la rupture de l'éprouvette (cycle : charge – décharge)
3. On répète plusieurs fois l'essai à différentes amplitudes de contrainte  $\sigma_A$
4. On trace, en échelle semi-logarithmique, la courbe  $\sigma_A = f(N)$

Dans cette position, le point A est soumis à une **tension**. Quand l'axe effectue un demi-tour, le point A est maintenant soumis à une **compression**.

Lorsqu'un tour complet de rotation est réalisé, le point A est de nouveau soumis à une tension.

La point A est donc soumis à une  **$\sigma$  cyclique** varie sinusoidalement dans le temps et caractérisé par les valeurs  **$\sigma$  maximum et  $\sigma$  minimum**, ici égale en valeur **absolue**, mais de signe **négatif**.

Sollicitation cyclique sinusoidale (alternée symétrique)

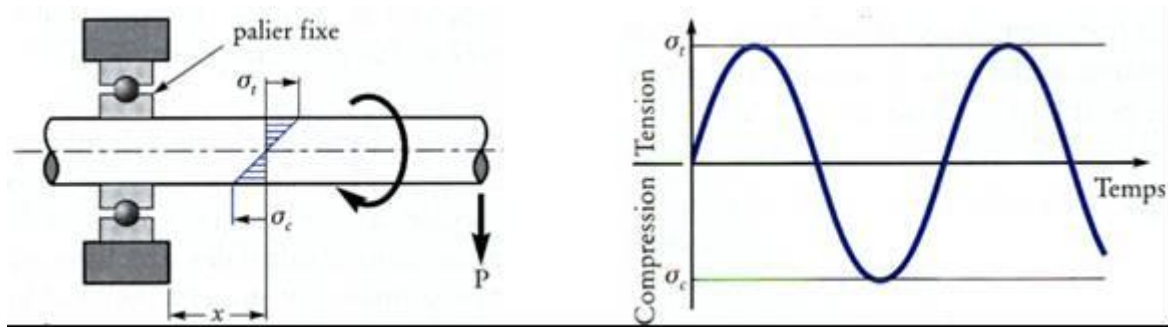


Figure IV.15 : Flexion rotative : en un point de la surface de l'éprouvette, situé à une distance  $x$  du palier, la contrainte varie de façon sinusoïdale entre des valeurs absolues égales, en tension et en compression ( $\sigma_t = \sigma_c$ )

On peut caractériser un chargement cyclique d'amplitude constante par la valeur  $R$  qui est le rapport de :

$$\text{Rapport } R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

Pour  $R = -1$ , les contraintes sont dites **alternés symétriques**, et la contrainte moyenne est égale à zéro. Avec  $\sigma_{\text{moy}} = \sigma_{\max} + \sigma_{\min} / 2$

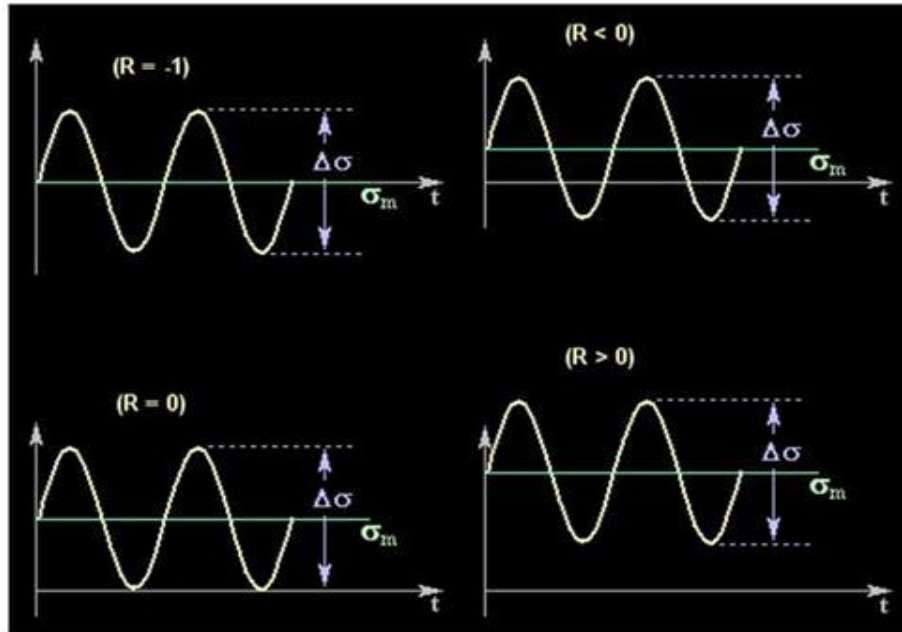
$$\sigma_{\text{moy}} = 0$$

La variation de contrainte  $\Delta\sigma$  est la différence entre  $\sigma_{\max}$  et  $\sigma_{\min}$  :

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Par ailleurs, l'**amplitude** de contrainte  $\sigma_a$  équivaut la moitié de cette variation de contrainte, soit :

$$\sigma_a = \Delta\sigma / 2 = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} / 2$$



- quand  $R > -1$  ou  $R < 0$ , les contraintes dites répétés asymétriques et  $\sigma_{\text{moy}} > 0$  et croît si le rapport R augmente.
- quand  $R > 0$  on parle alors de contraintes ondulées, alors  $R > 0$ , et sa valeur tend vers 1 quand la différence  $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$  décroît.

On remarquera que plus la valeur  $R$  est élevée, plus la  $\sigma_{\text{moy}}$  est élevée, c'est-à-dire le chargement statique en traction devient plus important.

**Variable caractéristiques :**

Contraintes max et min :  $\sigma_{max}$  et  $\sigma_{min}$  Variation de contrainte :  $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

Contrainte moyenne :  $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$  Rapport de contraintes :  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

Amplitude de la contrainte :  $\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$  Fréquence =  $\frac{1}{T}$

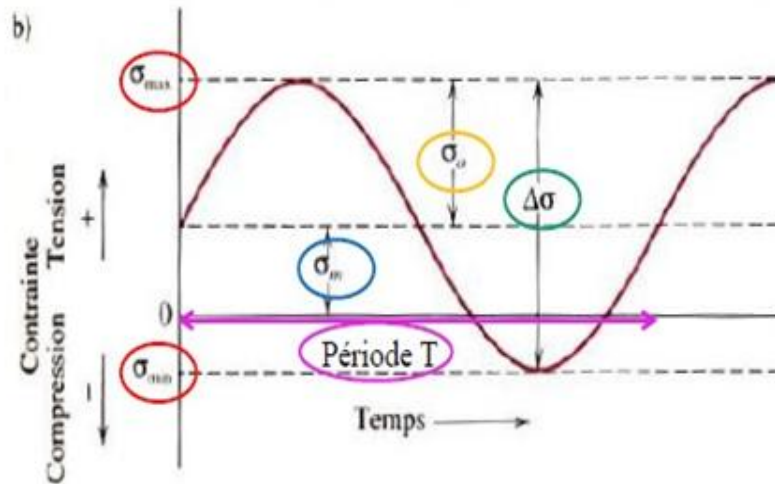


Figure IV.15 : Essai de fatigue avec chargement périodique.

La résistance à la fatigue est définie par la limite de fatigue, c'est-à-dire par la contrainte maximale qu'un métal peut supporter N cycles sans rupture (N est un grand nombre imposé par le cahier des charges,  $10^5$  à  $10^6$  et plus).

Pour la définir, on emploie le plus souvent une éprouvette animée d'un mouvement de rotation et subissant un effort de flexion qui provoque des contraintes alternées (traction – compression) suivant le cycle symétrique

$$\sigma_{max} = \sigma_{min}$$

#### Déroulement de l'essai :

La limite de fatigue s'établit par l'essai de dix éprouvettes au moins.

La première est soumise à une contrainte égale à 0,6 R pour l'acier ;

Le paramètre à déterminer est le nombre de cycles N qui entraîne la rupture.

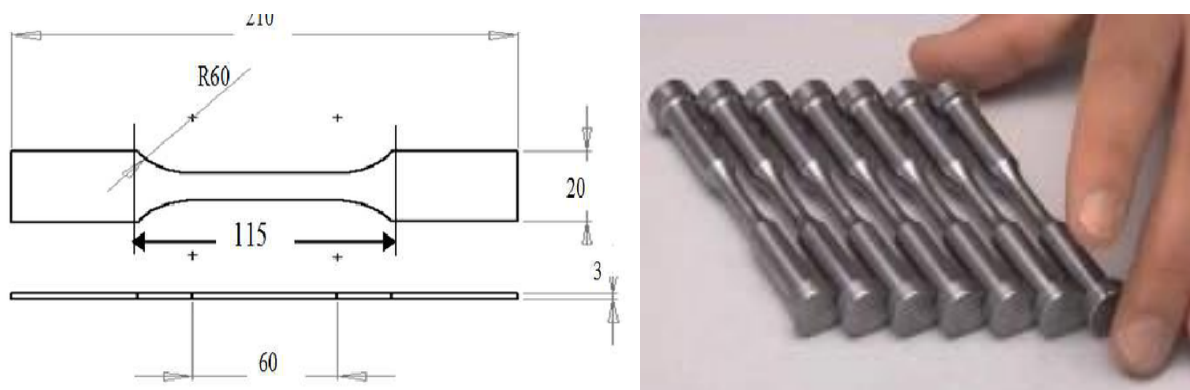
Les contraintes  $\sigma_2$  ,  $\sigma_3$  ,  $\sigma_4$ ...etc, appliquées successivement aux éprouvettes suivantes, sont diminuées chaque fois de 2 ou 4Kgf / mm<sup>2</sup> en fonction du nombre de cycles qui a provoqué la rupture de la première éprouvette.

Les résultats des essais sont portés sur le diagramme (courbe de wohler) dressé en coordonnées cartésiennes ou logarithmiques, qui donne la valeur des contraintes en fonction du nombre de

cycles N (voir figure V.17).

#### **IV.5.1 Type des éprouvettes :**

Les éprouvettes peuvent être à section circulaire ou parallélépipédique, et d'épaisseur constante ou variable, entaillées ou lisses. Les plus générales sont les éprouvettes toroïdales, à section circulaire variable. L'état de surface des éprouvettes doit être particulièrement soigné.



**Figure IV.16 : Géométrie des éprouvettes usinées pour l'essai de fatigue**

#### **IV. 5. 2 Courbe de Wöhler :**

L'essai de fatigue le plus simple consiste à soumettre chaque éprouvette " lisse ou entaillée " ou pièces soudées à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude maximale et de fréquence constantes, et à noter le nombre de cycles  $N_r$  au bout duquel la rupture se produit . On reporte  $N_r$ , en général sur une échelle logarithmique, en fonction de la contrainte maximale des cycles. A chaque éprouvette correspond un point du plan  $(\sigma-N)$  et, à partir d'un lot d'éprouvettes soumises à des contraintes maximales différentes, on obtient une courbe nommée courbe de Wöhler ou courbe S-N (Stress- Number of cycles). Cette courbe peut en général être décomposée en trois zones (figure IV.17) :

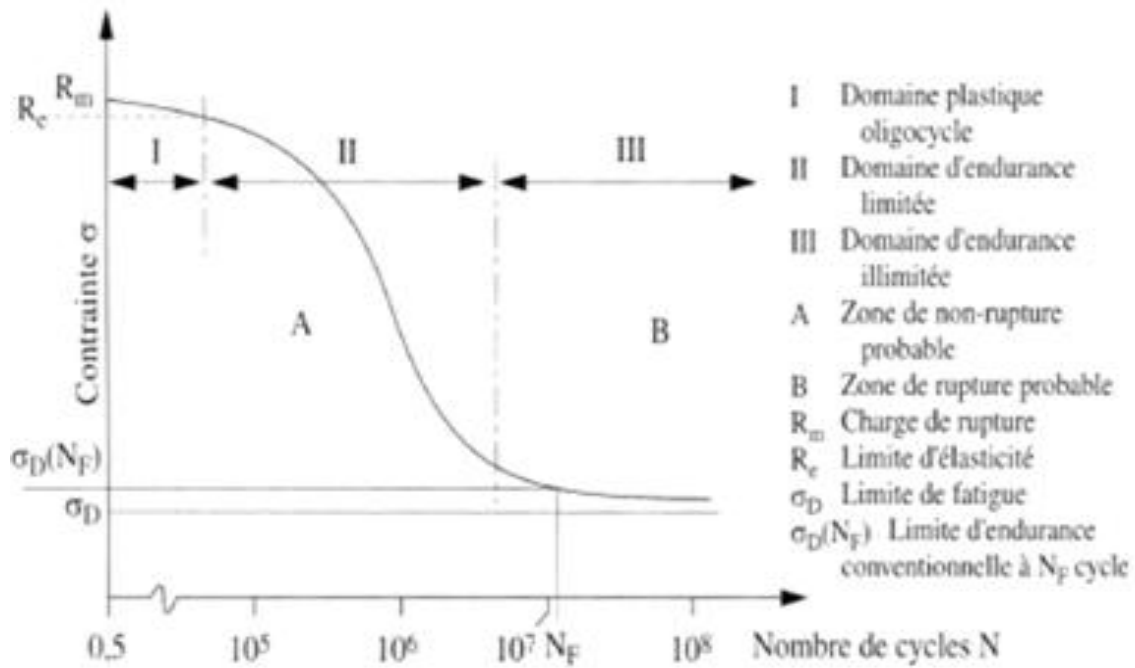


Figure IV.17 : Schéma de la courbe de Wöhler

- ✚ **Fatigue oligocyclique (I)** : sous une forte contrainte, la rupture intervient après un très petit nombre de cycles et succède à une forte déformation plastique.
- ✚ **Zone d'endurance limitée ou de fatigue (II)** : la rupture est atteinte après un nombre limité de cycles, nombre qui croît lorsque la contrainte diminue.
- ✚ **Zone d'endurance illimitée ou de sécurité (III)** : sous faible contrainte, la rupture intervient après un nombre très grand de cycles, d'une durée supérieure à la durée de vie de la pièce. La courbe de Wöhler présente généralement une variation de pente plus ou moins marquée autour de  $10^6$  à  $10^7$  cycles, suivie d'une zone (III) où la courbe tend vers une limite asymptotique parallèle à l'axe des  $N$ . En delà de cette valeur limite il n'y a jamais rupture par fatigue quel que soit le nombre de cycles appliqué. D est nommée limite de fatigue ou limite d'endurance. Cette limite peut ne pas exister ou être mal définie pour certains matériaux (aciers à haute résistance, métaux non ferreux).

**Travaux Dirigés-Chapitre I- Structures des solides**

**Exercice I.1 :**

On donne les paramètres cristallins des mailles des deux structures cristallines du fer :

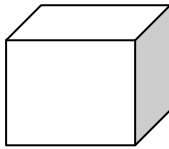
Fer  $\alpha$ (cubique centré) :  $a_1 = 286 \text{ pm}$

Fer  $\gamma$  ( cubique à faces centrées) :  $a_2 = 356 \text{ pm}$

$M_{\text{Fe}} = 56 \text{ g.mol}^{-1}$

a) Pour chacune des deux structures : placer les nœuds, donner sa compacité et calculer le rayon atomique du fer ?

b) Calculer la masse volumique du fer dans chacune de deux structures et conclure ?

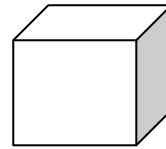


**Fe $\alpha$**

$C = ?$

$R_{\text{Fe}\alpha} = \dots \text{pm}?$

$\rho_{\text{Fe}\alpha} = ?$



**Fe $\gamma$**

$C = ?$

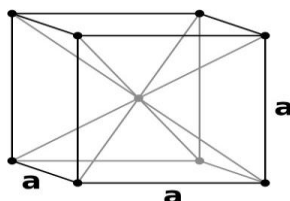
$R_{\text{Fe}\gamma} = \dots \text{pm}?$

$\rho_{\text{Fe}\gamma} = ?$

**Exercice I.2 : Structure Cristalline du Niobium**

Le niobium Nb, élément de numéro atomique  $Z = 41$  et de masse molaire  $M = 92,0 \text{ g mol}^{-1}$ , cristallise à température ambiante dans la structure cubique centrée CC de paramètre de maille  $a = 330 \text{ pm}$ . Les atomes occupent les sommets et le centre d'une maille cubique, voir ci-contre.

- 1 - Déterminer la population  $N$  de la maille.
- 2 - Calculer la masse volumique  $\rho$  du niobium.
- 3 - Déterminer le rayon métallique  $R$  du niobium en précisant au préalable où a lieu le contact entre les atomes.
- 4 - Définir et calculer la compacité  $C$  de la structure cubique centrée.



### Exercices I.3 : La Galène

L'élaboration du plomb par voie sèche repose sur l'extraction et l'exploitation d'un minerai appelé galène : le sulfure de plomb PbS. Ce minerai cristallise selon une structure du type chlorure de sodium, où les cations  $Pb^{2+}$  occupent les sites octaédriques d'un réseau CFC d'anions  $S^{2-}$ .

Données :  $M_{Pb} = 207,2 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;  $M_S = 32,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  ; densité de la galène 7,62.

- 1 - Représenter la maille élémentaire de la galène.
- 2 - Déterminer la coordinence de chacun des ions de cette structure.
- 3 - Déterminer le paramètre de maille  $a$  de la structure.

### Exercice I.4 : Alliage du Cuivre

Le cuivre peut être utilisé pur, notamment pour des applications exploitant sa haute conductivité électrique, ou bien en alliage, tel que le laiton (alliage cuivre-zinc) et le bronze (alliage cuivre-étain).

Données :

- Masse volumique du cuivre pur :  $\rho_{Cu} = 8,96 \text{ kg m}^{-3}$  ;
- Masses molaires :  $M_{Cu} = 63,5 \text{ g mol}^{-1}$  ;  $M_{Ag} = 108 \text{ g mol}^{-1}$  ;  $M_{Zn} = 65,4 \text{ g mol}^{-1}$  ;
- Rayons métalliques :  $r_{Cu} = 128 \text{ pm}$  ;  $r_{Ag} = 144 \text{ pm}$  ;  $r_{Zn} = 134 \text{ pm}$ .

Le cuivre pur cristallise dans un réseau cubique faces centrées.

1. Représenter la maille et déterminer sa population. Déterminer le paramètre de maille  $a$ .

Lorsqu'un atome a un rayon voisin de celui du cuivre, il peut former des alliages dits de substitution, où l'hétéro-atome remplace un ou plusieurs atomes de cuivre par maille.

2. L'alliage Cu-Ag est utilisé pour augmenter la résistance à la température du matériau. Dans cette structure, les atomes d'argent remplacent les atomes de cuivre aux sommets de la maille CFC.

2.a) Faire un schéma de la maille. Quelle est la stœchiométrie de l'alliage ?

2.b) Déterminer le nouveau paramètre de maille  $a'$  ainsi que la masse volumique  $\rho'$  de l'alliage. Commenter.

3. Le laiton, alliage Cu-Zn, est l'alliage le plus fabriqué. Il permet d'augmenter la résistance mécanique et la dureté du cuivre, mais diminue la densité et la conductivité thermique. La structure du laiton peut être décrite par un réseau cubique hôte d'atomes de cuivre avec un atome de zinc au centre du cube.

## Exercices

---

3.a Faire un schéma de la maille. Quelle est la stœchiométrie de l'alliage ?

3.b Déterminer le nouveau paramètre de maille  $a''$  ainsi que la masse volumique  $\rho''$  de l'alliage.

4. Les différences structurales induites par la substitution sont responsables d'une modification des propriétés de conduction électrique et de résistance mécanique. Proposer une explication

### Travaux Dirigés-Chapitre II-Désignation des Matériaux

#### Exercice II. 1 :

a) Définir les termes suivants :

Alliage ferreux et alliage non ferreux, Acier, Fonte, Acier faiblement allié, acier fortement allié, alliage métallique, alliage d'aluminium,

b) Quelles sont les différences entre un acier et une fonte.

c) Quelles sont les différences entre un acier faiblement allié et un acier fortement allié.

d) Comment appelle-t-on les alliages suivants : Cuivre + Zinc, Cuivre + étain, Cuivre + Aluminium, Cuivre + Nickel, Cuivre + Nickel + Zinc.

#### Exercice II.2 :

Etablir la désignation des alliages ferreux suivants :

a) Acier fortement allié (inoxydable) contenant 0.05% de carbone, 18% de chrome et 10% de nickel.

b) Acier faiblement allié contenant 0.42% de carbone, 1% de chrome et quelques traces de molybdène (le facteur multiplicatif de Cr est 4).

Donner la signification détaillée des désignations des alliages suivants :

Désignations	Significations
36 Ni Cr Mo 1	.....
GC40	.....
EN GJN X300 Cr Ni Si 9-5-2	.....
EN AW-Al Mg1Cu 5 Si 1	.....
Cu Zn 39 Pb 2	.....
X 5 Cr Ni Mo 17-12	.....

#### Exercice 3 : Désignations des métaux :

A. Donner la signification de chacune des désignations suivantes :

## Exercices

55C3, 54CV4, 30CND6, 37C4, 41C4, 55C3, 35NCD16, 42CD4, 16MC5, 36NCD16, 51S7, 30CND8, 20W5,  
Z5CND17-12, Z4CDS8, Z30C13, Z2CN19-11, Z5CN18-10, Z5CND17-12, Z6CNT18-10, Z6CNDT17-12, Z6CNT18-11, Z2CN19-11

B. Donner la désignation normalisée d'un :

Acier faiblement allié avec 0,51% de Carbone, 1% de Chrome et 0,1% de Vanadium  
Acier fortement allié avec 0,02 % de carbone, 18 % de chrome et 8% de nickel

Acier non allié à 0,8% de carbone

Acier rapide à 6% de tungstène, 3% de vanadium, 5% de molybdène et 8% de Cobalt

### Travaux Dirigés-Chapitre III-Diagramme de phases

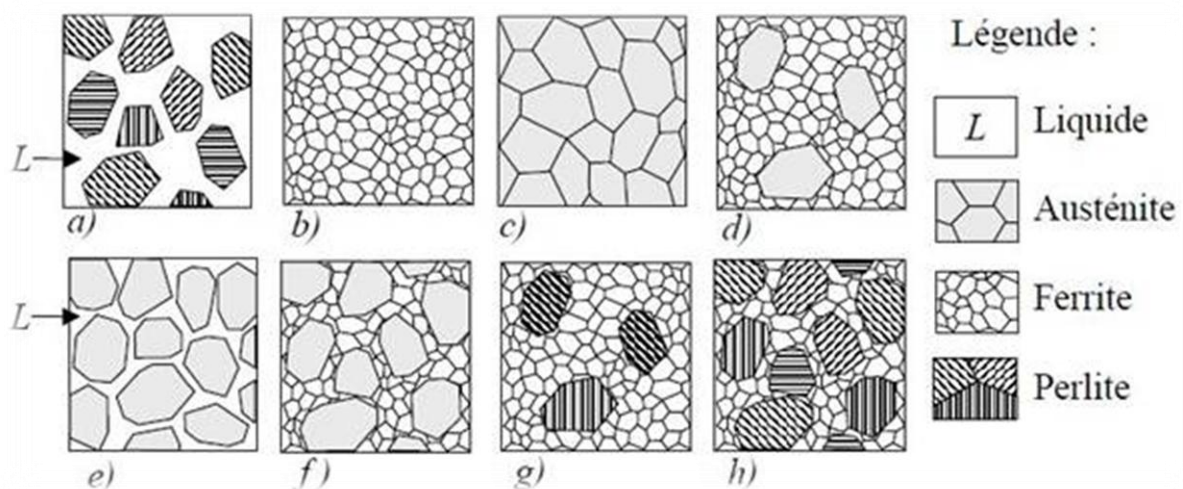
#### Exercice III.1

Considérez le diagramme d'équilibre « fer – carbone » (Fe – C) donné en annexe. La cémentite  $\text{Fe}_3\text{C}$  a une composition massique en carbone égale à 6,68% m.

1. À quelle(s) température(s) le fer pur solide subit-il une transformation allotropique au chauffage ? Précisez le changement de phase qui se produit au cours de la transformation allotropique. Un alliage « fer – carbone » contenant 0,6%C est refroidi

à l'équilibre depuis l'état liquide jusqu'à la température ambiante (20 0C).

2. Lequel des schémas présentés ci-dessous représente la microstructure de cet alliage aux températures suivantes : 1460 0C, 1400 0C, 724 0C et 20 0C ?



Considérez maintenant un acier de composition eutectoïde.

## Exercices

3. Quelles sont les phases en présence et leur proportion à la température ambiante (20 °C) ?
4. Quelles sont les températures de début et de fin de solidification de cet acier ?
5. Lequel des schémas (proposés ci-dessus) représente la microstructure de cet acier à 1420 °C ?

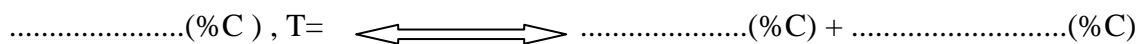
### Exercice III.2

Soit le diagramme d'équilibre fer-cémentite (figure 5)

1- En se référant au diagramme de la figure 5, on vous demande d'écrire les trois réactions isothermes présentes dans le diagramme, de préciser, pour chaque réaction, le nom, la température, les phases présentes ainsi que leurs compositions chimiques.

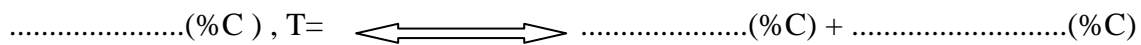
#### 1<sup>ère</sup> réaction

Nom :



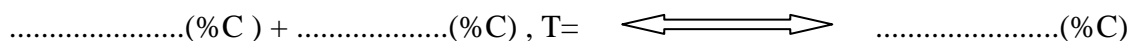
#### 2<sup>ème</sup> réaction

Nom :



#### 3<sup>ème</sup> réaction

Nom :



2- La perlite est l'agrégat d'une réaction isotherme. Elle est composée de deux phases. On vous demande de donner le nom de cette réaction isotherme, le nom, la composition chimique et la fraction massique de chacune des phases qui compose la perlite à la température de la réaction.

Nom de la réaction  Température .....° C	Phase 1.....%C  Phase 2 .....% C	$Y_{\text{Phase 1}} \dots \dots \dots \times 100 = \dots \dots \dots \%$
--	--	--

3. Refaire la même chose pour l'agrégat lédéburite ?

Nom de la réaction  Température .....° C	Phase 1.....%C  Phase 2 .....% C	$Y_{\text{Phase 1}} \dots \dots \dots \times 100 = \dots \dots \dots \%$
--	--	--

4. Ecrire les noms des phases présentes dans chaque domaine du diagramme Fer-Cémentite de la figure ci après.

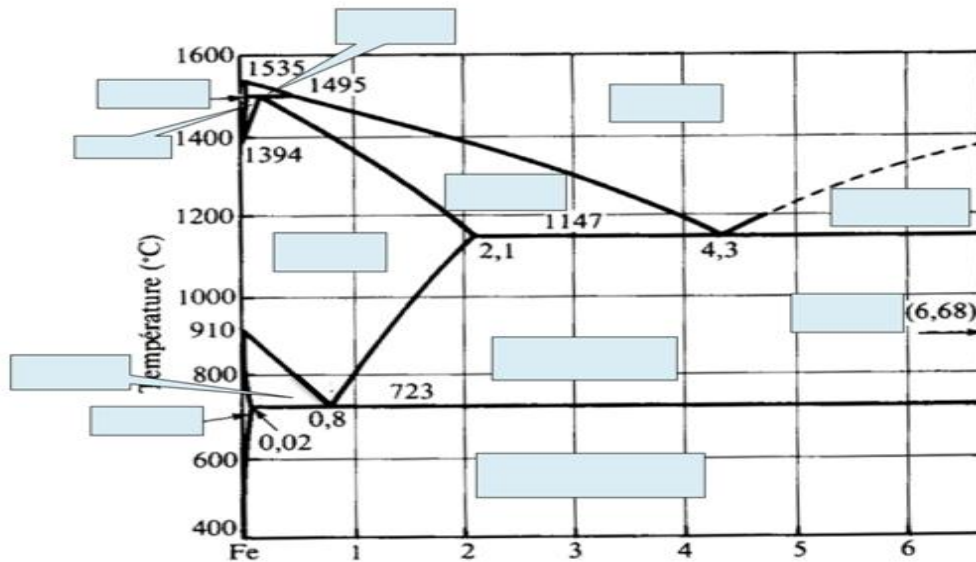


Diagramme d'équilibre Fer-cémentite.

### Exercice III.3

L'observation micrographique d'une pièce en acier non allié permet d'évaluer une présence d'environ 20% de ferrite et 80% de perlite dans la structure.

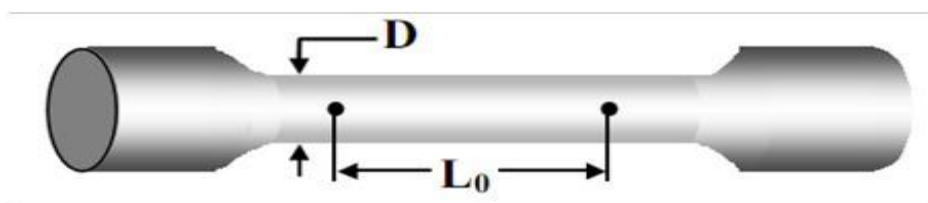
1. Quelle est la composition chimique exacte de cet acier en vous référant aux nuances d'aciers normalisés selon norme européenne.
2. Calculer la proportion exacte de chaque phase présente dans l'acier et donner leur composition chimique.
3. L'acier non allié à 0,45% de carbone est refroidi depuis l'état liquide à l'aide d'une vitesse lente. Décrire les transformations qu'il aurait subies depuis l'état liquide jusqu'à l'ambiante.

**Essais Mécaniques**

**IV.1 Exercice 1 :**

On réalise à la température 20°C un essai de traction sur une éprouvette d'un alliage de titane « l'inconel 718 » qui est un superalliage réfractaire (caractérisé par des excellentes propriétés mécaniques à hautes températures) et qui est souvent utilisé pour la fabrication des disques de turbine dans les moteurs d'avions. Cette éprouvette est caractérisée par les dimensions suivantes :

section circulaire  $S_0$  de diamètre initial  $D_0=12$  mm, la longueur initiale de référence  $L_0 = 40$  mm.



1-Tracer la courbe brute ( Effort -Déplacement ).

2- Compléter le tableau suivant, puis tracer la courbe conventionnelle:

<b>F(KN)</b>	<b>0</b>	<b>56.5</b>	<b>113.1</b>	<b>137.6</b>	<b>139.4</b>	<b>151.3</b>	<b>155.6</b>	<b>161.6</b>	<b>165.6</b>	<b>165.6</b>	<b>165.6</b>
<b><math>\Delta L</math>(mm)</b>	0	0.095	0.190	0.232	0.235	0.500	1	2	4	6	8
<b>R(Mpa)</b>											
<b>e</b>	0.0										

3- On se basant sur la courbe conventionnelle de traction, calculer :

- ✓ La valeur du module d'Young **E** (en GPa) ?
- ✓ La limite proportionnelle d'élasticité **Re0,2%** (en MPa) ?
- ✓ La limite conventionnelle d'élasticité **Re** (en MPa) ?
- ✓ La résistance à la traction **Rm** (en MPa) ?
- ✓ La valeur de la déformation permanente **A** (en %) après rupture de l'éprouvette ?

4- Compléter le tableau suivant, puis tracer la courbe rationnelle:  $\sigma = f(\epsilon)$ .

## Exercices

<b>F(KN)</b>	<b>0</b>	<b>56.5</b>	<b>113.1</b>	<b>137.6</b>	<b>139.4</b>	<b>151.3</b>	<b>155.6</b>	<b>161.6</b>	<b>165.6</b>	<b>165.6</b>	<b>165.6</b>
<b><math>\Delta L</math>(mm)</b>	0	0.095	0.190	0.232	0.235	0.500	1	2	4	6	8
<b>R(Mpa)</b>											
<b>e</b>	0.0										
<b><math>\sigma</math></b> <b>(MPa)</b>											
<b><math>\epsilon</math></b>											

5- Montrer que  $\sigma = R(1 + e)$  sachant que la déformation plastique n'entraîne pas de variation de volume.  $S_0 L_0 = S L = S(L_0 + \Delta L)$

6- Ecrire la loi de comportement élastique ( loi de Hooke ) pour **l inconel 718**

7- Écrire la loi de comportement plastique pour **l'inconel 718** pour cela identifier les paramètres de la loi de Hollomn qui s'écrit : (K et n) de  $\sigma = K \cdot (\epsilon)^n$  ou  $\ln(\sigma) = \ln(K) + n \cdot \ln(\epsilon)$ .

8- Après avoir imposé un allongement initial  $\Delta L = 2$  mm à une éprouvette de traction identique à la précédente, on annule la force appliquée à cette éprouvette. Puis, on réalise un nouvel essai de traction sur cette éprouvette pré-écroui

9- Quelles sont les propriétés mécaniques susceptibles d'être modifiées pour ce matériau pré-écroui ? Donner les nouvelles valeurs des propriétés modifiées ?

### IV.2 Ténacité :

Un tuyau d'acier de diamètre  $D = 1$  m et d'épaisseur  $e$  doit supporter une pression interne  $P$  de 25 MPa. Sous l'effet de cette pression, une contrainte tangentielle de traction  $\sigma_t$  apparaît dans le tuyau et sa valeur est donnée par la relation suivante :

$$\sigma_t = \frac{PD}{2e}$$

Le tuyau peut contenir des défauts de fabrication longitudinaux (voir figure ci-dessous), qui ne sont détectables qu'à condition d'avoir une profondeur minimale  $a = 5$  mm et une longueur  $c$  minimale de 10 mm. Le facteur de forme  $\alpha$  associé à ces défauts est égal à 1,2

Les normes de sécurité applicables à ces tuyaux exigent que les deux conditions suivantes soient simultanément satisfaites :

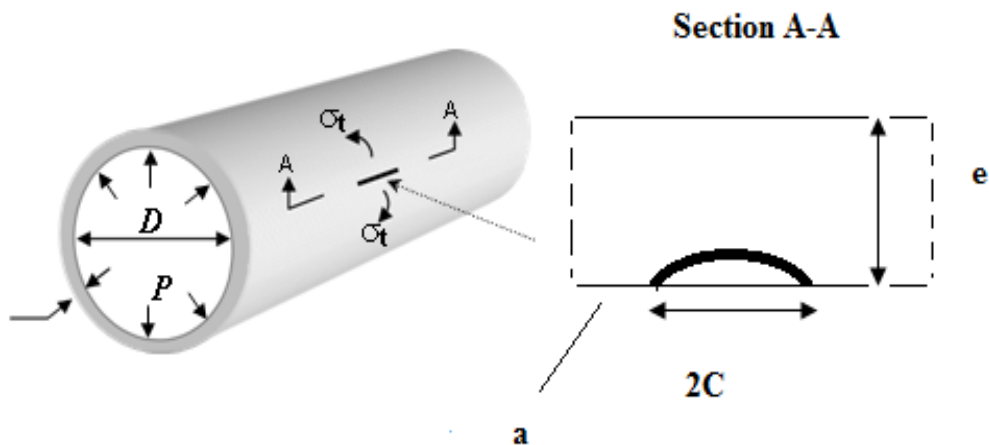
- Condition 1 : la contrainte tangentielle  $\sigma_t$  ne doit pas dépasser la moitié de la limite d'élasticité de l'acier.

## Exercices

- Condition 2 : le facteur maximal d'intensité de contrainte  $K_{max}$ , associé aux défauts, doit rester inférieur à la moitié du facteur critique d'intensité de contrainte  $K_{IC}$  de l'acier.

Pour ces tuyaux, vous avez le choix entre trois aciers A, B, et C, dont les propriétés mécaniques sont les suivantes

Acier	$R_{e0,2}$ (MPa)	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )
A	450	140
B	600	90
C	950	70



- a) Quel acier choisirez-vous et avec quelle épaisseur  $e$  (exprimée en mm) pour avoir un tuyau qui aura la plus faible masse par unité de longueur ?

### IV.3 : Fatigue

Pour fabriquer un axe dont le plan est donné ci-dessous, on utilise l'acier 4340 à l'état trempé et revenu. Après une trempe, l'évolution des propriétés mécaniques de cet acier en fonction de la température de revenu est donnée à la figure suivante.

En service, cet axe est soumis à une contrainte nominale de traction cyclique variant de 0 à 500 MPa (N.B. : la contrainte nominale est définie au niveau de la section la plus faible).

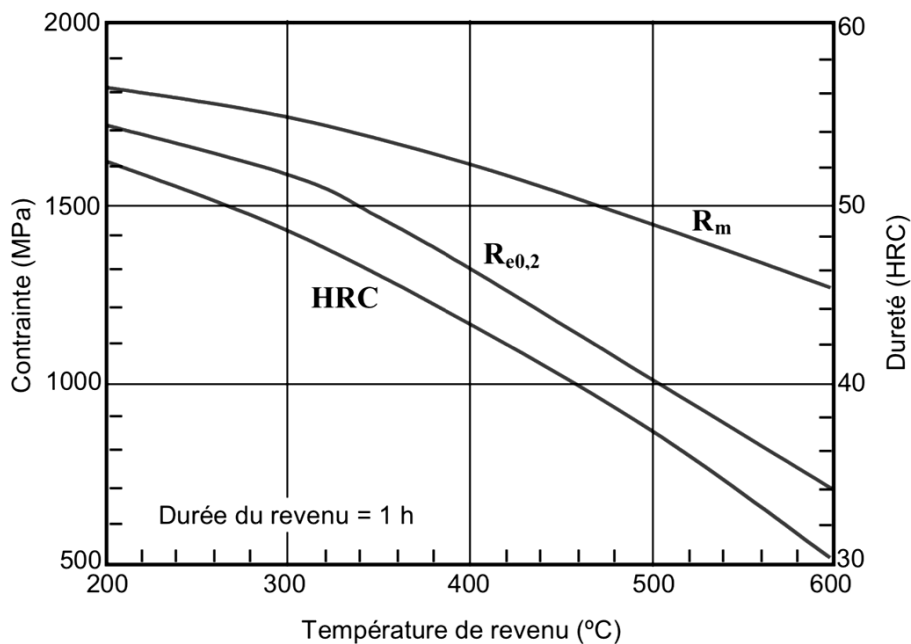
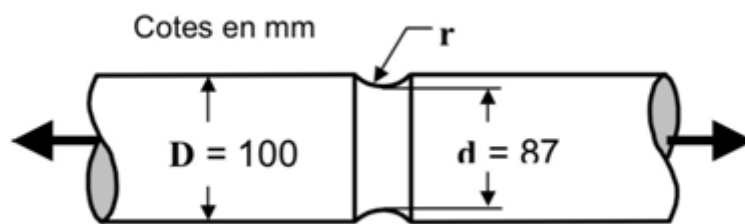
- a) Quelle doit être la valeur du rayon de courbure  $r$  de la gorge pour qu'en tout point de l'axe, la contrainte locale ne dépasse 60% de la limite d'élasticité  $R_{e0,2}$ , sachant que  $R_{e0,2} = 1250$  MPa ?
- b) Quelle est la valeur du rapport  $R$  caractérisant le chargement cyclique?

## Exercices

c) À l'aide de la figure donnant la courbe de Wöhler (amplitude de la contrainte cyclique en fonction du nombre de cycles), déterminez la durée de vie de l'axe ayant le rayon de gorge trouvé à la question c) ci-dessus ?

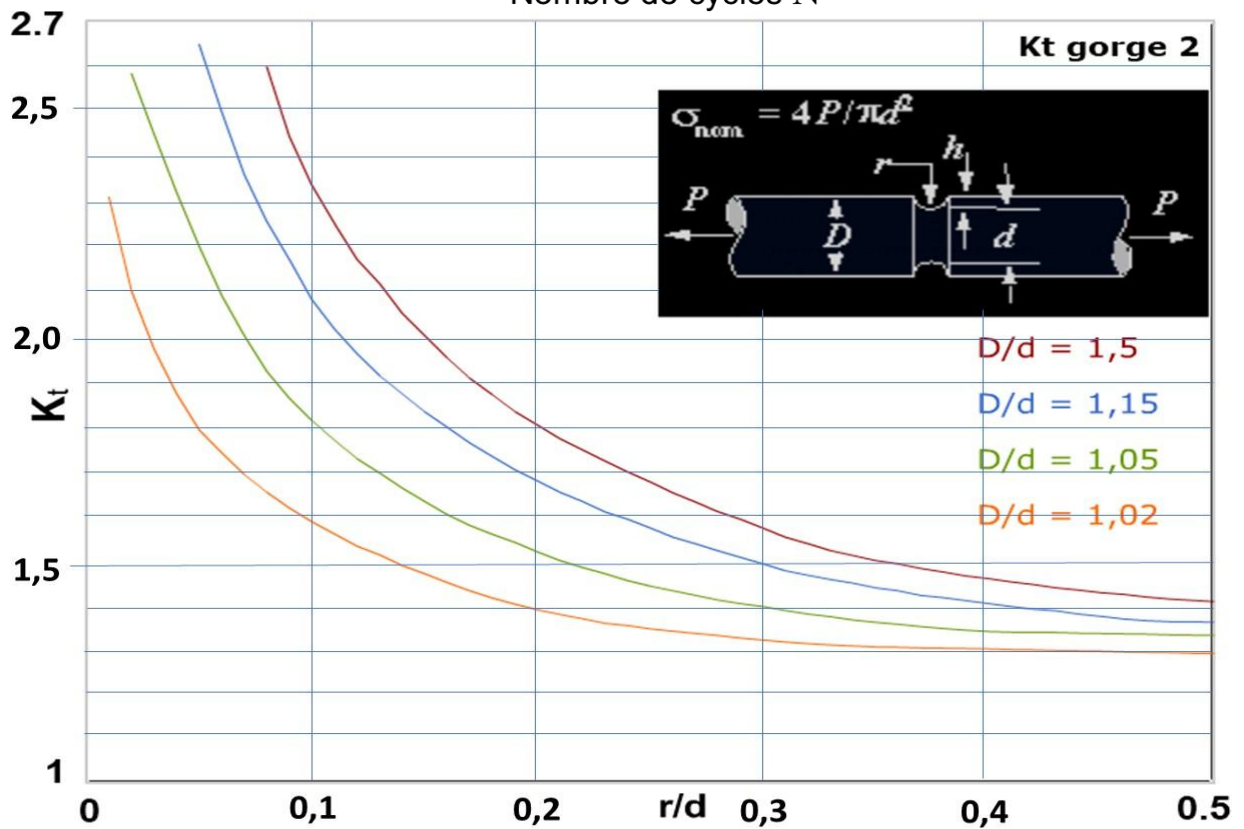
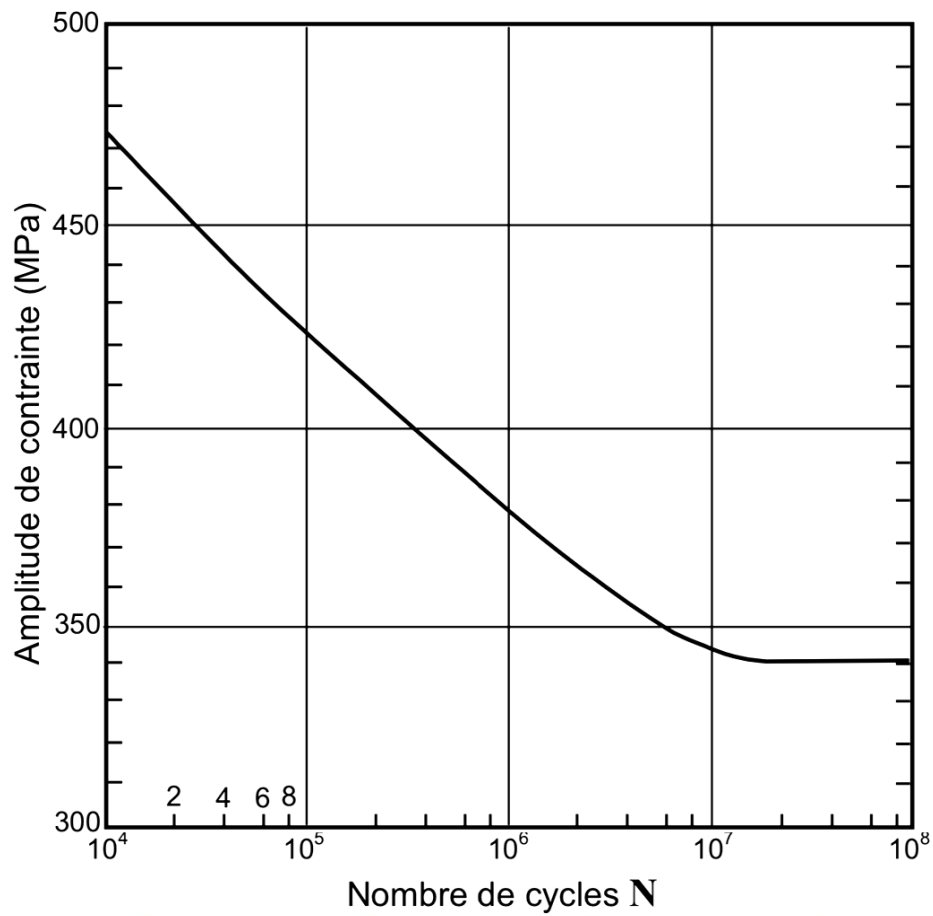
d) Quelle devrait être la valeur du rayon de courbure  $r$  de la gorge pour que l'axe est une durée de vie infinie, sachant que les diamètres  $D$  et  $d$  ne peuvent être modifiés ?

N.B. : Utilisez l'abaque « Kt gorge 2 » (page ci-dessous « Diagrammes et figures) pour calculer les facteurs de concentration de contrainte. Sur un tel abaque  $K_t = f(r/d)$ , on peut faire des extrapolations linéaires entre les courbes de cette figure.



## Exercices

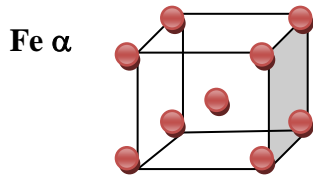
---



# -Corrigés des Exercices

## I. Structures Métalliques

### Exercice I. 1 :



$$r_{\alpha} = \frac{a_1\sqrt{3}}{4}$$

$$\text{AN : } r_{\alpha} = \frac{286\sqrt{3}}{4} = 123.84 \cong 124 \text{ pm}$$

$$\text{RFe}_{\alpha} = 124 \text{ pm}$$

$$\rho = \frac{m}{V} ; m = \frac{2 \cdot MFe}{NA} ; V = a_1^3$$

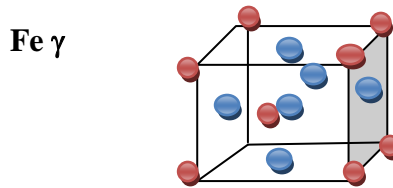
AN :

$$m = \frac{2 \times 56E^{-3}}{6.022E^{23}} = 1.86E^{-25} \text{ [Kg]}$$

$$V = 286E^{-12} = 2.34E^{-29} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\rho = \frac{1.86}{2.34} E^4 = 7950.87 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

Conclusion :



$$r_{\alpha} = \frac{a_2\sqrt{3}}{4}$$

$$\text{AN : } r_{\gamma} = \frac{356\sqrt{2}}{4} = 125.87 \cong 126 \text{ pm}$$

$$\text{RFe}_{\gamma} = 126 \text{ pm}$$

$$\rho = \frac{m}{V} ; m = \frac{4 \cdot MFe}{NA} ; V = a_2^3$$

AN :

$$m = \frac{4 \times 56}{6.022E^{23}} = 3.72E^{-22} \text{ [Kg]}$$

$$V = 356E^{-10} = 4.51E^{-23} \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\rho = \frac{3.72}{4.51} 10 = 8.25 \text{ [g} \cdot \text{cm}^{-3}\text{]}$$

Lorsque le fer passe de la structure C.C en C.F.C il gagne 3.8% en terme de masse volumique. Mais, cette variation est accompagnée par un retrait volumique pour ne pas violer le principe de la conservation de la masse. Il ne faut pas avoir l'esprit confus d'une part par le phénomène du retrait volumique qui a lieu lors de la transformation allotropique et d'autre part par la supériorité de la maille C.F.C par rapport à C.C ( $a_2 > a_1$ ).

### Exercice I. 2 :

1- Un atome sur un des sommets est partagé entre huit mailles et compte pour 1/8, l'atome central n'appartient qu'à une seule maille, donc

$$N = 8 \times \frac{1}{8} + 1 =$$

## -Corrigés des Exercices

---

2. La masse d'un atome de niobium est égale à  $m_{\text{Nb}} = M/N_A$ , la masse d'une maille vaut donc  $2M/N_A$ , d'où

$$\rho = \frac{2M}{N_A a_3} = 8.51.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$$

3. La distance entre atomes situés sur deux sommets vaut  $a$ , celle entre atomes situés sur un sommet et au centre de la maille vaut  $a\sqrt{3}/2 < a$  : le contact a donc lieu le long de la grande diagonale du cube. Ainsi, en comptant successivement les atomes,

$$a\sqrt{3} = R + 2R + R \text{ d'où } R = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot a = 143 \text{ pm}$$

4. La compacité est la proportion du volume de la maille réellement occupé par la matière. Dans le cas de la structure CC.

$$C = 2 \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3}{a^3} = \frac{8\pi}{3} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{4}\right)^3 = \pi \frac{\sqrt{3}}{8} = \text{donc } C = 0.68$$

### Exercice I.3 : Galène

1. Voir figure ci-dessous.

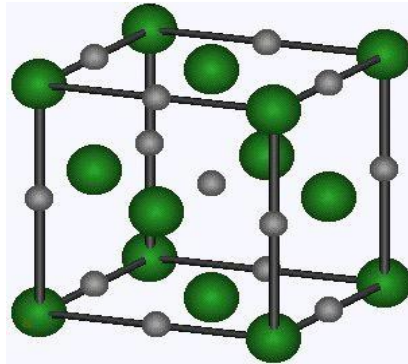


Figure 1 : Maille élémentaire de la galène. Les anions  $S^{2-}$  sont représentés en vert, les cations  $Pb^{2+}$  en gris.

2. Raisonons d'abord sur un cation. Le plus simple pour la visualisation est de raisonner à partir du cation situé au centre du cube. Ses plus proches voisins sont les anions situés au centre des six faces du cube, distants de  $a/2$ . Les cations ont donc une coordinence 6.

Raisonons maintenant sur un anion, en considérant par exemple celui situé au centre de la face avant de la maille représentée. Ses plus proches voisins sont les cations situés au milieu des arêtes du cube, auquel il ne faut pas oublier d'ajouter le cation central de la maille représentée et le cation

## -Corrigés des Exercices

central de l'autre maille à laquelle appartient la face considérée. On en déduit que les anions ont également une coordinence 6.

3. La population d'une maille CFC est de  $4 \left( 8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} \right)$ , d'où on déduit la population en anions  $\text{NS}_{2-} = 4$ , et elle compte quatre sites octaédriques en propre (1 au centre et 1 au centre de chacune des 12 arêtes, ces arêtes étant partagées entre mailles). On en déduit la population en cations  $\text{NPb}_{2+} = 4$ . Ainsi, la masse volumique de la galène vaut :

$$\rho = \frac{4 M_{\text{Pb}} + 4 M_{\text{S}}}{N_A a^3} \quad \text{d'où} \quad a = 4 \cdot \frac{(M_{\text{Pb}} + M_{\text{S}})}{N_A \cdot \rho} ; \rho = 596 \text{ pm}$$

### Exercice I.4 : Alliage du Cuivre

$N = 8 \times 1 + 6 \times 1 = 4$ . Dans une maille CFC, il y a contact entre atomes le long de la diagonale d'une face. Ainsi,

$$a\sqrt{2} = 4r_{\text{Cu}} \quad \text{d'où} \quad a = \frac{4r_{\text{Cu}}}{\sqrt{2}} = 361 \text{ pm}$$

Le schéma doit se faire comme suit :

**2.a** La maille compte  $8 \times \frac{1}{8} = 1$  atome d'argent et  $6 \times \frac{1}{2} = 3$  atomes de cuivre, l'alliage est donc **Cu<sub>3</sub>Ag**

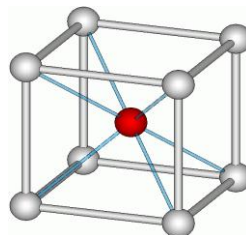
**2.b** Le contact entre atomes a lieu le long de la diagonale d'une face, donc :

$$a'\sqrt{2} = 2r_{\text{Cu}} + 2r_{\text{Ag}} \quad \text{d'où} \quad a' = 385 \text{ pm} > a$$

Ce qui est logique puisque le rayon métallique de l'argent est supérieur à celui du cuivre. La masse volumique vaut

$$\rho^0 = \frac{3M_{\text{Cu}} + M_{\text{Ag}}}{N_A a'^3} = 8,71 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot$$

**3.a** Voir figure 3. On compte  $8 \cdot \frac{1}{8} = 1$  atome de cuivre par maille et 1 atome de zinc, ce qui donne bien la stœchiométrie CuZn annoncée.



**Figure 3 : Maille élémentaire du laiton.** Les atomes de cuivre sont représentés en gris, l'atome de zinc en rouge.

## -Corrigés des Exercices

---

3.b . Le contact a lieu le long de la grande diagonale du cube, donc

$$a''\sqrt{3} = 2 r_{Cu} + 2 r_{Zn} \text{ d'où } a'' = 303 \text{ pm}$$

La masse volumique vaut

$$\rho'' = \frac{M_{Cu} + M_{Zn}}{N_A a''^3} = 7,71 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

4. On constate à partir des résultats précédents que les mailles sont déformées dans les alliages, ce qui a un effet sur la facilité de déplacement des électrons de conduction au sein du cristal, et donc un effet sur les propriétés de conduction électrique. La présence d'hétéroéléments rend plus difficile le glissement des plans de cations les uns sur les autres dans le matériau, ce qui explique la modification des propriétés mécaniques.

### II-Désignation des Matériaux

#### Exercice II. 1 :

a) Définir les termes suivants:

Alliage ferreux et alliage non ferreux: alliage dont la matrice est le fer, sinon c'est un non ferreux

Acier: Alliage fer-cementite avec une teneur en carbone de moins de 2% .

Fonte: Alliage fer-cementite avec une teneur en carbone comprise entre 2 et 6,67% .

Acier faiblement allié: Acier allié dont aucun élément d'alliage ne dépasse une teneur supérieur à 5% .

acier fortement allié: Acier allié dont au moins un élément d'alliage dépasse une teneur de 5% .

alliage métallique: Un alliage métallique est composé d'un métal de base (matrice) et de un ou plusieurs autres métaux (ou non métaux comme le carbone) appelé(s) élément(s) d'alliage.

alliage d'aluminium: Alliage dont la matrice est l'aluminium.

b) Quelles sont les différences entre un acier et une fonte: c'est la teneur en carbone, pour l'acier ,elle est inférieur à 2% , pour le fonte elle est comprise entre 2 et 6,67% .

c) Quelles sont les différences entre un acier faiblement allié et un acier fortement allié: .c'est la teneur en éléments d'alliage, pour le premier aucune teneur ne dépasse 5%, pour le second au moins un élément d'alliage dépasse 5%.

d) Comment appelle-t-on les alliages suivants : Cuivre + Zinc, Cuivre + étain, Cuivre +Aluminium, Cuivre + Nickel, Cuivre + Nickel + Zinc:

- Cu-Zn : Les laitons.

-Cu-Sn: Les bronzes.

## -Corrigés des Exercices

- Cu-Al: Les cupro-aluminiums .
- Cu-Ni: Les cupro-nickels.
- Cu-Zn-Ni : Les maillechorts.

### Exercice II. 2 :

- a) X 5 Cr Ni 18-10
- b) 42 Cr Mo 4

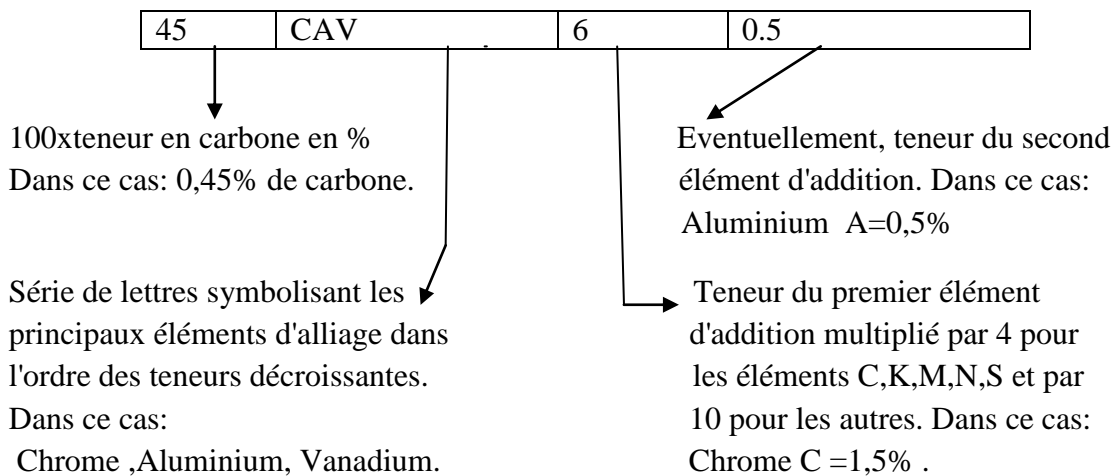
Désignations	Significations
36 Ni Cr Mo 1	Acier faiblement allié à 0.36% de carbone , 4% de nickel et quelques traces de chrome et de molybdène
GC40	Acier moulé non allié à 0.4% de carbone.
EN GJN X300 Cr Ni Si 9-5-2	Fonte blanche sans graphite à 3% de carbone, 9% de chrome, 5% de nickel et 2% de silicium.
EN AW-Al Mg1Cu 5 Si 1	Alliages d'aluminium corroyé à 1% de Magnésium, 5% de cuivre et 1% de silicium
Cu Zn 39 Pb 2	Alliage de cuivre (laiton) à 39% de zinc et 2% de plomb.
X 5 Cr Ni Mo 17-12	Acier fortement allié à 0.05% de carbone, 17% de chrome, 12% de nickel et quelque trace de molybdène

### Exercice II. 3 :

A/ Signification de chacune des désignations suivantes :

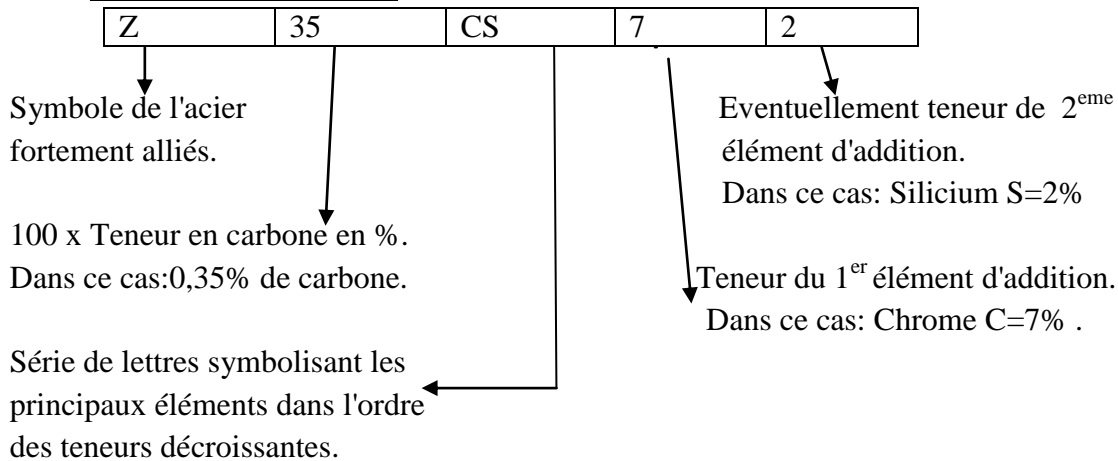
Rappel de désignation des aciers alliés:

#### Aciers faiblement alliés:



## -Corrigés des Exercices

### Aciers fortement alliés:



55C3: acier faiblement allié à 0,55% de carbone et 0,75% ( 3/4)de chrome .

54CV4: acier faiblement allié à 0,54% de carbone , 1% ( 4/4)de chrome et du vanadium à moins de 1% .

30CND6: acier faiblement allié à 0,30% de carbone , 1,5% ( 6/4)de chrome et du nickel et du molybdene à moins de 1% .

37C4: acier faiblement allié à 0,37% de carbone , 1% ( 4/4)de chrome .

41C4: acier faiblement allié à 0,41% de carbone , 1% ( 4/4)de chrome .

35NCD6: acier faiblement allié à 0,35% de carbone , 1,5% ( 6/4)de nickel, du chrome et du molybdene à moins de 1,5% .

42CD4: acier faiblement allié à 0,42% de carbone , 1% ( 4/4)de chrome et du molybdene à moins de 1% .

16MC5: acier faiblement allié à 0,16% de carbone , 1,25% ( 5/4)de manganese et du chrome à moins de 1%.

36NCD16: acier faiblement allié à 0,36% de carbone , 4% ( 16/4)de nickel ,du chrome et du molybdene à moins de 4%.

51S7: acier faiblement allié à 0,37% de carbone , 1,75% ( 7/4) de silicium .

30CND8: acier faiblement allié à 0,30% de carbone , 2% ( 8/4) de chrome , du nickel et du molybdene à moins de 2%.

20W5: acier faiblement allié à 0,20% de carbone , 0,5% ( 5/10)de tungstene .

Z5CND17-12: Acier fortement allié à 0,05% de carbone, 17% de chrome , 12% de nickel et moins de 12% de molybdene .

Z4CDS8: Acier fortement allié à 0,04% de carbone, 8% de chrome , du molybdene et du silicium à moins de 8%.

Z30C13: Acier fortement allié à 0,30% de carbone et 13% de chrome .

Z2CN19-11: Acier fortement allié à 0,02% de carbone, 19% de chrome , 11% de nickel .

Z5CN18-10: Acier fortement allié à 0,05% de carbone, 18% de chrome , 10% de nickel ( acier inoxydable) .

## -Corrigés des Exercices

Z5CND17-12: Acier fortement allié à 0,05% de carbone, 17% de chrome , 12% de nickel et moins de 12% de molybdene .

Z6CNT18-10: Acier fortement allié à 0,06% de carbone, 18% de chrome , 10% de nickel et moins de 10% de titane .

Z6CNDT17-12: Acier fortement allié à 0,06% de carbone, 17% de chrome , 12% de nickel et moins de 12% de molybdene et du titane.

Z6CNT18-11: Acier fortement allié à 0,06% de carbone, 18% de chrome , 11% de nickel et moins de 11% de titane .

Z2CN19-11: Acier fortement allié à 0,02% de carbone, 19% de chrome et 11% de nickel .

### **B. Donner la désignation normalisée:**

- Acier faiblement allié avec 0,51% de Carbone, 1% de Chrome et 0,1% de Vanadium:  
**51 CV4-0,1**
- Acier fortement allié avec 0,02 % de carbone, 18 % de chrome et 8% de nickel:  
**2CN72-8**
- Acier non allié à 0,8% de carbone:  
**C80**
- Acier rapide à 6% de tungstène, 3% de vanadium, 5% de molybdène et 8% de Cobalt:  
**Z85WVDK6-3-5-8**

### Travaux Dirigés-Chapitre III-Diagramme de phases

#### **Exercice III.1 :**

1. Transformation allotropique du fer pur à l'état solide :

T°(C)	910	1394
Transformation	$\alpha \longleftrightarrow \gamma$	$\gamma \longleftrightarrow \delta$

2. Microstructure d'un acier à 0.6% m à diverses températures :

T(°C)	<b>1460</b>	<b>1400</b>	<b>724</b>	<b>20</b>
Microstructures	<b>e</b>	<b>c</b>	<b>f</b>	<b>h</b>

3. Phases et proportions dans un acier eutectoïde à 20 °C.

Phase	$\alpha$	$Fe_3C$
-------	----------	---------

## -Corrigés des Exercices

---

Proportion	88	12
------------	----	----

4. Température de début et de fin de solidification d'un acier eutectoïde :

	Température °C
Début	1480
Fin	1400

5. La microstructure d'un acier eutectoïde à 1420 °C est relative au schéma e

### Exercice III.2 :

Soit le diagramme d'équilibre fer-cémentite (**figure 4**) , Rep 1 - En se référant au diagramme de la figure 4, on fait extraire les réactions isothermes suivantes :

Nom : **Eutectoïde**

#### **Réaction 1 :**

Austénite ( $\gamma$ ) (0.8 % C) ,  $T= 723^{\circ}\text{C} \rightleftharpoons$  Ferrite ( $\alpha$ , 0.02%C) + Cémentite  $\text{Fe}_3\text{C}$  , (6.67%C)

#### **Réaction 2 :**

Nom : **Eutectique**

Liquide (4.3 % ) ,  $T= 1147^{\circ}\text{C} \rightleftharpoons$  Austénite ( $\gamma$ , 2% C) + Cémentite  $\text{Fe}_3\text{C}$  , (6.67%C)

Nom : **Péritectique**

Liquide (0.51 %C) + Ferrite  $\delta$  (0.1%C),  $T=1495^{\circ}\text{C} \rightleftharpoons$  Austénite ( $\gamma$ , 0.16%C)

2- La perlite est l'agrégat d'une réaction isotherme. Elle est composée de deux phases. On vous demande de donner le nom de cette réaction isotherme, le nom, la composition chimique et la fraction massique de chacune des phases qui compose la perlite à la température de la réaction est :

**Eutectoïde,  $T= 723^{\circ}\text{C}$**

**Phase 1 :** Ferrite  $\alpha$  (0.02%C) ;  $Y_{\text{phase 1}} = \frac{6.67-0.8}{6.67-0.02} \times 100 = 88.27\%$

**Phase 2 :** Cémentite  $\text{Fe}_3\text{C}$  (6.67%C) ;  $Y_{\text{phase 2}} = \frac{0.8-0.02}{6.67-0.02} \times 100 = 11.73\%$

## -Corrigés des Exercices

3. la même chose pour l'agrégat lédéburite nous obtenons les réactions suivantes :

**Eutectique** ,  $T = 1147\text{ °C}$

**Phase 1** : Austénite  $\gamma$  (2% C) ;  $Y_{\text{phase 1}} = \frac{6.67-4.3}{6.67-2} \times 100 = 50.75\%$

**Phase 2** : Cémentite  $\text{Fe}_3\text{C}$  (6.67% C) ;  $Y_{\text{phase 2}} = \frac{4.3-2}{6.67-2} \times 100 = 49.25\%$

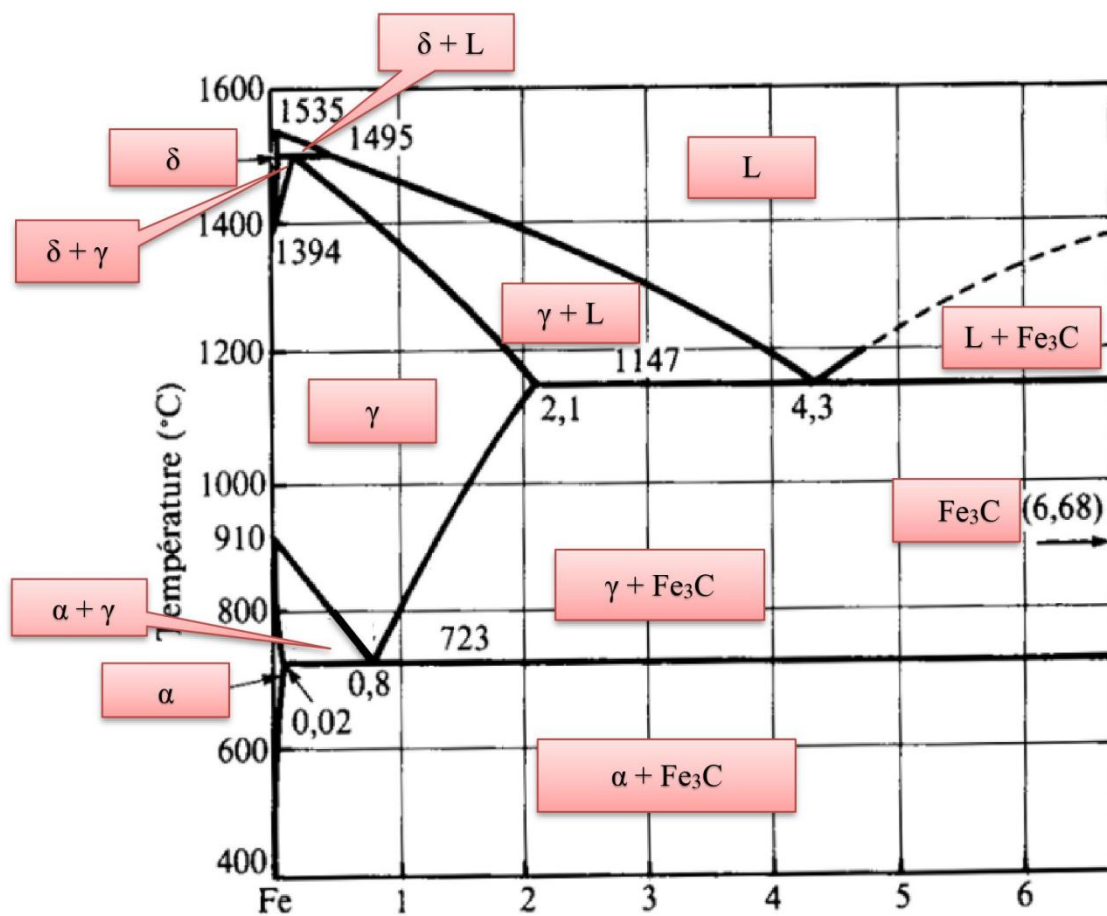


Figure 5 : Diagramme d'équilibre Fer-Cémentite (%C)

### Exercice III.3 :

1)  $f_{\text{ferrite}} = 20\%$  et  $f_{\text{perlite}} = 80\%$

**L'acier hypoeutectoïde :**

On applique la règle de segment inverse :

## -Corrigés des Exercices

$$f(\text{Ferrite}) = \frac{0.77 - X_0}{0.77 - 0.008} = 0.2 \Rightarrow X_0 = 0.61\% \text{ C}$$

Donc on peut conclure que la nuance de l'acier est : C60.

2) -  $X_{(\alpha)} = 0.008\%$  de carbone

$$f(\text{Ferrite}) = \frac{0.77 - 0.60}{0.77 - 0.008} = 22.3\%$$

$$X_{\text{Perlite}} = 0.77\% \text{ de carbone}$$

$$f(\text{Perlite}) = \frac{0.60 - 0.008}{0.77 - 0.008} = 77.7\%$$

### V. Essais Mécaniques :

#### V.1 Traction :

La courbe brute de l'essai de traction  $F=f(\Delta L)$  est schématisée en figure V.1.

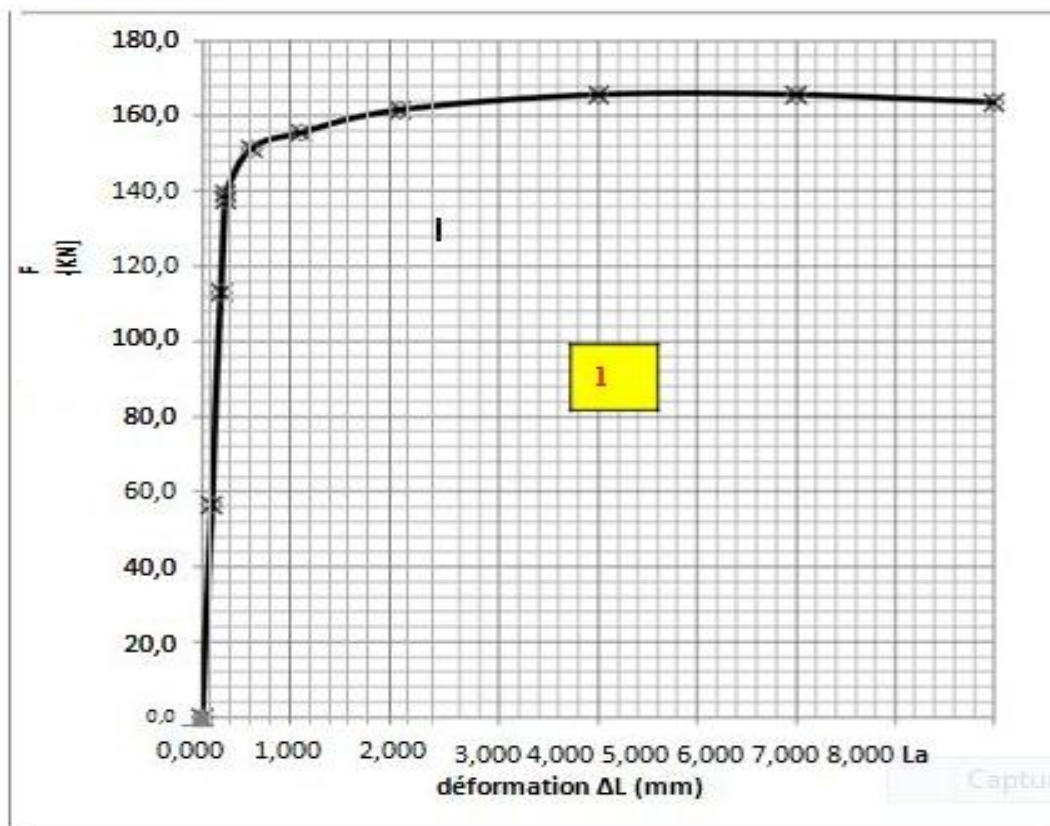
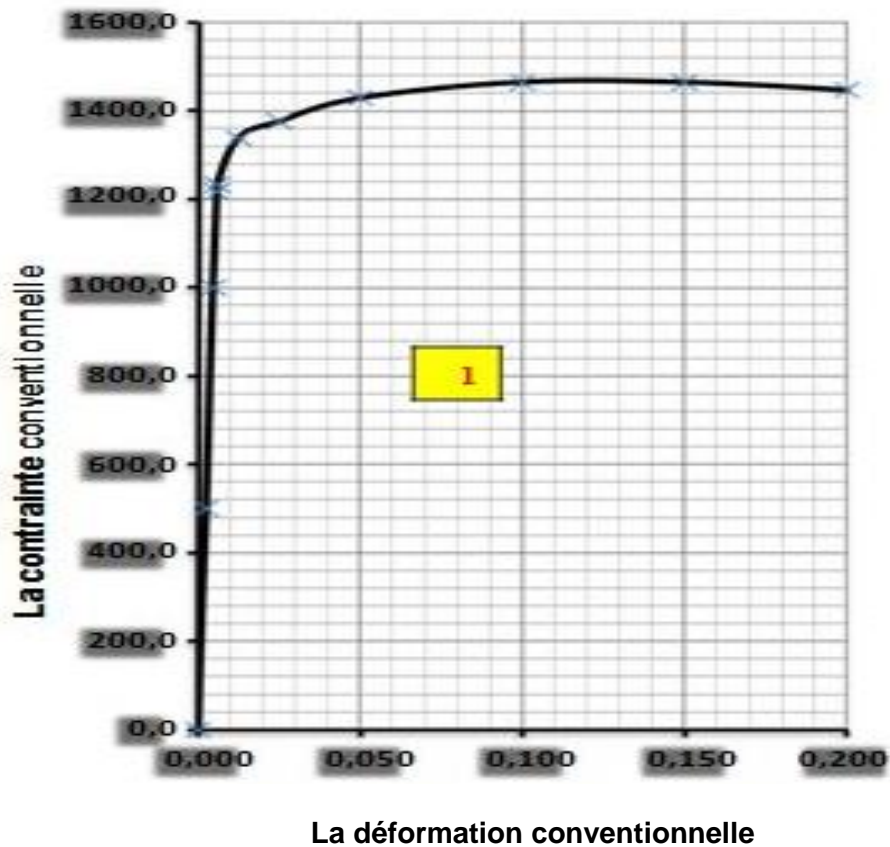


Figure V.1 : Courbe brute de Traction  $F=f(\Delta L)$ .

## -Corrigés des Exercices

2. Pour tracer la courbe  $R=f(e)$ , on rappelle que : La contrainte conventionnelle  $R = F / S_0$  et La déformation conventionnelle  $e = \Delta L / L_0$ , avec  $S_0 = 113.1 \text{ mm}^2$ .



**N.B : Pour "e" faire un arrondissement de quatre chiffres après la virgule.**

les valeurs calculées sont regroupées dans le tableau suivant :

<b>F(KN)</b>	<b>0</b>	<b>56.5</b>	<b>113.1</b>	<b>137.6</b>	<b>139.4</b>	<b>151.3</b>	<b>155.6</b>	<b>161.6</b>	<b>165.6</b>	<b>165.6</b>	<b>165.6</b>
<b><math>\Delta L(\text{mm})</math></b>	0	0.095	0.190	0.232	0.235	0.500	1	2	4	6	8
<b>R(Mpa)</b>	0.0	500,000	1000,00	1217,014	1230,637	1337,50	1375,69	1428,57	1464,286	1464,286	1446,429
<b>e</b>	0.0	0.0024	0.00448	0.0058	0,0059	0.0125	0.0250	0.0500	0.1000	0.1500	0,2000

On se basant sur la courbe conventionnelle de traction , on trouve :

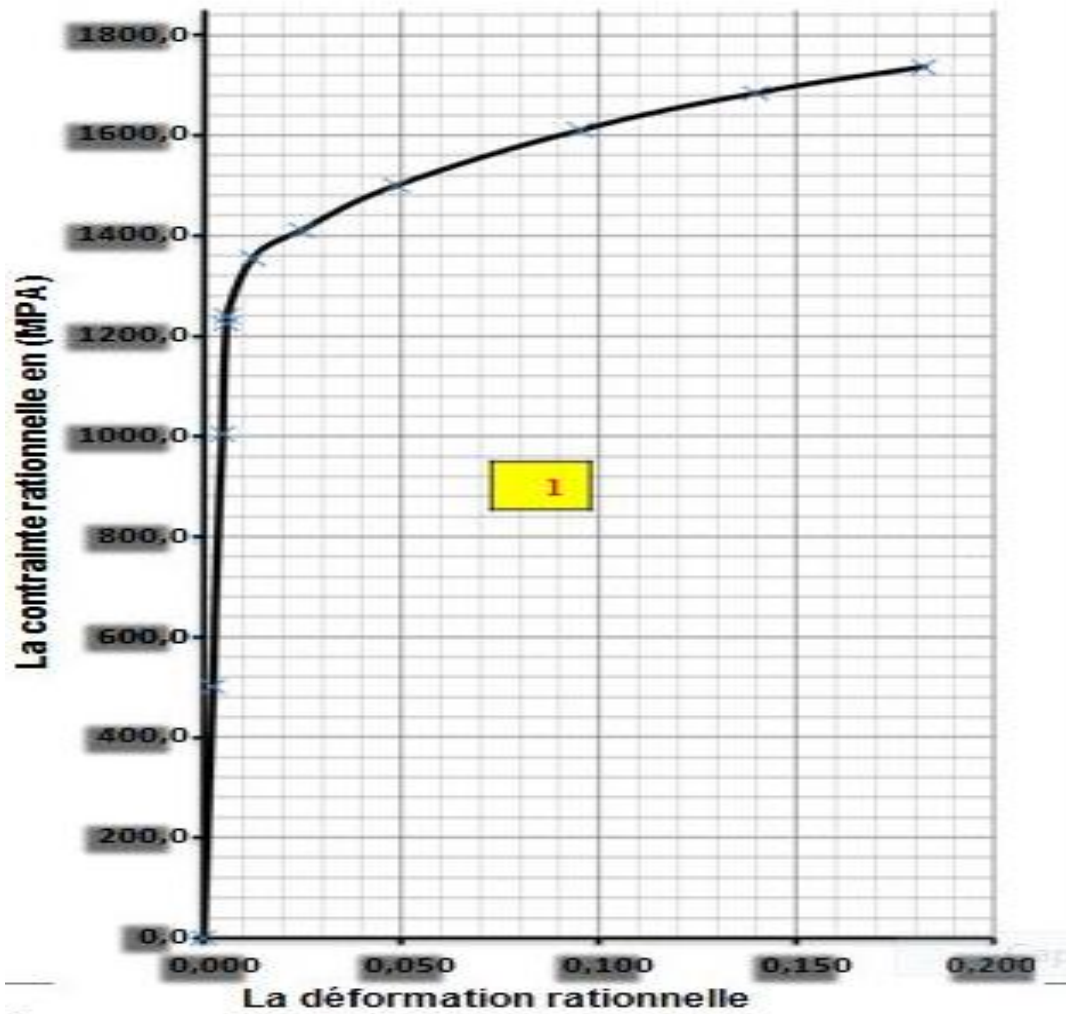
$E = 209,830 \text{ GPa}$  ,  $R_{e 0.2\%} = 1280 \text{ MPa}$  ,  $R_e = 1230 \text{ MPa}$  ,  $R_m = 1464 \text{ MPa}$  ,

La valeur de la déformation permanente A ( en %) après rupture de l'éprouvette est égale

$A\% = 19.3\%$

5- On désire maintenant tracer la courbe rationnelle de traction  $\sigma=f(\epsilon)$ , Avec  $\sigma=F/S$ , et  $\epsilon= \Delta L/L$

## -Corrigés des Exercices



I

4- Après calcul nous obtenons les valeurs suivantes :

F(KN)	$\Delta L$ (mm)	R (MPa)	e	$\sigma$ (MPa)	$\varepsilon$
0	0	0,000	0,0000	0,00	0,0000
56.5	0.0950	500,000	0,0024	501,19	0,0024
113.1	0.1900	1000,000	0,0048	1004,76	0,0048

## -Corrigés des Exercices

137.6	0.2320	1217,014	0,0058	1224,07	0,0058
139.4	0.2350	1232,637	0,0059	1239,87	0,0059
151.3	0.5000	1337,500	0,0125	1354,22	0,0124
155.6	1	1375,694	0,0250	1410,09	0,0247
161.6	2	1428,570	0,0500	1500,00	0,0488
165.6	4	1464,286	0,1000	1610,71	0,0953
165.6	6	1464,286	0,1500	1683,93	0,1398
163.6	8	1446,429	0,2000	1735,71	0,1823

5-Montrer que  $\sigma = R(1 + e)$  sachant que la déformation plastique n'entraîne pas de variation de volume.  $S_0L_0 = SL = S(L_0 + \Delta L)$  :

$$\sigma\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \cdot \frac{S_0}{S} = R \left( \frac{S(L_0 + \Delta L)}{L_0 S} \right) = R \left( \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = R \left( \frac{L_0}{L_0} + \frac{\Delta L}{L_0} \right) = R(1 + e).$$

6- La loi de comportement élastique ( loi de Hook ) pour l inconel 718 s'écrit :

$$\sigma = 209830 \cdot \varepsilon$$

7-La loi de type Hollomann s 'crit :  $\sigma = K \cdot (\varepsilon)^n$  ou  $\ln(\sigma) = \ln(K) + n \cdot \ln(\varepsilon)$

Le coefficient d'écrissage " n " est égal à la déformation au début de striction , c'est à dire lorsque la contrainte conventionnelle atteint sa valeur maximale.

Pour la valeur de K on prend une valeur du domaine plastique et on résout l'équation  $\ln(\sigma) = \ln(K) + n \cdot \ln(\varepsilon)$ . On trouve donc  $n \approx 0.1$  et  $K \approx 1998.20$

## -Corrigés des Exercices

---

Donc, pour l'inconel 718 la Hollomann devient  $\sigma = 1998,20 (\epsilon)^{0,1}$

8- Après avoir imposé un allongement initial  $\Delta L = 2\text{mm}$ , à une éprouvette de traction identique à la précédente. on annule la force appliquée à cette éprouvette, puis, on réalise un nouvel essai de traction sur cette éprouvette pré-écroui.

9 - Les nouvelles valeurs des propriétés mécaniques susceptibles d'être modifiées sont :

Seule la limite d'élasticité est sensiblement modifiée par écrouissage. La nouvelle valeur de  $R_e$  est  $R_e = 1432.4 \text{ MPa}$ .

### IV.1 Ténacité

a) Choix de l'acier et de l'épaisseur du tuyau

La contrainte tangentielle  $\sigma_t$  est une contrainte de traction qui s'exerce perpendiculairement au plan du défaut et qui risque d'entraîner la propagation brutale de celui-ci si elle dépasse une valeur critique.

$$\sigma_t = PD/2e \dots\dots(1).$$

Calculons l'épaisseur minimale que doit avoir le tuyau pour chacune des conditions imposées par les normes de sécurité.

Condition 1 :

$$\sigma_t = \frac{PD}{2e} \leq \frac{R_{e0.2}}{2} \dots\dots\dots(2)$$

On en déduit la valeur minimale  $e_{1\text{min}}$ , de l'épaisseur imposée par la condition 1 :

$$e_{\text{min}} = \frac{PD}{R_{e0.2}} \dots\dots\dots(3).$$

Condition 2 :

Le facteur maximum d'intensité de contrainte  $K_{\text{max}}$  associé au défaut doit au plus être égal à la moitié du facteur critique d'intensité de contrainte  $K_{IC}$  de l'acier. En rappelant la définition du facteur d'intensité de contrainte, on obtient :

$$K_{\text{max}} = \alpha \sigma_t \sqrt{\pi a} \leq \frac{K_{IC}}{2} \dots\dots\dots(4)$$

En combinant les équations (1) et (4) et après réarrangement, on en déduit la valeur minimale  $e_{2\text{min}}$  de l'épaisseur imposée par la condition 2.

$$e_{2\text{min}} = \frac{\alpha PD \sqrt{\pi a}}{K_{IC}} \dots\dots\dots(5).$$

## -Corrigés des Exercices

Pour chacun des aciers, on applique les équations (3) et (5) afin de déterminer les valeurs  $e_{1min}$  et  $e_{2min}$ . Pour un acier, la valeur requise  $e_r$  de l'épaisseur sera la plus élevée des valeurs  $e_{1min}$  et  $e_{2min}$ . Ces calculs sont résumés au tableau suivant :

Acier	$R_{e0,2}$ (MPa)	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$e_{1min}$ (mm) (eq. 3)	$e_{2min}$ (mm) (eq. 5)	$e_r$ (mm)
A	450	140	55,56	26,86	55,56
B	600	90	41,67	41,78	<b>41.78</b>
C	950	70	26,32	53,71	53,71

D'après le tableau ci-dessus, on constate que c'est l'acier **B** qui devra être utilisé, avec une épaisseur de tuyau de **42 mm** pour que le tuyau soit le plus léger possible : **Acier B avec épaisseur de 42 mm**

### IV.2 Fatigue :

#### a) Rayon de courbure $r$ de la gorge :

La limite d'élasticité  $R_{e0,2}$  est égale à 1250 MPa. La contrainte locale  $\sigma_{loc.max}$  à la racine de la gorge est donc égale à :

$$\sigma_{loc.max} = 0,6 \times R_{e0,2} = 0,6 \times 1250 = 750 \text{ MPa}$$

Comme la contrainte maximale nominale  $\sigma_{nom.max}$  est égale à 500 MPa, le facteur de concentration de contrainte  $K_t$  associé à la gorge doit, au plus, être égal à :

$$K_t = \sigma_{loc.max} / \sigma_{nom.max} = 750 / 500 = 1,5$$

Le rapport des diamètres  $D/d$  de l'axe étant égal à 1,15 (100/87), on déduit, de l'abaque  $K_t = f(r/d)$ , une valeur de  $r/d$  égal à 0,3. Le rayon de la gorge doit donc être égal à :

$$r = 0,3 \times d = 0,3 \times 87 = 26,1 \text{ mm}$$

#### b) Rapport $R$ caractérisant le chargement cyclique :

Par définition, le rapport de contrainte  $R$  d'un chargement cyclique à amplitude constante est égal à  $\sigma_{min} / \sigma_{max}$ , où  $\sigma_{min}$  est la contrainte minimale et  $\sigma_{max}$  la contrainte maximale. Ici, la contrainte  $\sigma_{min}$  est nulle. Donc le rapport  $R$  est égal à 0.

#### c) Durée de vie $N$ de l'axe pour un rayon de gorge égal à 26,1 mm :

Le chargement cyclique appliqué à cet axe est caractérisé par un rapport  $R = 0$  (voir question d) et une variation de contrainte nominale  $\Delta\sigma_{nom} = (\sigma_{nom.max} - \sigma_{nom.min}) = (500 - 0) \text{ MPa} = 500 \text{ MPa}$ . Au niveau de la gorge et du fait de la concentration de contrainte due à cette gorge, la variation de contrainte sera égale à :

$$\Delta\sigma_{loc} = (\sigma_{loc.max} - \sigma_{loc.min}) = (750 - 0) \text{ MPa} = 750 \text{ MPa}$$

Par définition, l'amplitude  $\sigma_A$  de la contrainte cyclique est égale à :  $\sigma_A = \Delta\sigma_{loc} / 2 = 750 / 2 = 375$

## -Corrigés des Exercices

---

MPa.

Pour une telle amplitude de contrainte  $\sigma_A$ , la courbe de Wöhler donne une durée de vie  $N \approx 1,05 \times 10^6$  cycles.