

République Algérienne Démocratiques et Populaire
Ministère de l'Enseignements Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و
البحث العلمي
جامعة جيلالي ليابس -
سديبلعباس
كلية التكنولوجيا

Polycopié pédagogique

Cours Matériaux des structures aéronautiques

Cours destiné aux étudiants :

Filière : Génie Mécanique
Option : Structure Aéronautique
Parcours : 1ère Année Master
Semestre : S1
Unité d'enseignement : UEF 1.1.1

Cours présenté par :
Dr. Monsieur M'HAMDIA Rachid

Sommaire

Plan de Cours.....	4
Introduction Générale.....	5
CHAP.I. Structures cristallines des métaux	
I.1 Introduction.....	6
I.2. Petits rappels.....	6
I.2.1. Architectures atomiques.....	6
I.2.1.1. Structure de l'atome.....	6
I.2.1.2. Type de liaisons atomiques.....	6
I.2.1.2.1. Liaison ionique.....	6
I.2.1.2.2. Liaison covalente.....	7
I.2.1.2.3. Liaison métallique.....	7
I.2.1.3. Force de répulsion.....	8
I.2.2. Les solides cristallins.....	9
I.2.2. 1. L'état Cristallin.....	9
I.2.2.2. Description d'un cristal.....	9
I.2.2.3. Grandeurs attachées à un cristal.....	10
I.2.2.4. Systèmes et réseaux cristallins.....	11
I.2.2.4.a. Structure cubique centrée CC.....	12
I.2.2.4.b. Structure cubique à faces centrées CFC.....	12
I.2.2.4.c. Structure hexagonale compacte HC.....	13
I.2.2.4.d. Empilement spatiaux.....	13
I.2.2.5. Repérage des directions et des plans.....	14
I.2.2.5.a. Directions réticulaires.....	14
I.2.2.5.b. Méthodes pour désigné une direction.....	15
I.2.2.6. Plans réticulaires.....	15
Chapitre II : Dislocations	
II.1. Introduction à la théorie des dislocations.....	16
II.2. Description générale d'une dislocation.....	16
II.2.3 Dislocation coin.....	17
II.2.4 Dislocation Vis.....	18
II.2.5 Dislocation Réelle.....	18
II.3. Propriétés élastiques des dislocations.....	18
II.3.1. Rappels d'élasticité.....	19
II.3.1.1. Sollicitation en traction.....	19
II.3.1.2. Sollicitation en cisaillement.....	19
II.3.1.3. Cas générale.....	20
II.3.2. Champ de contrainte élastique.....	20
II.3.3. Limite d'élasticité d'un cristal.....	20
II.4. Energie de dislocation.....	21
II.5. Mouvement des dislocations.....	22
II.5.a. Glissements et montées de dislocation.....	22
II.5.b. Vecteur de burgers.....	24
II.6. La Montée.....	24
II.7. Force agissant sur une dislocation.....	25
II.8. Interactions dislocation-dislocation.....	25
II.9. Interactions dislocation atomes de soluté.....	25

II.10. Interactions dislocation-précipité.....	25
II.11. Durcissement par précipitation.....	25
II.11.1. Définition de la précipitation.....	25
Chapitre III : Alliages d'aluminium	
III.1. Historique et fabrication de l'aluminium.....	27
III.2. Avantages techniques et économiques.....	27
III.3. Influence des éléments d'alliage.....	29
III.4. Influence des conditions de fabrication.....	31
III.5. Technologie de mise en œuvre.....	33
III.6. Caractéristiques des alliages d'aluminium.....	36
III.7. Classement des alliages d'aluminium suivant leurs utilisations.....	37
Chapitre IV : Céramiques techniques	
IV.1. Historique.....	41
IV.2. Structure.....	42
IV.3 Les différents types de céramique.....	42
IV.4 Applications des céramiques technique.....	43
IV.5 Caractérisations.....	44
IV.6 Propriétés mécaniques, physiques et thermiques.....	46
IV.7 Élaboration.....	47
Chapitre V: Les polymères	
V.1. Introduction.....	48
V.2. Définitions des polymères.....	48
V.3. Structures des polymères.....	49
V.4. Types de polymères.....	51
V.5. Polymérisation des polymères.....	53
V.5. Propriétés mécanique et thermiques des polymères.....	54

Plan de Cours

Objectifs de l'enseignement:

L'objectif de ce cours est de présenter à l'étudiant en aéronautique les différents matériaux utilisés dans les structures aéronautique, que ça soit dans les carlingues, les structures porteuses, les planchers, les revêtements... etc. Il est notamment question de choisir et d'analyser les matériaux en fonction de leur rôle et leur emplacement dans la structure et en fonction des sollicitations auxquelles ils sont soumis).

Connaissances préalables recommandées:

Les connaissances requises pour pouvoir suivre cet enseignement sont les cours suivants : Résistance des matériaux, matériaux composites, Mécanique des Milieux Continus).

Déroulement

Le chapitre sera abordé durant 4 séances de 1h:30min réparties comme suit :

- ✓ Chapitre 1 : Notions de Cristallographie ;
- ✓ Chapitre 2: Dislocations ;
- ✓ Chapitre 3 : Alliages d'aluminium ;
- ✓ Chapitre 4 : Céramiques techniques ;
- ✓ Chapitre 5 : Polymères.

Référence

1. *Les matériaux composites. J.WEISS L'USINE*
2. *Précis de matières plastiques. J.P.TROTIGNON NATHAN*
3. *Matériaux industriels matériaux métalliques. M.COLOMBIE DUNOD*
4. *Matériaux. M.F.ASHBY DUNOD*
5. *Polymères de la polymérisation aux propriétés. J.Y.CAVAILLE TECHNICA*
6. *Structures métalliques. C.HAZARD EDUCALIVRE*
7. *Structures. P.BHATT LONGMANN*
8. *Défauts ponctuels dans les métaux y. quere masson*
9. *Matériaux composites. J.m.berthelot masson*
10. *Introduction a la science des matériaux. J.p.mercier presses poly*

Introduction générale

Les métaux et alliages industriels sont des corps constitués de divers constituants caractérisant ses propriétés et ses caractéristiques. L'identification de ses constituants, est avéré indispensable pour déterminer les relations entre le comportement et la tenue en services des matériaux. On appelle microstructure des matériaux l'ensemble des paramètres microstructuraux décrivant les constituants des matériaux à l'échelle microscopique. Un matériau est formé d'une multitude de petits volumes polyédriques appelés grains et phases dont la taille varie en général de $1\mu\text{m}$ à plusieurs mm.

En conséquence, la maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine de révolutions dans l'histoire des technologies. Les âges de la préhistoire sont d'ailleurs définis par les matériaux employés, âge de la pierre, âge du bronze, du fer. Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante révolution. En effet, la science des matériaux permet de concevoir de nouveaux matériaux adéquats pour chaque nouvelle application. On pourra distinguer deux grandes catégories de matériaux :

(1) les matériaux de structure, faisant l'objet de ce cours et qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques.

(2) les matériaux fonctionnels, qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques ...

En effet, on caractérise les propriétés d'un matériau à une échelle donnée. A cette échelle le matériau est considéré comme homogène et continu. Si l'échelle à laquelle est caractérisée la propriété est comparable à l'échelle de l'hétérogénéité interne du matériau. Les résultats seront, en conséquences, dispersés.

CHAP.I. Structures cristallines des métaux

I.1.Introduction

La cristallographie est la branche des sciences exactes qui se consacre à l'étude des relations étroites qui relient les formes des cristaux et leurs propriétés physiques et la façon dont les atomes sont arrangés à l'échelle microscopique de la structure de la matière à l'échelle atomique : détermination, classification et interprétation des structures géométriques des solides et en particulier celles des cristaux. Elle joue un rôle interdisciplinaire entre physique, chimie, biologie moléculaire, sciences des matériaux et minéralogie-pétrographie (Schwarzenbach D, Chapuis G. 2006).

La cristallographie permet de représenter la structure cristalline d'un minéral suivant un arrangement en trois dimensions de ses atomes et elle classe les cristaux selon des règles géométriques (Parriaux A. 2009).

La cristallographie, par définition, est la science des cristaux ; elle s'intéresse à la forme extérieure, à la structure interne, à la croissance et aux propriétés physiques des cristaux (Rousseau JJ, Gibaud A. 2007).

Le mot cristallographie est composé de deux mots. Le mot « graphie » qui vient du grec graphia signifiant « écriture, schéma ».

Le mot « cristal » vient du grec krystallos signifiant « glace » où les gens croyaient que le cristal était constitué d'eau congelée par le froid des montagnes (Esnouf C. 2011).

Le cristal est un solide, homogène et anisotrope dont la structure microscopique est caractérisée par une répétition périodique en trois dimensions d'un motif composé d'atomes (Schwarzenbach D. 1993).

Un cristal parfait est un solide sans défaut.

I.2.Petits rappels

I.2.1. Architectures atomiques

I.2.1.1. Structure de l'atome

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons. Le noyau est formé de:

Proton: masse $M_P = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; charge positif $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Neutron: masse $m_N = M_P$ charge nulle.

Electron masse $m_e = M_P/1840 = 0,91 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$, charge négative égal à (-e).

La grandeur d'un atome à quelques Angstrom de (1 à 4 \AA) : $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$.

I.1.2.2. Type de liaisons atomiques

Elles sont directement reliées à la couche périphérique, elles sont de trois types:

Liaison ionique.

Liaison covalente.

Liaison métallique.

I.1.2.2.1. Liaison ionique

Cette liaison se caractérise par l'échange d'électrons entre deux atomes, la liaison est forte suite à la saturation de la couche extérieure des atomes qui deviennent des ions. Elle concerne essentiellement les éléments qui ont peu d'électrons sur leur couche externe (soient les colonnes 1 et 2 du tableau périodique) et les éléments qui ont des couches externes presque saturées (colonnes 16 et 17 du même périodique).

Exemple : typique d'une liaison ionique : $\text{LiF} \longrightarrow \text{Li}^+ + \text{F}^-$

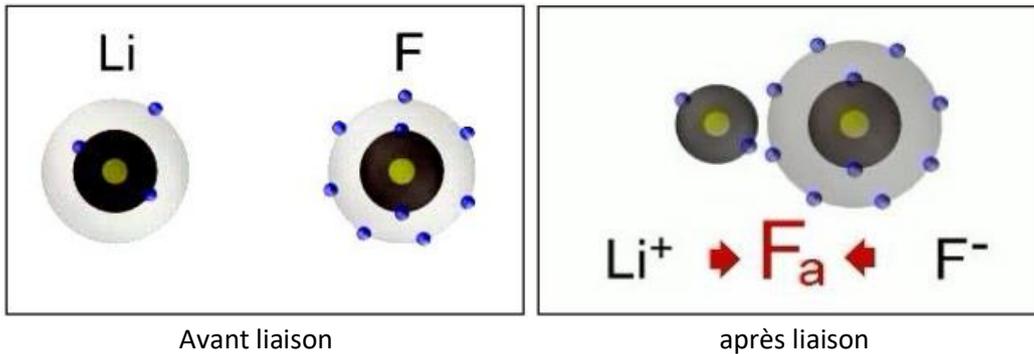


Fig. 1. Liaison ionique (cas de fluorure de lithium).

Les matériaux constitués à l'aide des liaisons ioniques sont caractérisés par: une mauvaise conductivité thermique, transparent, fragile, haut point de fusion.

I.1.2.2. Liaison covalente

Cette liaison se caractérise par la mise en commun d'électrons afin de saturer les couches électroniques externes de chacun des atomes mis en liaison. Cette liaison permet par exemple d'expliquer l'association de deux atomes d'hydrogène pour former la molécule de dihydrogène. La liaison covalente est également une liaison forte puisque elle permet de saturer la couche électronique externe des atomes.

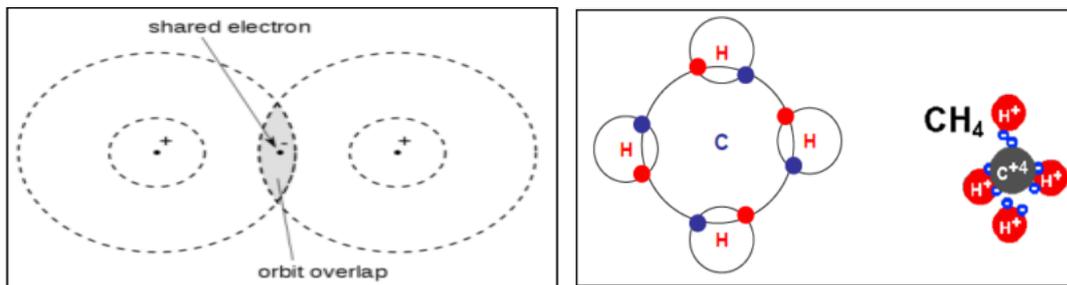


Fig.2. Liaisons covalentes : Cas de dihydrogène H2 et le CH4

I.1.2.3. Liaison métallique

Cette liaison se caractérise aussi par la mise en commun d'électrons entre plusieurs atomes afin de saturer les couches électronique externes. A la différence de la liaison covalente, la liaison métallique est délocalisée, c'est-à-dire que chaque atome peut être considéré comme un ion baignant dans un gaz d'électrons. Elle se produit entre les métaux, elle est accompagnée par la formation des électrons libres. Elle est forte et non directionnelle.

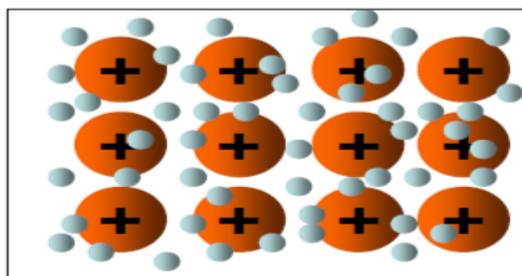


Fig. 3. Liaison ionique (cas de fluorure de Sodium).

Le tableau ci-dessous donne des exemples typiques pour des liaisons interatomiques de certaines substances chimiques. Ici on s'intéresse aux liaisons les plus communément connues.

Liaison	Matériaux	caractéristiques
Ionique	Na Cl Al ₂ O ₃	Mauvaise conductivité électrique, fragile, transparente, haute point de fusion
Covalente	Si, diamant	Mauvaise conductivité électrique, très grande dureté, haut point de fusion
Métallique	Na, Al, Cu, Fe, W	Bonne conductivité électrique et thermique, facilement déformable, opaque

Tableau .1: liaisons interatomiques de certaines substances chimiques

I.1.2.3. Force de répulsion

Les forces de répulsion entre les atomes ont pour origine l'interaction de leurs couche électronique: lorsque deux atomes sont très proches l'une de l'autre, les couches électroniques des deux atomes sont plus proche l'une de l'autre, que du noyau de l'autre, ou encore que des deux noyaux.

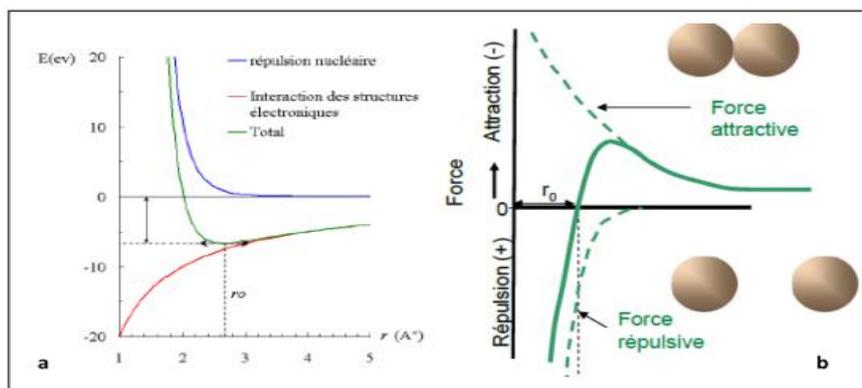


Fig. 4. Illustration, (a) potentiel d'interaction découlant des forces nucléaires répulsives et des interactions attractives. (b) Force associée.

Force de liaison: la force de liaison F entre deux atomes peut être représentée (approximativement) par la relation suivante:

$$E = -\frac{A}{r^m} + \frac{B}{r^n}$$

A , B , a , b , sont des constantes dont les valeurs dépendent de la nature de la liaison et des atomes associés.

r : est la distance entre les deux couches des atomes.

r_0 : est la distance d'équilibre entre les atomes. Considérons que le système est à la température du zéro absolu afin qu'aucune énergie d'agitation thermique ne soit présente. Si la distance interatomique r diminue, les charges électriques de même signe créent un potentiel électrostatique de répulsion U_r entre les deux atomes, alors que les charges de signe opposé créent un potentiel électrostatique d'attraction U_a .

L'énergie électrostatique de répulsion $U_r(r)$ est définie par l'expression $U_r = B/r^n$.

L'énergie d'attraction appelée $U_a(r)$ est définie par la loi de Coulomb $U_a = A/r$.

Avec B : constante positive dépend de nombre de proton et d'électron en présence et m une constante de l'ordre de 6 à 9 pour les liaisons métalliques, et de 9 à 11 pour les liaisons covalentes et ioniques.

I.2.2.L'état cristallin

I.2.2.1.Les trois états de la matière

La matière peut exister sous trois états : L'état gazeux, l'état liquide et l'état solide. La forme sous laquelle se trouve la matière est déterminée par les interactions entre ses particules constitutives (atomes, molécules ou ions).

Les liquides et les gaz sont des fluides, déformables sous l'action de forces très faibles, ils prennent la forme du récipient qui les contient. Les solides ont une forme propre, leur déformation exige des forces importantes.

Les solides peuvent exister sous deux états différents :

- l'état désordonné caractérisé par une structure non ordonnée c'est le cas des systèmes amorphes, par exemple les verres.
- l'état ordonné caractérisé par une structure ordonnée correspond aux solides cristallins.



Fig. 5. États géométriques de la matière

I.2.2.2.Mise en évidence

La majorité des phases solides de substances pures sont cristallines. L'état cristallin est l'état solide normal des corps purs (stabilité thermodynamique, énergie interne minimale). Il est caractérisé par un ordre structural parfait, tridimensionnel. Sa caractéristique essentielle est d'être périodique :

Un milieu cristallin est constitué d'un ensemble d'atomes. Ces derniers, organisés suivant un ordre défini, engendré par la répétition périodique dans l'espace des atomes constituant ou de groupements d'atomes (de même nature ou de natures différentes) suivant les trois directions de l'espace, non coplanaires. Ce groupement d'atomes permettra, par des translations seulement, d'engendrer la structure cristalline complète. Ceci, est appelé le motif du cristal. Quant aux extrémités des vecteurs définissant les translations dans tout l'espace, elles constituent un ensemble de points, appelés les nœuds du réseau cristallin.

I.2.2.3.Description d'un cristal

A chaque système cristallin correspond une répartition spatiale des atomes, ions, molécules aux sommets d'un réseau tridimensionnel.

I.2.2.3.a. Définition

- Maille élémentaire: C'est la portion d'espace de volume minimal, tel que par translation de vecteur repéré par ses composantes (m, n, p) selon les trois axes entiers. Les abscisses (m, n, p) sont trois entiers et (a, b, c) sont les 3 vecteurs de base de la maille. La maille assure le paramétrage dans l'espace et donne le cristal. Il existe une infinité de mailles élémentaires de volume.
- Réseau : Ensemble infini de points matériels (appelés nœuds) obtenu par translation de trois vecteurs non coplanaires. Les différentes entités sont repérées sur des nœuds définis dans la maille. Le réseau est l'arrangement spatial de ces nœuds.
- Motif : Le motif est constitué par la plus petite entité matérielle discernable périodiquement répétitive dans la structure. Pour un cristal, le motif est une particule (atome, ion ou molécule). Groupe d'atomes dont la répétition engendre le cristal.

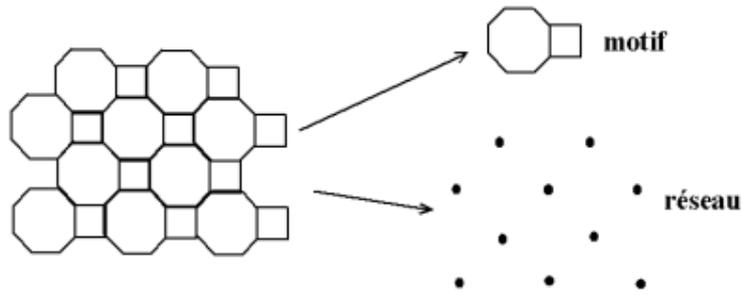


Fig. 6. Description d'un Cristal

I.2.2.3.b. Grandeurs attachées à un cristal

- Paramètres cristallographiques :

D'après les définitions précédentes, trois vecteurs (donc six paramètres) sont nécessaires pour caractériser un réseau : a, b, c, les modules des vecteurs translations élémentaires sont appelés les paramètres linéaires. Angles respectifs des directions des vecteurs, sont appelés les paramètres angulaires.

- Nombre de motifs Z par maille :

Nombre d'atomes par maille, on le note Z.

L'atome E n'appartient pas à la maille il compte pour 0.

L'atome A au sommet du cube, A appartient à 8 mailles.

L'atome B au centre d'une face il appartient à 2 mailles.

L'atome C au centre du cube il appartient à 1 maille.

L'atome D sur une arête du cube il appartient à 4 mailles.

- Coordinence :

La coordinence est le nombre de plus proches entités voisines.

- Masse volumique ρ : Rapport du volume réellement occupé par les sphères sur le volume total de la maille.

$$\rho = \frac{M_{Entité}}{V_m}$$

$$\rho = \frac{Z \cdot M_a}{N \cdot V}$$

Z: Nombre d'atomes par maille, Ma: masse Molaire, N : nombre d'Avogadro.

V: Volume totale de la maille.

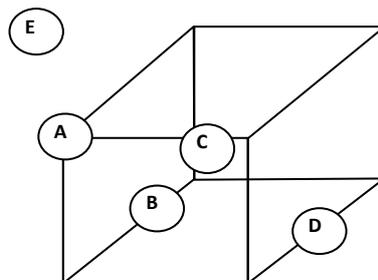


Fig.7. Grandeurs attachées à un cristal.

I.2.2.4. Systèmes et réseaux cristallins

Il existe sept systèmes cristallins différents. En plaçant dans les mailles primitives des nœuds supplémentaires (au centre des bases, au centre de chacune des faces ou au centre de la maille) on obtient quatorze réseaux cristallins distincts (réseaux de Bravais).

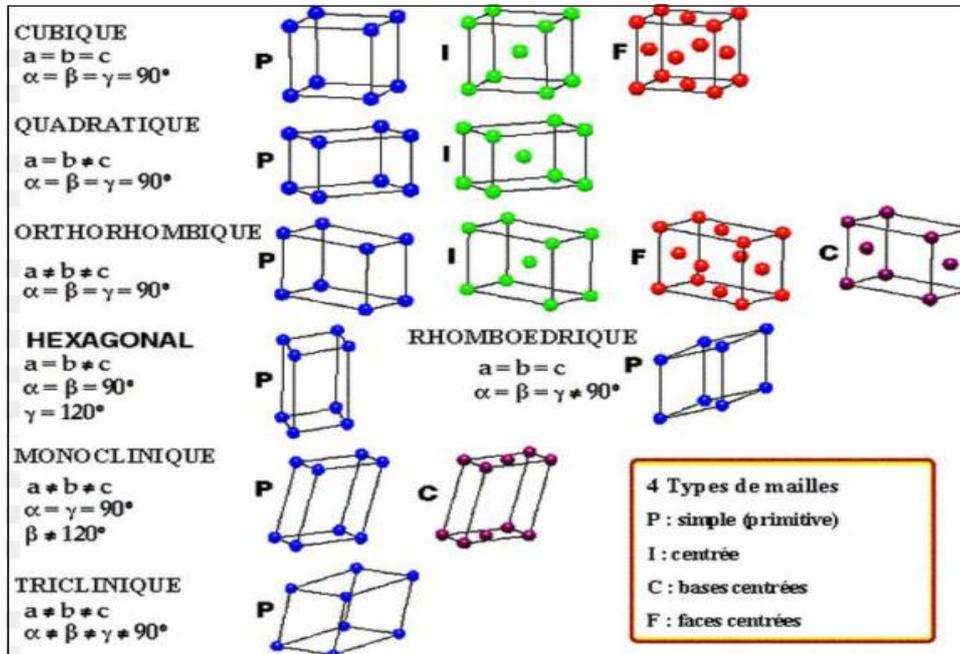


Fig. 8. Illustration graphique du réseau du Bravais.

Tout réseau cristallin, constitué de sphères identiques de rayon R comporte nécessairement des portions d'espaces inoccupées, puisque $C < 1$. Celles-ci portent le nom de sites cristallographiques. Ces sites peuvent être occupés par des espèces différentes. On distingue 3 types de sites.

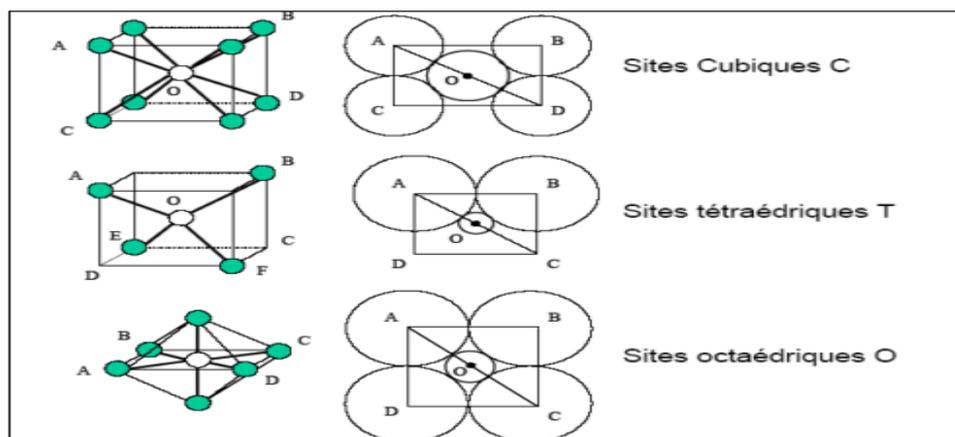


Fig.9. Les sites cristallographiques de base.

Parmi les systèmes énumérés dans le tableau précédent nous allons étudier le système cubique (CC, CFC) et le système hexagonal (HC). Un métal peut présenter plusieurs structures cristallines selon l'intervalle de température considéré, on dit qu'il présente un polymorphisme cristallin.

Exemple : Le Fer : $273^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{CC}} 912^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{CFC}} 1394^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{CC}} 1538^\circ\text{C}$

I.2.2.4.a. Structure cubique centrée CC

Définie par une maille élémentaire de 2 ions (un au centre et 8 aux sommets du cube mais appartenant chacun à 8 mailles).

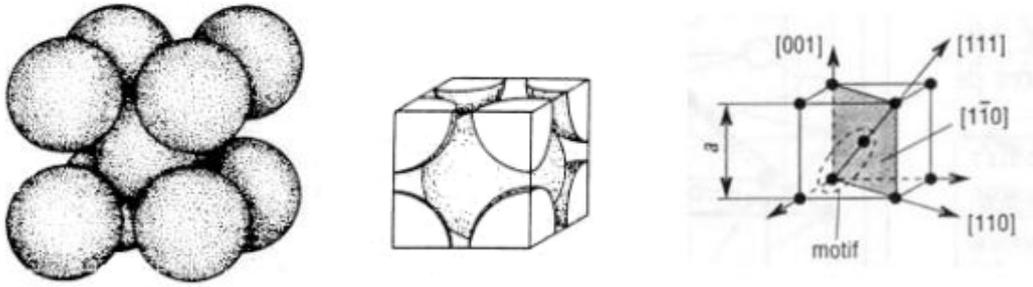


Fig10. Illustration graphique de la structure CC.

- Paramètre de la maille : a

- Distance inter atomique : $d_a = a \frac{\sqrt{3}}{2}$

- Rayon atomique : $R_a = a \frac{\sqrt{3}}{4}$

- Indice de coordination : $l_c := 8$

(C'est le nombre d'atome voisin d'un atome donné).

- Nombre d'atomes par maille : $1 + \frac{8}{8} = 2$

- Compacité : $C = \frac{v_{At}}{V_m} = \frac{2.4/3.\pi.(R_a)^3}{V_m} = 0.678$

I.2.2.4.b. Structure cubique à faces centrées CFC

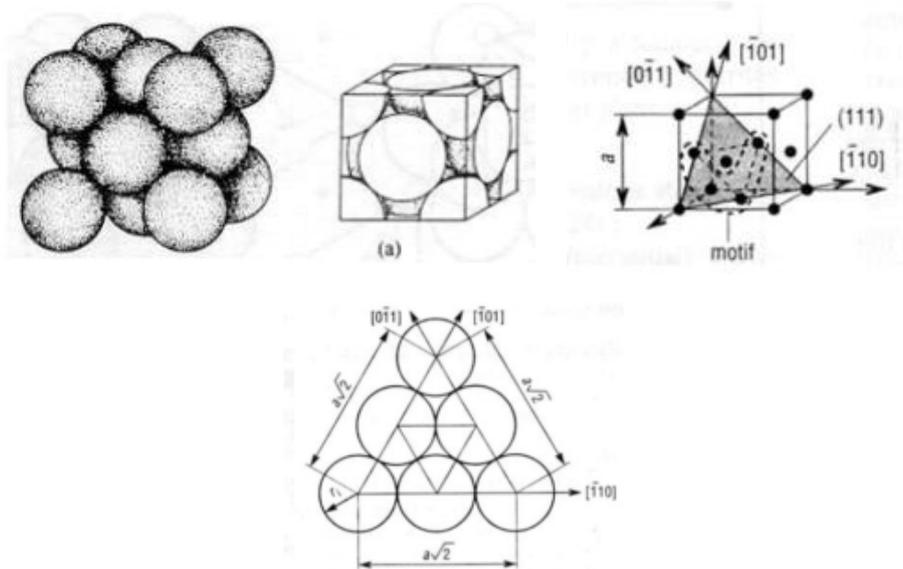


Fig. 11. Illustration graphique de la structure CC.

Définie par un motif élémentaire de 4 ions (6 sur les faces appartenant chacun à 2 mailles et 8 aux sommets du cube mais appartenant chacun à 8 mailles).

- Paramètre de la maille : a

- Distance inter atomique : $d_a = a \frac{\sqrt{3}}{2}$

- Rayon atomique: $R_a = a \frac{\sqrt{2}}{4}$

- Indice de coordination : $Ic := 12$ (c'est le nombre d'atome voisin d'un atome donné).

- Nombre d'atomes par maille: $\frac{8}{8} + \frac{6}{2} = 4$

-Compacité : $C = \frac{v_{At}}{V_m} = \frac{2.4/3.\pi.(R_a)^3}{V_m} = 0.74$

I.2.2.4.c. Structure hexagonale compacte HC

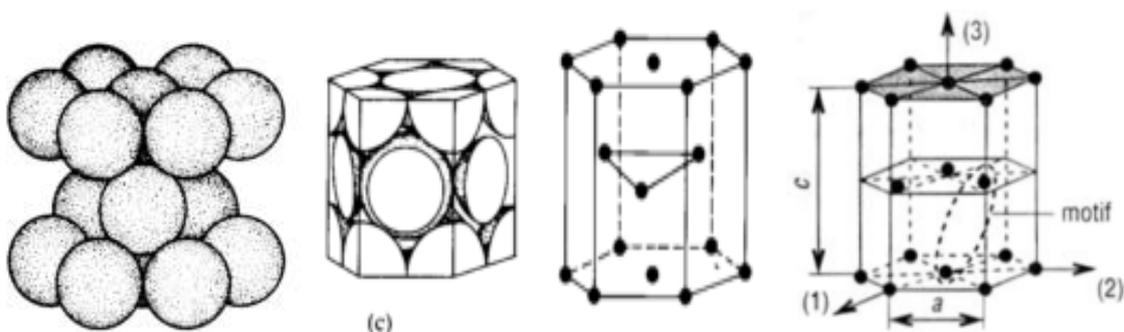


Fig. 12. Illustration graphique de la structure CC.

Définie par un motif élémentaire de 2 ions. La maille représentative contient 6 ions (3 à l'intérieur et 2 sur les bases, communs chacun à 2 mailles, et 12 sur les sommets, communs chacun à 6 mailles).

- Paramètre de la maille : a, c

$$d_a^2 = \frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{4}$$

- Distance inter atomique :

- Rayon atomique : $r_a = a/2$

$$\frac{c}{a} = 1.63 \quad \Rightarrow$$

L'empilement est dit idéal lorsque $d = a$

- Indice de coordination : $Ic := 12 = 6 + 6$

(à la distance a)

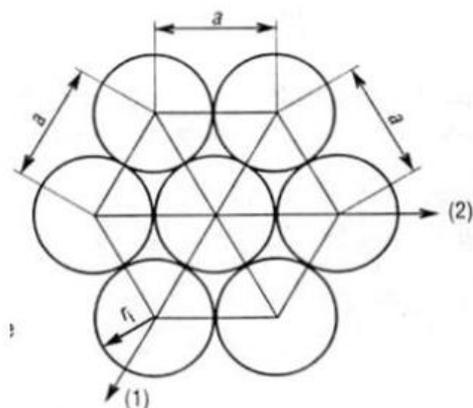
(à la distance d)

$$3 + \frac{12}{6} + \frac{12}{2} = 6$$

-Nombre d'atomes par maille :

- Compacité :

$$C = \frac{v_{At}}{V_m} = \frac{6.4/3.\pi.(R_a)^3}{3a.\frac{a\sqrt{3}}{2}.c} = 0.74$$



I.2.2.5. Empilement spatiaux

On considère les atomes comme des sphères dures indéformables de rayon R. Dans un plan A, l'empilement le plus compact possible est obtenu lorsque les sphères sont tangentes. Leurs centres forment des triangles équilatéraux de côté : $a = 2R$. Une sphère a alors 6 voisins.

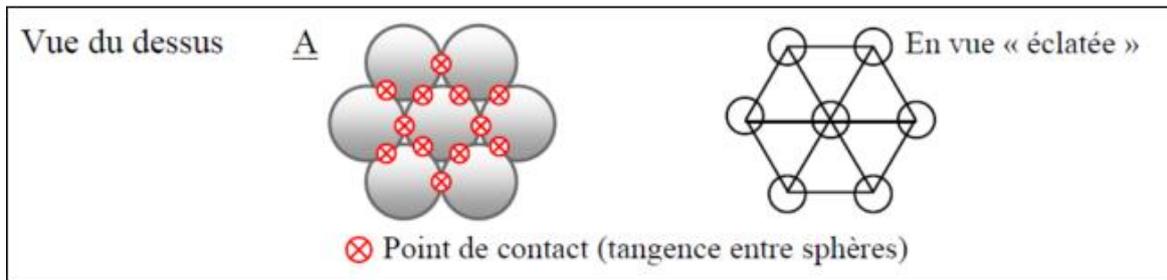


Fig. 13. Descriptif des empilements en modèle sphère formé de 6.

Au-dessus du plan A, une seule solution possible, plan B, dans lequel chaque sphère B est au contact de 3 sphères du plan A. Les sphères B sont localisées à la verticale des barycentres des triangles équilatéraux qui décrivent le plan A.

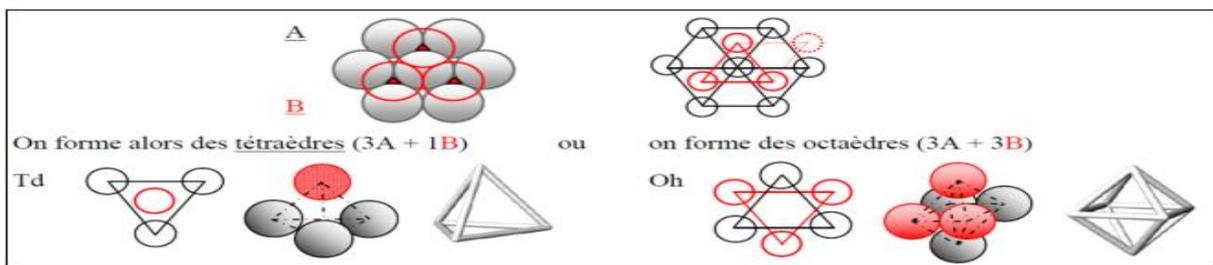


Fig. 14. Descriptif des empilements en modèle sphère d'un plan B sur un plan A

I.2.2.5. Repérage des directions

Le système d'axe de repérage des directions et des plans dans un réseau cristallin est celui qui correspond aux trois vecteurs principaux de la maille. La maille élémentaire est définie par trois vecteurs a, b, c

Plan réticulaire: plan passant par 3 nœuds du réseau au moins ou cristallographique.

Rangée réticulaire: droite passant par 2 nœuds du réseau au moins.

I.2.2.5.a. Directions réticulaires

Une direction est désignée par trois indices $[u \ v \ w]$ qui signifie une droite partant de l'origine et passant par l'atome de coordonnées u, v et w . Une famille de direction est désignée par $\langle u \ v \ w \rangle$. Avec u, v, w des entiers.

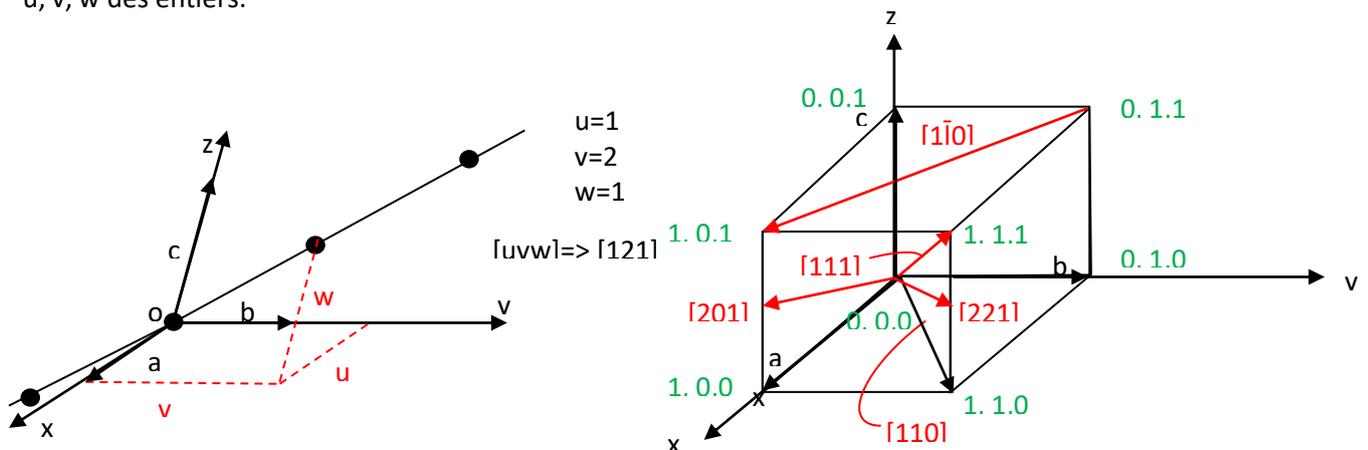


Fig. 15. Repérages des architectures atomiques

I.2.2.5.b. Méthode pour désigner une direction

Tracer dans la maille élémentaire un vecteur parallèle à la direction et passant par l'origine ;
 Projeter le vecteur sur les axes et exprimer ses coordonnées dans la base (a, b, c);
 Ramener ces coordonnées à des valeurs entières, les plus petites possibles ;
 Noter la direction de la façon suivante : [uvw] (indices de Miller de la direction).

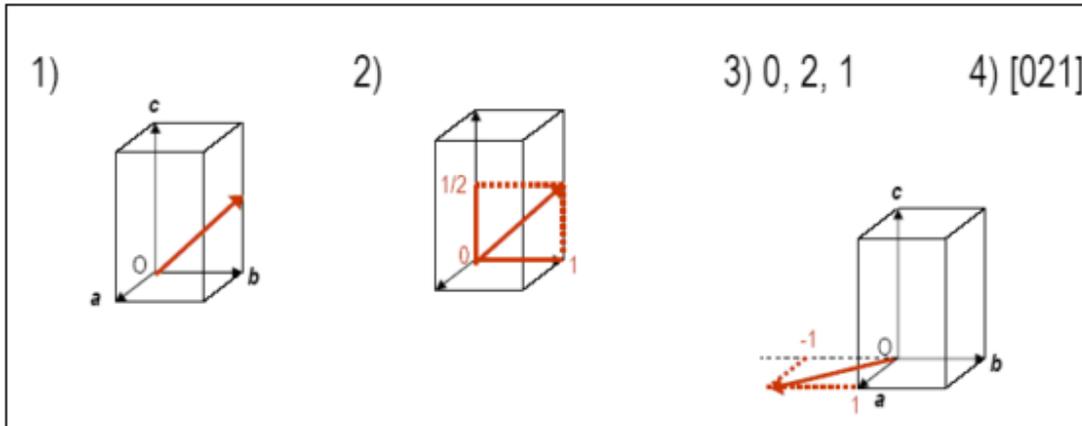


Fig. 16. Démarche de repérages des directions cristallines.

I.2.2.6. Plans réticulaires

Un plan réticulaire est désigné par trois indices de Miller (h k l). En effet un plan qui coupe les axes Ox, Oy, Oz en M, N, P est défini comme les plus petits entiers proportionnels à 1/m, 1/n et 1/p.

Méthode pour désigner un plan :

- ✓ Dessiner un plan dans la maille élémentaire qui ne passe pas par l'origine ;
- ✓ Exprimer les coordonnées des points d'intersection du plan avec les trois axes dans la base (a, b, c).
- ✓ Prendre l'inverse de ces coordonnées ;
- ✓ Ramener ces coordonnées à des valeurs entières, les plus petites possibles ;
- ✓ Noter le plan de la façon suivante (hkl) (Indices de Miller du plan);

Distance inter-réticulaire: est la distance entre les plans de la famille (hkl).

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

Exemple :

- 1, 1/2, 2/3
- 1, 2, 3/2
- 2/2, 4/2, 3/2
- 2, 4, 3

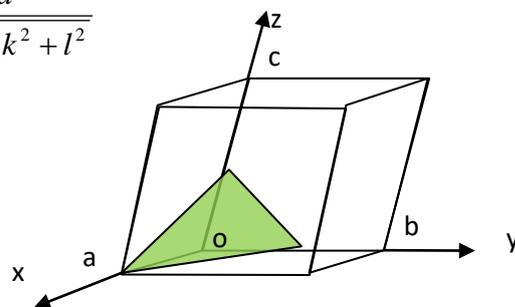


Fig. 17. Démarche pour désignation d'un plan.

Chapitre II : Dislocations

II.1. Introduction à la théorie des dislocations

En science des matériaux, Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposée sur un autre matériau, appelé « substrat ». Le but du dépôt est de donner des propriétés particulières à la surface de la pièce, tout en bénéficiant des propriétés massives du substrat (en général : tenue mécanique), par exemple :

- **conductivité électrique** : métallisation de la surface, par exemple pour observer un échantillon isolant au microscope électronique à balayage.

- **optique** : tain du miroir, traitement anti-reflet des objectifs d'appareil photo, nickelage des casques de pompiers pour réfléchir la chaleur (infra-rouges), dorure de leur visière pour éviter l'éblouissement.

Le dépôt d'une couche mince sur un substrat conduit, généralement à la naissance de dislocations. Une dislocation est un défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline. Une dislocation peut être vue simplement comme un "quantum" de déformation élémentaire au sein d'un cristal possédant un champ de contraintes à longue distance. Elle est caractérisée par:

- ✓ la direction de sa ligne,
- ✓ un vecteur appelé « vecteur de Burgers » dont la norme représente l'amplitude de la déformation qu'elle engendre.

Les dislocations ont une importance capitale pour les propriétés physiques des matériaux cristallins :

- ✓ ce sont elles qui, en se déplaçant, propagent la déformation plastique. Elles permettent ainsi la mise en forme des pièces métalliques.
- ✓ les déformations du réseau cristallin qu'elles induisent facilitent la diffusion des atomes. Elles peuvent ainsi piéger des défauts autour d'elles.
- ✓ elles influencent les propriétés électroniques des semi-conducteurs

II.2. Description générale d'une dislocation.

Supposons qu'un cisaillement élémentaire d'une distance inter-atomique b se produise uniquement le long d'une partie du plan de cisaillement. La ligne qui sépare la partie qui a été cisailée de celle qui ne l'est pas, est la ligne de dislocation. Elle apparaît ici comme la limite d'un demi-plan atomique qui distord fortement les plans voisins (FIG.2.1).

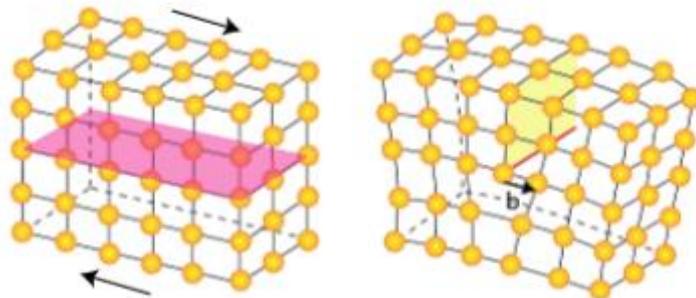


Fig. 18. Représentation du plan de cisaillement dans un cristal.

Le concept de dislocation dans un milieu « continu » est bien connu depuis les travaux du mathématicien Volterra au début du XXe siècle. La construction dite « de Volterra » permet de créer formellement une dislocation.

Elle consiste:

- ✓ dans un premier temps à couper un volume selon une surface quelconque s'appuyant sur une ligne L ;
- ✓ puis à déplacer l'une des lèvres de coupure par rapport à l'autre selon un vecteur \vec{b} (appelé « vecteur de Burgers ») ; dans les solides cristallins (un milieu discontinu), ce vecteur est toujours une translation du réseau ;
- ✓ enfin, dans une dernière étape, il s'agit de recoller les deux lèvres de la coupure et de relaxer les contraintes nécessaires au déplacement.

Lorsque ce déplacement est en dehors du plan de coupe, le recollement nécessite l'ajout de matière. Cette construction aboutit à la formation d'une discontinuité linéaire (purement élastique dans un milieu continu) bordant la surface. La dislocation ainsi créée est définie par la position géométrique de la ligne L et de la force nécessaire au déplacement relatif des deux lèvres. Elle ne dépend pas de la position de la surface de coupure. Dans un milieu discontinu, la ligne L marque le « cœur » de la dislocation. Dans cette région, le déplacement des atomes de leur position initiale ne peut pas être défini par une déformation élastique.

La ligne de dislocation ne peut s'arrêter à l'intérieur du cristal mais doit, soit émerger sur une imperfection (surface, joint de grain, autre dislocation), soit se refermer sur elle même. Deux cas particuliers de dislocations rectilignes sont intéressants : la dislocation coin (\vec{b} perpendiculaire à \vec{u} , vecteur unitaire de la ligne L) et la dislocation vis (\vec{b} parallèle à \vec{u}).

II.2.3 Dislocation coin.

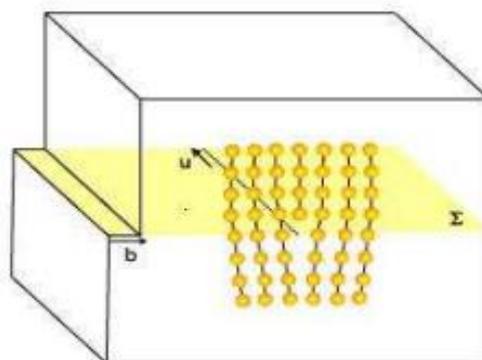


Fig. 19. Représentation des dislocations coins dans un cristal.

Elle peut être visualisée aisément si on effectue le processus de Volterra en insérant un demi-plan atomique supplémentaire dans la structure parfaite, à la manière dont on enfonce un coin dans une pièce de bois (FIG.2.3).

Ce mode d'adaptation est utilisé par certaines plantes lorsque des lignes parallèles suivent une forme de largeur variable, comme par exemple les lignes de grains sur un épis de maïs ou les lignes d'aiguilles sur un cactus.

II.2.4 Dislocation vis

La dislocation vis tire son nom du fait que chaque point sur le « plan » atomique perpendiculaire à la ligne de dislocation monte d'un pas égal à \vec{b} à chaque tour d'une trajectoire qui enroule la dislocation. La topologie du champ de contrainte autour de la dislocation est donc celle d'une hélice, ou encore, si on fait le tour de la ligne en sautant d'atome en atome, on monte de \vec{b} lorsque l'on fait un tour (FIG.2.4).

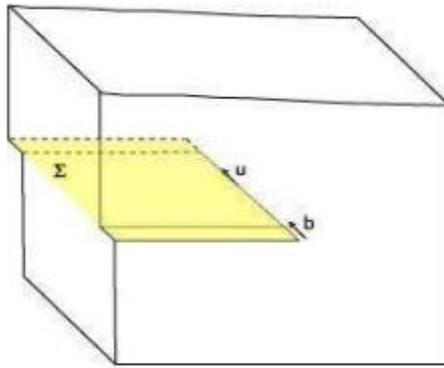


Fig. 20. Représentation des dislocations vis dans un cristal.

II.2.5. Dislocation réelle

Dans le cas général, la dislocation a un caractère dit mixte, où le vecteur de Burgers \vec{b} et le vecteur unitaire \vec{u} de la ligne forment un angle quelconque (FIG.2.5).

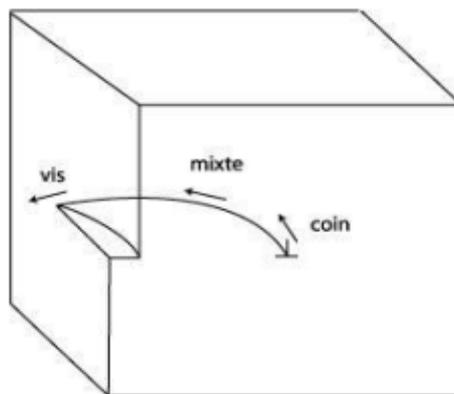


Fig. 21. Représentation des dislocations réelles dans un cristal.

II.3. Propriétés élastiques des dislocations

Par définition des dislocations introduisant la notion de coupure dans un milieu élastique, il est clair que des déformations élastiques sont créées dans le milieu et que la dislocation est le centre d'un champ de contrainte. Le travail effectué au cours des opérations de coupure correspond à l'énergie interne des dislocations. D'autre part, puisqu'une contrainte exerce une force sur une dislocation donnée, une dislocation exercera, du fait de son champ de contrainte, une force sur tout autre dislocation, et réciproquement : il y a interaction élastique entre les dislocations.

II.3.1. Rappels d'élasticité

Lorsqu'on exerce une contrainte sur un cristal, celui-ci se déforme. Si le cristal reprend sa forme quand la contrainte est relaxée, la déformation est dite élastique et est régie par la loi de Hooke qui établit la proportionnalité entre contrainte et déformation. Le coefficient de proportionnalité est le module élastique qui s'exprime en unité de contrainte puisque la déformation est une quantité sans dimension.

II.3.1.1. Sollicitation en traction :

On applique la contrainte σ et la déformation résultante ε est l'allongement relatif (voir Fig. ci-après).

On a : $\sigma = E \cdot \varepsilon$

Où E est le module d'Young ($E = 200GPa$) pour les aciers, $E = 100GPa$ pour le Cu, $10GPa$ pour le Pb).

L'allongement est accompagné d'une contraction latérale $\frac{\Delta r}{r_0} = -\nu \varepsilon$ où ν est le coefficient de Poisson.

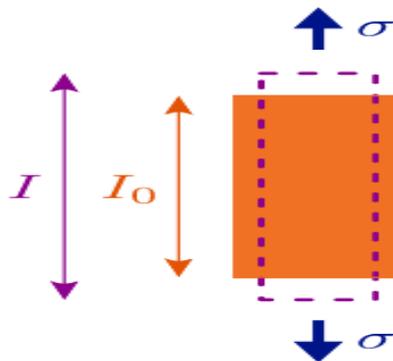


Fig. 22. Sollicitations en traction

II.3.1.2. Sollicitation en cisaillement :

Dans ce cas, la contrainte appliquée, appelée cession, n'est pas normale mais parallèle (tangentielle) aux faces sur lesquelles elle s'exerce (voir Fig.).

La déformation γ s'exprime en valeur relative par le déplacement par unité d'épaisseur c'est-à-dire par l'angle γ indiqué sur la figure.23.

La loi de Hooke s'écrit : $\tau = \mu \cdot \gamma$ où μ est le module de Coulomb ou module de cisaillement.

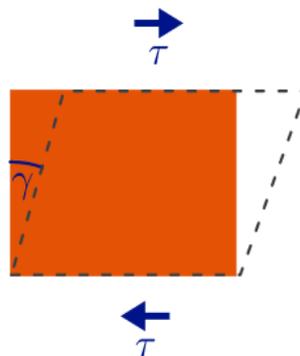


Fig. 23. Sollicitations en cisaillement

II.3.1.3.Cas général

Dans le cas général (voir Fig. ci-après), les contraintes qui s'exercent sur les faces d'un cube élémentaire sont telles qu'elles sont opposées deux à deux puisque le solide est en équilibre.

Par exemple, la contrainte qui s'exerce sur la face perpendiculaire à OX peut se décomposer en une contrainte normale σ_x et deux contraintes tangentielles τ_{xy} et τ_{xz} , il en est de même sur les trois autres faces si bien que l'on doit considérer 3 composantes normales $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ (contraintes de traction) et 6 composantes tangentielles $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{yx}, \tau_{zx},$ et τ_{zy} (contraintes de cisaillement) pour décrire complètement l'état de contrainte.

Mais, afin qu'il n'y ait pas de couple qui agisse sur le matériau, la condition d'équilibre impose : $\tau_{xy} = \tau_{yz}, \tau_{xz} = \tau_{zx}$ et $\tau_{yz} = \tau_{zy}$.

De même la déformation du solide s'exprime à l'aide de 6 composantes indépendantes : $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ (déformations en traction) et $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ (déformations en cisaillement).

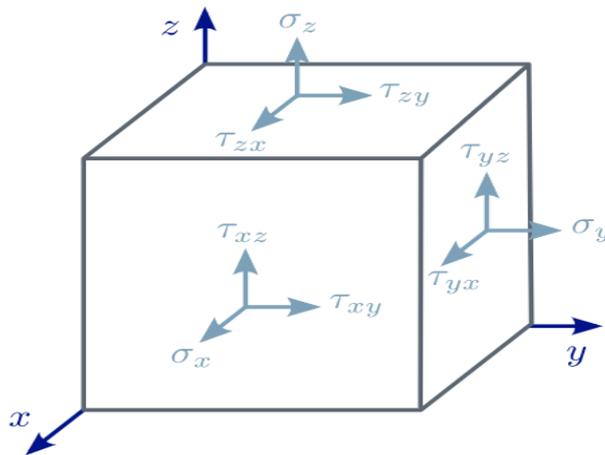


Fig. 24. Contraintes sur les faces d'un petit cube élémentaire.

II. 5. 2. Champ de contrainte élastique.

Comme une dislocation isolée est une singularité élastique, elle développe un champ de contraintes à longue distance. Autour d'une dislocation, les liaisons entre les atomes sont perturbées. Typiquement pour une dislocation coin, et au dessus de celle-ci, la couche supérieure se trouve en tension tandis qu'en dessous la couche est en compression.

En assimilant le réseau cristallin à un milieu continu élastique, le champ de contraintes autour de la dislocation peut être déterminé.

II.11. Limite d'élasticité d'un cristal

On réalise plusieurs essais de traction sur par exemple un monocristal d'aluminium en faisant varier la direction de l'axe de traction par rapport à la structure du cristal. On observe des stries (ou marches) semblables à celle de la figure 25.a). On observe aussi que le matériau n'a pas le même comportement selon la direction de traction choisie (voir figure 25.b).

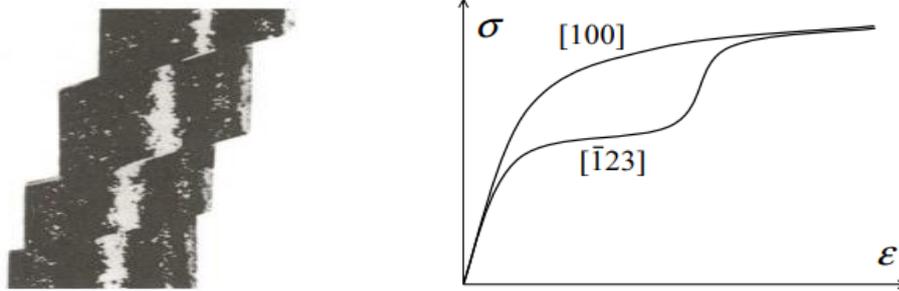


Fig. 25. a) Déformation plastique d'un monocristal d'aluminium en traction.
 b) Courbe de traction schématique d'un monocristal d'aluminium pour deux axes de traction différents.

II.4. Energie de dislocation

La création d'une dislocation dans un cristal requiert une certaine énergie, elle est la somme de l'énergie élastique due aux champs de contrainte et de déformation étudiés précédemment et de l'énergie de cœur (très difficile à évaluer compte tenu du caractère très fortement déformé de cette région, mais généralement faible devant $E_{\text{élastique}}$).

$$E_{\text{dislocation}} = E_{\text{élastique}} + E_{\text{cœur}} \approx E_{\text{élastique}}$$

Lors d'une déformation élastique, le matériau emmagasine, par unité de volume, une énergie :

$$W = \int_0^{\gamma} \sigma d\epsilon = \int_0^{\epsilon} E \epsilon d\epsilon = \frac{E \epsilon^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2E} ; \text{ en traction}$$

$$W = \int_0^{\gamma} \tau d\gamma = \int_0^{\gamma} \mu \gamma d\gamma = \frac{\mu \gamma^2}{2} = \frac{\tau^2}{2\mu} ; \text{ en cisaillement}$$

Dans le cas d'une dislocation vis, les seules contraintes sont des contraintes de cisaillement :

$$\frac{dE_{\text{élastique}}}{dV} = \frac{\tau^2}{2\mu}$$

$$\frac{dE_{\text{élastique}}}{l \cdot 2\pi r dr} = \frac{\tau^2}{2\mu}$$

$$E_{\text{élastique}} = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\mu b}{2\pi} \right)^2 \int_{r_0}^R \frac{2\pi l}{\gamma} d_r = \frac{\mu b^2}{4\pi} \log \left(\frac{R}{r_0} \right) \text{ par unité de longueur}$$

Dans le cas d'une dislocation coin :

$$\frac{dE_{\text{élastique}}}{dV} = \frac{E \epsilon^2}{2}$$

$$\frac{dE_{\text{élastique}}}{l \cdot 2\pi r dr} = \frac{E b^2}{8\pi^2}$$

$$E_{\text{élastique}} = \frac{\mu b^2}{4\pi(1-\nu)} \log \left(\frac{R}{r_0} \right)$$

Dans le cas général, on peut écrire :

$$E_{\text{élastique}} = \frac{\mu b^2}{4\pi\chi} \log\left(\frac{R}{r_0}\right) \text{ par unité de longueur.}$$

Avec $\chi = 1$ pour es dislocations vis, $\chi = (1 - \nu)$ pour les dislocations coin.

II. 5. Mouvement des dislocations

Il existe deux types de mouvement :

- le glissement, correspondant au mouvement de la dislocation dans le plan défini par son vecteur de Burgers et la direction de sa ligne
- la montée correspondant au mouvement en dehors du plan de glissement.

a. Glissements de dislocation

On dit qu'un comportement est plastique lorsqu'un matériau est capable de présenter des déformations irréversibles sous l'effet d'une contrainte extérieure. La déformation plastique englobe toutes les déformations à caractère permanent.

Dans la majorité des cas, elle est associée au mouvement des dislocations qui se caractérise par la localisation de la déformation entre plans cristallins qui est révélée par la présence de traces de glissement à la surface des matériaux déformés [11, 8].

L'origine de la déformation plastique des métaux est le glissement irréversible de certains plans cristallographiques par rapport aux autres. Le mécanisme qui permet ce glissement est le mouvement des dislocations suivant certains plans et selon certaines directions cristallographiques.

Ce mouvement est dit « conservatif » car il ne nécessite pas de transport de matière. Il s'effectue de proche en proche par la rupture et le recollement des liaisons atomiques à la manière dont on ferait glisser une double fermeture éclair. Ce type de mouvement est particulièrement efficace pour propager la déformation, et se produit généralement sans autre apport énergétique qu'une faible contrainte extérieure. De façon imagée, on s'imagine très bien qu'il est plus facile de traîner un tapis sur le sol en faisant propager une série de petits bosses plutôt que de tirer l'ensemble du tapis (FIG.26).

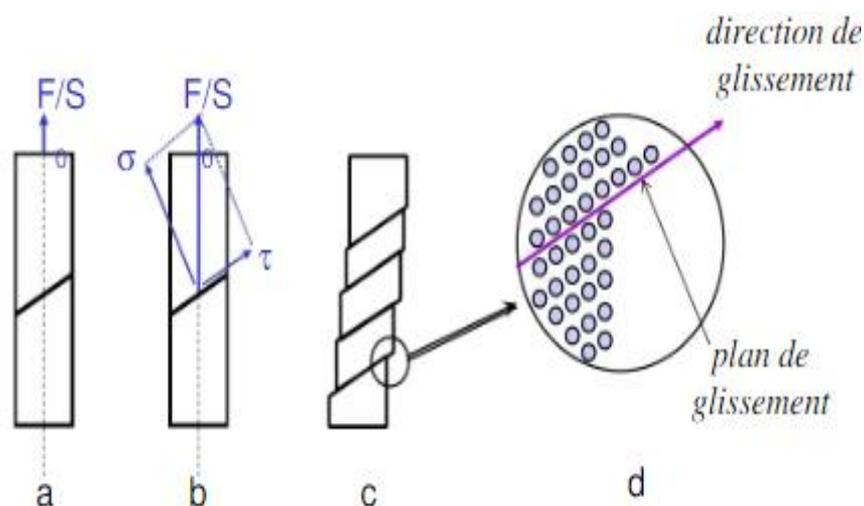


Fig. 26. Déformation due au glissement irréversible de certains plans cristallographiques par rapport aux autres.

a : cristal avant essai

b : décomposition de la contrainte en une composante normale σ et une composante tangentielle τ

c : cristal après déformation plastique

d : représentation schématique d'une marche de glissement

Les plans de glissement actifs dans les métaux (Tableau.2), dans les structures cristallographiques les plus courantes (CC, CFC et HC), sont les plans de plus forte densité atomique.

Par ailleurs, dans chacun de ces plans, la direction de glissement correspond à la direction cristallographique de plus grande densité atomique. Le plan de glissement et la direction de glissement définissent le système de glissement de la dislocation.

Structure	Direction	Plan	Nombre de systèmes
CFC	$\langle 110 \rangle$	$\{111\}$	12
CC	$\langle 111 \rangle$	$\{110\}$ $\{112\}$	12 12
HC	$\langle 11\bar{2}0 \rangle = a$ $\langle 11\bar{2}3 \rangle = a + c$	$\{0001\}$ basal $\{10\bar{1}0\}$ prismatique $\{10\bar{1}1\}$ pyramidal 1 $\{11\bar{2}2\}$ pyramidal 1	3 3 6 6

Tableau .2. Systèmes de glissement pour les trois principales structures métalliques [11].

Dans les matériaux cristallins, la seule composante qui est capable d'activer les mécanismes de déformations permanentes est la contrainte tangentielle.

Facteur de Schmid

Considérant un cylindre monocristal sollicité en traction. Les glissements se produisent dans les plans denses qui subissent une contrainte de traction. Cette dernière va créer des contraintes de cisaillements dites de cission dans des plans inclinés par rapport à l'axe de traction (figure.27).

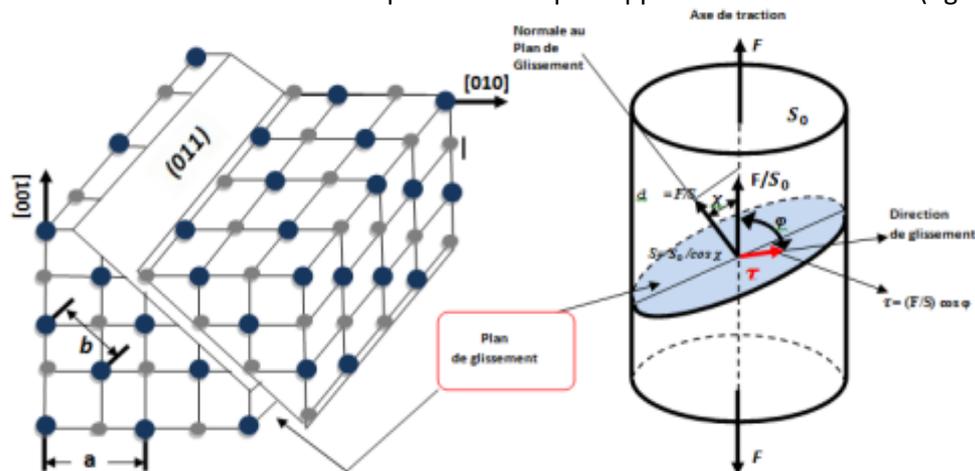


Fig. 27. Glissement des plans atomiques denses dans un monocristal en traction [27].
On écrit donc l'équation qui traduit ces contraintes [27]:

$$\tau = \frac{F}{S} \cos \phi \quad \dots\dots\dots (111)$$

et

$$S = \frac{S_0}{\cos \chi} \quad \dots\dots\dots (111)$$

Ce qui nous donne la formule de la contrainte de cisson suivante:

$$\tau = \sigma \cos \phi \cos \chi \quad \dots\dots\dots (111)$$

L'équation (I.12) est connue sous le nom de loi de Schmid et le terme $(\cos \phi \cos \chi)$ est appelé facteur de Schmid. Cette loi permet de relier σ en τ pour un système de glissement déterminé.

II. 5. 1. Vecteur de Burgers.

Le vecteur de Burgers se définit comme étant le vecteur nécessaire à boucler un circuit initialement fermé dans le cristal parfait et qui se trouve ouvert lorsqu'il enlace la ligne de dislocation. Ce vecteur n'est pas quelconque dans un cristal mais représente une translation du réseau. Par exemple dans l'aluminium qui est cubique à faces centrées, le vecteur de Burgers traditionnellement rencontré est $b = \frac{a}{2} [110]$, de norme $|b| = 0.29nm$. En termes plus mathématiques, il s'agit de l'intégrale du déplacement sur un circuit fermé enlaçant la ligne de dislocation.

Physiquement, le vecteur de Burgers représente l'amplitude de la déformation transportée par une dislocation. Comme les dislocations sont des objets flexibles, deux dislocations peuvent interagir pour former une troisième dislocation, si et seulement si, la quantité de déformation est conservée : on parle de jonction attractive. Il s'ensuit qu'à un nœud entre plusieurs dislocations, la somme des vecteurs de Burgers est nulle (analogie avec la loi de Kirchhoff).

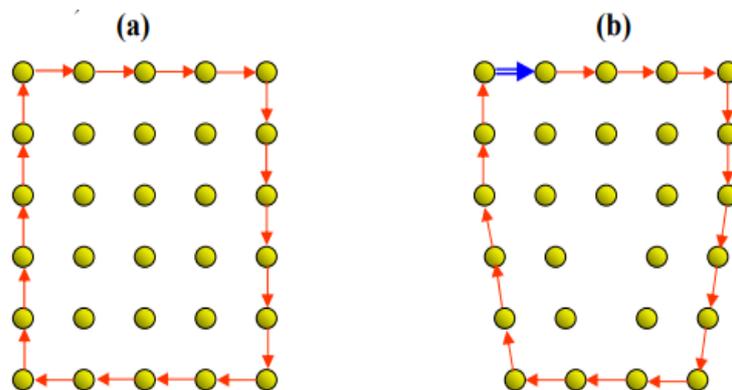


Fig. 28. Construction du vecteur de Burgers d'une dislocation coin.
(a) cristal parfait, (b) dislocation coin.

II.6. La montée

On dit montée lors du mouvement des dislocations coins d'un plan de glissement vers un plan adjacent parallèle (figure.29). Ce processus est thermiquement activé. Il est basé essentiellement sur les lacunes qui assurent la montée des dislocations coins, et ce processus est non-conservatif. Il se produit grâce à la diffusion des lacunes ou atomes interstitielles vers le cœur de la dislocation [18].

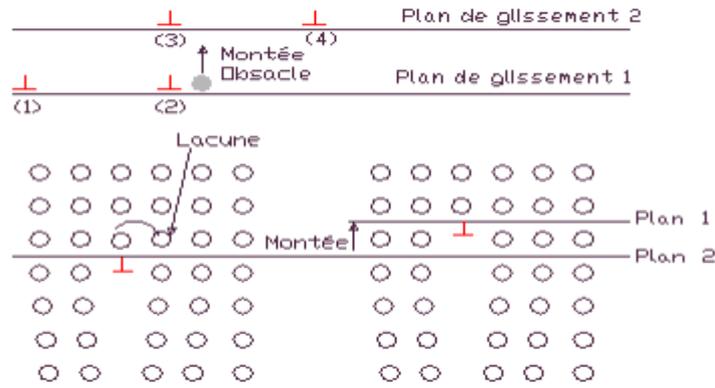


Fig. 29. Montée d'une dislocation coin [18].

II.7. Force agissant sur une dislocation

Par application d'un champ de contrainte extérieure σ , il est possible de déplacer une dislocation dans son plan de glissement. La dislocation est alors soumise à une force F , définie par l'équation de Peach et Koehler ($l \rightarrow$ vecteur parallèle à la ligne de dislocation).

$$\vec{F} = \left(\vec{\sigma} \cdot \vec{b} \right) \wedge \frac{\vec{l}}{l} \text{ (Force par unité de longueur de dislocation) } \dots\dots\dots (111)$$

La force est normale en tout point à la ligne de dislocation.

II.8. Interaction élastique dislocation-dislocation

À toute dislocation correspond un champ de contrainte. En conséquence, toute dislocation présente dans un cristal exerce une force sur les autres dislocations. On peut calculer cette force en appliquant la formule de Peach et Koehler. Dans le cas simple de deux dislocations vis parallèles de vecteurs de Burgers b et b' distantes de r , la force est :

$$F = \frac{\mu b \bar{b}}{2\pi r} \dots\dots\dots (111)$$

II.9. Interactions dislocation atomes de soluté

Les dislocations attirent les atomes ne faisant pas partie du réseau (atomes étrangers : impuretés ou éléments d'alliage). Si ces atomes étrangers sont mobiles, ils migrent vers les dislocations et constituent un « nuage de Cottrell ». Ce nuage gêne le mouvement des dislocations, ceci explique que les métaux purs sont plus ductiles que les alliages.

II.10. Interactions dislocation-précipité

II.12. Durcissement par précipitation (Durcissement structurale)

4.1 Définition de la précipitation

La précipitation d'une solution solide sursaturée est une transformation de phases caractérisée par une germination et une croissance d'une ou de plusieurs phases, elle consiste en général en une décomposition de la solution solide sursaturée (la matrice mère) en une nouvelle phase (le précipité) et une nouvelle solution solide (la matrice appauvrie). La précipitation peut se produire à la température ambiante ou à une température plus élevée.

Les dislocations se déplacent sous l'effet de forces assez faibles. Comment alors durcir un matériau, c'est-à-dire élever sa limite élastique. Autrement dit, comment réussir à bloquer les dislocations? Les défauts du cristal s'attirent ou se repoussent. Ainsi une dislocation peut être attirée ou repoussée par un atome étranger (soluté) ou mieux par un groupement d'atomes étrangers: un précipité. L'effet de durcissement dû aux précipités se traduit par une augmentation de la limite élastique. Les dislocations ne font que s'arquer entre les points d'ancrage que constituent les précipités (Figure. 30)

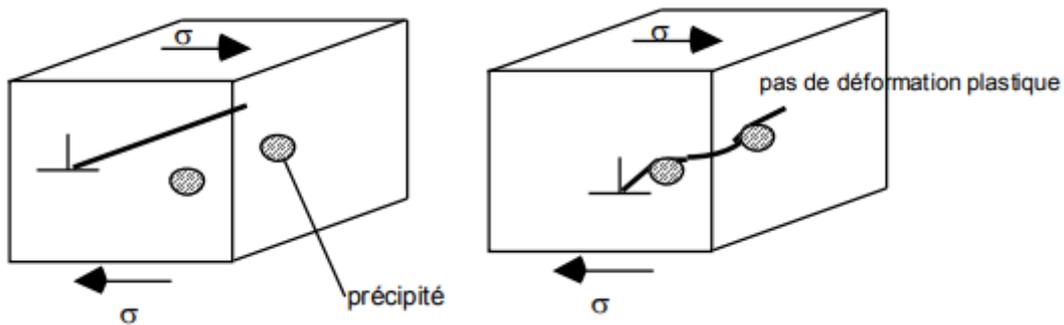


Fig. 30. Les précipités (groupements d'atomes étrangers) bloquent les dislocations et empêchent ainsi la déformation plastique.

La mise en place de particules « étrangères » (des précipités) sur le parcours des dislocations retarde leur mouvement. Le durcissement structural c'est le processus par excellence qui permet d'obtenir une résistance mécanique élevée. On obtient le durcissement structural grâce à une série de chauffages et de refroidissements contrôlés c.-à-d. traitements thermiques dont le but final est l'obtention d'une répartition optimale des précipités dans la matrice. Les propriétés mécaniques dépendront de :

- La répartition des précipités,
- De leur taille et de leur distance moyenne.

Il s'agit de voir comment une répartition fine des précipités peut être obtenue par un traitement thermique approprié ?

Les précipités sont des groupements d'atomes étrangers qui s'obtiennent lorsqu'on fait des alliages métalliques, par exemple ajouter 4% de cuivre dans l'aluminium pour faire un alliage Al-4%Cu, alliage de base pour l'aviation. Les précipités de cuivre, plus précisément Al_2Cu , bloquent efficacement les dislocations de l'aluminium empêchant la déformation plastique des ailes d'avion. En conclusion, si on veut durcir un métal, on introduit des précipités d'éléments d'alliage qui bloquent les dislocations. Si au contraire, on veut adoucir un alliage métallique pour pouvoir le déformer (mise en forme d'une carrosserie), on dissout les précipités en chauffant l'alliage dans un domaine de température où la solubilité est plus grande.

Chapitre III : Alliages d'aluminium

III.1 Historique et fabrication de l'aluminium

1854: première apparition de l'aluminium lors d'une présentation à l'Académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville, sous la forme d'un lingot. Cette pièce avait été obtenue par voie chimique 1886: invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA) Depuis l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attiré au transport : aviation, automobile, marine. Il est aussi employé dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique etc...

III.2 Avantages techniques et économiques

La course à l'allègement est une force motrice majeure d'évolution. Ainsi, les alliages d'aluminium sont fortement concurrencés par les composites à matrice polymère et à renforts tissés. Après l'abandon au début des années 1990, pour des raisons surtout économiques, du développement d'alliages radicalement nouveaux à forte teneur en lithium, les producteurs d'aluminium ont répondu par des améliorations incrémentales, mais importantes, des alliages classiques des séries dites 2000 et 7000. Combinées à la mise en œuvre de nouveaux traitements thermiques, elles ont permis des allègements de l'ordre de 10 % par rapport aux alliages de la génération A330-340. D'où une bonne résistance à la percée récente des composites : ainsi la structure de l'A380, comprend plus de 60 % d'alliages d'aluminium.

S'il est compréhensible que les affichages reflètent en partie les préoccupations économiques et sociales, il en résulte toutefois que la Métallurgie (la science des matériaux aussi) ne peut émerger à ces financements que comme discipline ancillaire : la « Métallurgie pour... ». Certes sa richesse et sa variété la rendent capable de participer à tous ces programmes, mais comme elle n'est jamais au cœur d'aucun, on court le risque de négliger la construction de compétences de fond (en thermodynamique et cinétique, en Métallurgie mécanique, en transformations microstructurales, en physicochimie de la corrosion...) au profit de réponses conjoncturelles à des appels d'offre où elle ne fait que suivre.

Les emplois de l'aluminium et de ses alliages se sont développés dans des proportions surprenantes pour des raisons techniques et économiques.

Les raisons techniques sont nombreuses :

- ✓ l'aluminium est un métal dont la densité est faible, ce qui vaut à ses alliages la dénomination d'alliages légers. L'aluminium est le métal le plus léger après le lithium et le magnésium, Tableau .3:

Métal pur	Masse volumique (kg/dm ³)
Lithium	0,53
Magnésium	1,74
Aluminium	2,70
Titane	4,51
Fer	7,86
Cuivre	8,96
Plomb	11,40

Tableau .3: densité des métaux.

L'aluminium est donc 3,3 fois plus " léger " que le cuivre et 2,9 fois plus léger que le fer ; il " pèse " grossièrement 3 fois moins que les métaux industriels usuels.

C'est cette caractéristique qui a valu aux alliages d'aluminium leur développement dans les moyens de transport et en particulier dans l'aéronautique.

- ✓ l'aluminium conduit bien l'électricité et la chaleur.

Sa résistivité électrique est de $2,74 \cdot 10^{-8}$ W.m ; convertie en conductivité électrique comparée à celle du standard cuivre IACS, cela représente 63 %. Les alliages d'aluminium ont une conductivité plus faible que celle de l'aluminium pur, variant de 30 % à 50 % IACS. A poids égal de cuivre, l'aluminium a une conductivité électrique 2 fois supérieure, d'où les applications de l'aluminium dans le transport d'électricité haute tension sur grande distance.

- ✓ l'aluminium n'est pas magnétique.

Sa perméabilité magnétique relative est de 1,004 soit 50 fois plus faible que celle des aciers. Cette qualité s'ajoute à ses propriétés de conduction électrique et milite en faveur de son utilisation dans les blindages de câbles, dans les circuits électroniques et dans la réalisation de bon nombre d'appareils de mesure.

- ✓ l'aluminium a une bonne résistance à la corrosion.

L'aluminium a une grande affinité pour l'oxygène, et très vite une couche d'alumine recouvre sa surface ; cette couche est parfaitement couvrante et protège le métal sous-jacent. De plus, il est possible d'accroître cette protection par les traitements d'oxydation anodique (anodisation).

- ✓ l'aluminium est un métal robuste.

Si les caractéristiques de l'aluminium pur sont faibles, comme pratiquement celles de tous les métaux purs, la gamme d'alliage très étendue permet de trouver celui qui correspond aux contraintes d'utilisation envisagée.

En effet, les alliages les plus résistants peuvent avoir une charge de rupture supérieure à 700 MPa, donc largement équivalente à celles des aciers trempés.

- ✓ l'aluminium peut être utilisé dans une large plage de températures.

Contrairement à d'autres métaux, tel que l'acier, l'aluminium ne se fragilise pas aux basses températures et ses caractéristiques mécaniques augmentent même aux températures des gaz liquéfiés, d'où son utilisation en cryogénie.

Sa température de fusion est basse : 658°C, nettement inférieure à celle du cuivre (1083°C) et à celle du fer (1536°C) ; cela ne lui permet pas de résister aux très hautes températures. Il existe cependant des alliages qui résistent bien à des températures de l'ordre de 200°C souvent atteintes en aéronautique et en astronautique.

La charge de rupture de l'aluminium de pureté commerciale en fonction de la température est la suivante (Tableau .4):

Température	Charge de rupture
-196°C	160 MPa
-80°C	95 MPa
-30°C	85 MPa
20°C	80 MPa
100°C	60 MPa
200°C	30 MPa

Tableau .4: Caractéristiques mécanique et physique de l'aluminium.

La comparaison de l'aluminium avec les autres métaux utilisés industriellement montre qu'il est souvent plus intéressant pour des raisons techniques et économiques :

- ✓ A poids égal, un fil en aluminium conduit 2,1 fois plus d'électricité qu'un fil en cuivre et 18 fois plus qu'un fil en acier. A conduction électrique égale, le prix d'un conducteur en aluminium est égal à 40 % du prix d'un conducteur en cuivre.
- ✓ A poids égal, la résistance mécanique d'un produit en alliage d'aluminium 7075 est 2,3 fois plus forte que celle d'un bronze CuSn6 et 1,5 fois plus forte que celle d'un acier trempé. A résistance mécanique égale, le prix d'un produit en 7075 est égal à 35% de celui d'un produit en bronze CuSn6.
- ✓ A poids égal, l'absorption électromagnétique (aptitude au blindage électro-magnétique) d'une tôle en aluminium est 2,6 fois plus forte que celle d'une tôle en cuivre. A absorption électromagnétique égale, le prix d'un blindage en tôle d'aluminium est égal à 30 % de celui d'une tôle en cuivre.

III.3 Influence des éléments d'alliage

La résistance mécanique de l'aluminium pur est relativement faible et interdit son emploi pour certaines applications. Cette résistance mécanique peut être notablement augmentée par l'addition d'autres métaux, formant ainsi des alliages. Ceux-ci peuvent être classés en deux catégories :

- ✓ les alliages sans durcissement structural (alliages non trempants),
- ✓ les alliages à durcissement structural (alliages trempants).

Cette différence entre alliages est due à l'élément d'addition principal, quelle que soit sa teneur. Il n'y a rarement qu'un seul élément ajouté (élément principal). Des additions d'autres éléments secondaires vont aussi influencer sur les caractéristiques de l'alliage.

Il y a enfin des éléments présents dans l'alliage sans qu'ils aient été ajoutés volontairement ; ce sont les impuretés dont les plus importantes sont le fer et le silicium, et dont il faut contrôler précisément la teneur pour certaines utilisations car leur influence peut être défavorable. Tous les éléments jouent, par leur nature et leur teneur, sur plusieurs propriétés de l'alliage comme :

- ✓ les caractéristiques mécaniques (charge de rupture R_m , limite élastique $R_{p0,2}$, l'allongement à la rupture A%, la dureté HB),
- ✓ la masse volumique,
- ✓ les conductivités électrique et thermique,
- ✓ la résistance à la corrosion,
- ✓ l'aptitude au soudage,
- ✓ l'usinabilité,
- ✓ l'aptitude à la déformation,
- ✓ l'aptitude à l'anodisation.
- ✓ L'aluminium est capable de se " marier " avec grand nombre d'autres éléments donnant ainsi naissance à beaucoup d'alliages différents ayant un faisceau de propriétés très larges et permettant de satisfaire un grand nombre d'applications.

Les alliages d'aluminium sont classés en sept familles selon l'élément principal d'addition. Dans chaque famille, les différents alliages ont des caractères " génétiques " communs mais ont aussi chacun leur propre personnalité. Les alliages sont communément désignés par un numéro à 4 chiffres dont le premier désigne la famille :

Aluminium sans élément d'addition : 1000

Aluminium + cuivre : 2000

Aluminium + manganèse : 3000

Aluminium + silicium (alliages de moulage) : 4000

Aluminium + magnésium : 5000

Aluminium + magnésium + silicium : 6000

Aluminium + zinc + magnésium : 7000

Le tableau.5 donne les désignations des principaux alliages des 6 familles d'alliages de corroyage (à l'exception de la famille 4000), et compare les désignations françaises et étrangères.

France		ISO CEN	Allemagne		USA	Grande Bretagne	
Nouveau	Ancien					Nouveau	Ancien
1000 : aluminium sans élément d'addition							
1050A	A5	Al99.5	Al99.5	3.0255	(1050)	1B	1050A
1070A	A7	Al99.7	Al99.7	3.0275	(1070)	-	-
1080	A8	Al99.8	Al99.8	3.0285	1080	1A	1080A
1200	A4	Al99.0	Al99	3.0205	-	1C	1200
2000 : aluminium + cuivre							
2011	AU5PbBi	AlCu6BiPb	AlCuBiPb	3.1655	2011	FC1	2011
2014	AU4SG	AlCu4SiMg	AlCuSiMn	3.1255	2014	(H15)	(2014A)
2017A	AU4G	AlCu4MgSi	AlCuMg1	3.1325	(2017)	-	-
2024	AU4G1	AlCu4Mg1	AlCuMg2	3.1355	2024	-	-
2030	AU4Pb	AlCuPbMg	(AlCuMgPb)	(3.1645)	-	-	-
2618A	AU2GN	AlCu2MgNi	-	-	(2618)	H16	2618A
3000 : aluminium + manganèse							
3003	AM1	AlMn1Cu	AlMnCu	3.0517	3003	(N3)	(3103)
3004	AM1G	AlMn1Mg1	AlMn1Mg1	3.0526	3004	-	-
5000 : aluminium + magnésium							
5005	AG06	AlMg1	(AlMg1)	(3.3315)	5005	N41	5005
5052	-	AlMg2.5	AlMg2.5	3.3523	5052	-	-
5056A	AG5	AlMg5	AlMg5	3.3555	(5056)	N6	5056A
5083	AG4,5	AlMg4.5Mn	AlMg4.5Mn	3.3547	5083	N8	5083
5086	AG4MC	AlMg4	AlMg4Mn	3.3545	5086	-	-
5454	-	AlMg3Mn	AlMg2.7Mn	3.3537	5454	N51	5454
5754	AG3M	AlMg3	AlMg3	3.3535	-	-	-
6000 : aluminium + magnésium + silicium							
6005A	-	AlSiMg	AlMgSi0.7	3.3210	-	-	-
6060	AGS	AlMgSi	AlMgSi0.5	3.3206	(6063)	(H9)	(6063)
6061	-	AlMg1SiCu	AlMg1SiCu	3.3211	6061	H20	6061
6082	ASGM0.7	AlSi1Mg	AlMgSi1	3.3215	-	H30	6082
7000 : aluminium + zinc + magnésium							
7020	AZ5G	AlZn4.5Mg1	AlZn4.5Mg1	3.4335	(7005)	H17	7020
7075	AZ5GU	AlZn6MgCu	AlZnMgCu1.5	3.4365	7075	-	7075

Tableau .5: Caractéristiques mécanique et physique de l'aluminium
ISO : International Standard Organization (Normes mondiales)
CEN : Comité Européen de Normalisation (Normes européennes)
Désignations entre parenthèses = alliage similaire à l'alliage français

III.4. Influence des conditions de fabrication

III.4.1. Etats métallurgiques

Il est possible d'augmenter la résistance mécanique de l'aluminium et de tous ses alliages par déformation à froid appelée écrouissage. Cette déformation diminue simultanément l'aptitude des alliages à la déformation à froid (qu'il est possible de lui faire recouvrer par un traitement thermique de recuit qui confère au métal sa résistance mécanique minimum).

L'écrouissage a des effets sur plusieurs propriétés de l'alliage :

- ✓ la charge de rupture, la limite élastique et la dureté augmentent, alors que l'allongement à la rupture et la capacité de déformation à froid diminuent,
- ✓ la conductivité électrique diminue,
- ✓ la résistance à la corrosion diminue.

Le traitement thermique de recuit a les effets inverses.

L'écrouissage est la seule façon de durcir les alliages sans durcissement structural (alliages non trempants). Ces alliages appartiennent aux 3 familles suivantes :

- ✓ 1000 aluminiums sans éléments d'addition ;
- ✓ 3000 aluminiums + manganèse ;
- ✓ 5000 aluminiums + magnésium ;

Les autres familles peuvent être durcies en plus par traitements thermiques de durcissement structural.

Entre l'état recuit et l'état le plus dur normalement produit, il est défini plusieurs états intermédiaires ; ces états, dont les niveaux de dureté atteints sont croissants, peuvent être obtenus de deux façons : soit en partant d'un alliage complètement recuit et en l'écrouissant partiellement, soit en partant d'un alliage complètement écroui et en le recuisant partiellement (états partiellement recuits ou restaurés) ; l'écrouissage introduisant des contraintes internes au métal, il est nécessaire pour certaines applications de les supprimer par un traitement de stabilisation qui ne modifie que très peu les caractéristiques mécaniques de l'alliage.

Le tableau.6 donne les désignations normalisées des états écrouis :

Niveau de dureté	Etats écrouis	Etats restaurés	Etats stabilisés
Recuit	O		
1/8 dur	H11		H31
1/4 dur	H12 H13	H22	H32
1/2 dur	H14 H15	H24	H34
3/4 dur	H16 H17	H26	H36
4/4 dur	H18	H28	H38
extra dur	H19		

Tableau .6: désignations normalisées des états écrouis.

Il existe de plus d'autres états écrouis :

H111 : recuit et légèrement écroui (moins que H11) par exemple par traction ou planage,
H116 : s'applique aux alliages 5000 dont la teneur en magnésium est supérieure à 4 % et pour lesquels des limites de caractéristiques mécaniques et une résistance à la corrosion exfoliante sont spécifiées.

Les alliages des familles 2000, 6000 et 7000 peuvent être durcis par traitement thermique de mise en solution et trempe, suivi d'un durcissement structural qui s'effectue :

- ✓ soit à la température ambiante (maturation ou vieillissement naturel),
- ✓ soit par chauffage (revenu ou maturation accélérée ou vieillissement artificiel).

C'est par ces traitements qu'ils atteignent leurs caractéristiques maximales ; de plus, il est possible de combiner durcissement par écrouissage et durcissement par traitement thermique de mise en solution, trempe et maturation ou revenu.

La mise en solution, traitement thermique à haute température peut être faite dans un four mais pour certains alliages, en particulier ceux de la famille 6000, elle peut être faite au cours d'une opération de déformation à chaud.

Le tableau.7 donne la désignation normalisée des états ainsi obtenus valables en France et en Europe

Opérations	Traitement au four	Déformation à chaud
Trempe + maturation	T4	T1
Trempe + écrouissage + maturation	T3	T2
Trempe + revenu	T6	T5
Trempe + sous-revenu	T61	T51
Trempe + sur-revenu	T66	T56
Trempe + sur-revenu désensibilisant à la corrosion sous contrainte	T73	-
Trempe + sur-revenu désensibilisant à la corrosion exfoliante	T76	-
Trempe + écrouissage + revenu	T8	T10
Trempe + revenu + écrouissage	T9	-

Tableau .7: Désignations normalisées des états valables en France et en Europe.

T51, T56 : état normalisé uniquement dans la norme européenne NF EN 515 (Octobre 1993).
T10 : état normalisé uniquement dans la norme française NF A 02-006 (Novembre 1985) qui est annulée et remplacée par la norme européenne.

La trempe qui suit le traitement thermique de mise en solution introduit dans beaucoup de produits des contraintes internes qui les déforment, et qui peuvent nuire à certaines applications ; les produits sont alors détentionnés par traction, par compression ou par ces deux opérations combinées ; la désignation des états correspondants est obtenue en ajoutant derrière les chiffres, qui suivent la lettre T, donnés dans le tableau ci-dessus, les chiffres suivants :

Txx51 ou Txx510 : détentionnement par traction sans aucun dressage complémentaire après la traction.

Txx511 : détentionnement par traction suivi d'un dressage.

Txx52 : détentionnement par compression.

Txx54 : détentionnement par traction et compression combinées.

III.5. Technologies de mise en œuvre

III.5.1. Usinage

L'aluminium et ses alliages possèdent une bonne aptitude au travail par outils coupants, mais il y a lieu de tenir compte d'un certain nombre de particularités propres à ces matériaux.

- ✓ Les alliages légers ont une faible densité qui diminue les effets d'inertie et permet des vitesses de rotation et de translation élevées.
- ✓ La conductivité thermique élevée favorise le refroidissement, la chaleur étant évacuée presque totalement par les copeaux.
- ✓ Le faible module d'élasticité peut entraîner des déformations en cas de porte à faux.
- ✓ Les alliages contenant plus de 1 % de silicium (famille 4000, 2014A, 6081, 6181, 6082, 6351A) usent plus rapidement les outils, ce qui oblige à réduire la vitesse de coupe.

Pour tenir compte de ces particularités, il est judicieux d'utiliser :

- ✓ des machines puissantes, de 150 à 250 Wh/dm³ de copeaux et rapides car les vitesses de travail sont de 5 à 10 fois supérieures à celles convenant aux aciers.
- ✓ les outils ont des angles de coupe de 15° pour les alliages durs, 20° à 30° pour les alliages à faible dureté ; les dépouilles varient de 8° à 12°.
- ✓ la profondeur de passe peut être importante, jusqu'à 5 mm, mais le faible module d'élasticité interdit de grandes avances qui doivent être limitées à 0,2 mm/tour.
- ✓ pour la lubrification, l'huile soluble est conseillée pour les opérations d'ébauchage au tour et à la fraiseuse ; l'huile de coupe est préférable pour les opérations de finition, de taraudage et de sciage à la scie circulaire.
- ✓ les vitesses dépendent des alliages et des outils de coupe utilisés ; le tableau.8 donne des vitesses indicatives de tournage en m/min :

Alliages	Outil acier rapide	Outil carbure
1000, 3000, 5000	800 à 1000	supérieure à 1000
2000, 7000	600 à 800	1000
2014A, 5056A, 5086, 6082	400 à 600	600 à 800

Tableau .8: vitesses indicatives de tournage en m/min

III.5.2. Traitements de surface

Plusieurs objectifs sont dévolus aux traitements de surface :

- ✓ préparer la surface pour un assemblage ou un traitement de surface ultérieur,
- ✓ améliorer l'aspect et le rendre durable,
- ✓ protéger la surface contre la corrosion.

Traitements laissant la surface nue :

- Traitements mécaniques

* polissage : bufflage à l'émeri, tamponnage à la pâte à polir, avivage à la pâte à aviver.

* satinage mécanique ou brossage pour obtenir un aspect mat.

* sablage, grenailage pour recouvrement métallique ou peinture ; le grenailage améliore la résistance à la fatigue de la pièce.

- Traitements chimiques

* dégraissage en solvants, en vapeur de solvants ou en bain acide.

* décapage en bain de soude (3 à 10 % dans de l'eau à 40-70°C) suivi d'une neutralisation en bain d'acide nitrique (tous alliages sauf famille 2000) ou d'acide sulfochromique (famille 2000) et rinçage.

* brillantage en bain phosphorique-nitrique.

- Traitements avec revêtement protecteur :

* conversion chimique : procédé MBV, procédé Alodine.

* anodisation : ce procédé consiste à former à la surface du métal une couche d'alumine par électrolyse dans un bain acide.

Cette couche de quelques dizaines de microns est poreuse, présentant des pores perpendiculaires à la surface qu'il faut refermer pour que la couche soit vraiment protectrice ; ceci se fait par colmatage en trempant la pièce dans de l'eau bouillante ; on peut préalablement introduire dans les pores des pigments qui vont donner la teinte voulue à la surface après colmatage.

* revêtements métalliques : zingage, cuivrage, nickelage, chromage, étamage.

* peintures, laques, vernis, émaux.

III.5.3. Traitements thermiques

Le tableau.9 donne les plages de températures à utiliser selon les familles d'alliages pour les différents types de traitement thermique.

La précision des températures atteintes pour les traitements de mise en solution et de revenu est importante : elle doit être au plus de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Famille d'alliage	Recuit	Restauration	Mise en solution	Revenu
1000	325-360°C	225-280°C	-	-
2000	375-410°C refroidissement lent (40°C/h)	-	475-530°C	160-190°C
3000	345-400°C	250-300°C	-	-
5000	345-380°C	240-280°C	-	-
6000	365-410°C refroidissement lent (40°C/h)	-	530-535°C	165-185°C
7000	375-410°C refroidissement lent (40°C/h)	-	450-465°C	100-177°C

Tableau .9: Plages de températures pour les différents types de traitement thermique.

III.5.4.Procédés d'assemblage

Soudage

L'aluminium se recouvre spontanément à l'air d'une pellicule protectrice continue d'oxyde dont le point de fusion est très élevé (2020°C). Très stable, cette couche d'alumine est un obstacle qu'il convient d'éliminer au moment du soudage.

Le soudage oxyacétylénique est utilisé généralement pour des épaisseurs jusqu'à 3 mm. Il nécessite l'emploi d'un produit chimique décapant, le flux de soudage, pour éliminer la couche d'alumine ; le flux est porté par la baguette d'apport et doit fondre à une température légèrement inférieure à celle de la baguette ; il doit être éliminé après soudage car il entraîne une corrosion de l'aluminium. Le soudage à l'arc sous gaz inerte a l'avantage de ne pas nécessiter l'emploi de flux de soudage. Le procédé TIG (Tungsten Inert Gas) utilise une électrode réfractaire en tungstène thorié ; le soudage est fait généralement en courant alternatif sous argon. Le procédé MIG (Metal Inert Gas) utilise le métal d'apport comme électrode ; il est pratiqué en courant continu en polarité inverse (pôle négatif à la pièce) sous argon, ce qui permet une bonne élimination de la pellicule d'oxyde.

Les alliages d'aluminium peuvent aussi être soudés électriquement par point ou à la molette, par bombardement électronique qui permet de souder en une passe des épaisseurs atteignant 150 mm, par frottement et pression, par induction haute fréquence ou par ultrasons.

Brasage

Dans le cas du brasage fort, le métal d'apport est un alliage d'aluminium dont la température de fusion est supérieure à 450°C et inférieure à celle des pièces à assembler. Les familles d'alliages brasables sont : 1000, 3000, 5000 dont la teneur en magnésium est inférieure à 3 %, 6000 et 7000 exempts de cuivre.

Dans le cas du brasage tendre, le métal d'apport a une température de fusion inférieure à 450°C ; ce sont des alliages d'étain (température de fusion entre 180°C et 260°C), des alliages de zinc (température de fusion entre 350°C et 420°C), ou des alliages de cadmium (température de fusion entre 280°C et 320°C).

Dans tous les cas il est nécessaire d'utiliser un flux de décapage avant brasage qu'il faut éliminer après brasage.

Rivetage

Cette vieille technique est utilisée dans le cas d'assemblage sollicités mécaniquement, les efforts étant exercés dans le plan de joint des tôles ou des pièces.

Les alliages utilisés pour les rivets doivent être des alliages d'aluminium, compatibles avec les alliages des pièces à assembler pour éviter les risques de corrosion galvanique.

Les rivets sont généralement fabriqués dans les alliages 1050A et 3003 recuits ou écrouis, 5754 et 5086 recuits, 6061 et 6181 trempés et 2017A posés sur trempe fraîche.

III.5.5.Précautions d'emploi

Les produits en aluminium ont une surface fragile. Ils sont sensibles aux coups et aux rayures. De plus, les produits ne sont pas parfaitement rigides et peuvent être déformés. Il est indispensable de les manipuler et de les stocker en prenant un certain nombre de précautions :

- éviter tous les chocs avec des pièces métalliques,
- ne pas stocker les produits directement sur d'autres produits,
- éviter les frottements entre produits,
- si le stockage vertical n'est pas possible, il faut stocker les produits horizontalement avec suffisamment de supports pour que les produits ne se déforment pas.

Les produits en aluminium, même s'ils sont protégés par leur pellicule d'alumine, sont sensibles à la corrosion :

- les produits qui ont été mouillés doivent être parfaitement séchés avant stockage,
- il faut éviter tout phénomène de condensation ; celle-ci arrive lorsque des produits viennent de l'extérieur où il fait froid et qu'on les stocke dans un hall chauffé. Il faut débiller les produits et les laisser se réchauffer doucement dans un endroit aéré,
- la pellicule d'alumine naturelle a une épaisseur de l'ordre de 100 Å (10-5 mm) ; elle est attaquée par les acides forts, acide chlorhydrique, sulfurique ou nitrique, et par les bases comme la soude caustique.

Dans le cas de contact avec d'autres métaux en présence d'un liquide conducteur qui sert d'électrolyte, c'est le plus souvent l'aluminium qui est attaqué ; c'est le cas lorsque l'alliage d'aluminium est en contact avec le cuivre et les alliages cuivreux comme les laitons, le nickel, les aciers inoxydables non passivés, le fer, les aciers ...

III.5.6.Caractéristiques typiques des alliages et des états de livraison

Le tableau.10 donne des valeurs typiques de la composition et d'un certain nombre de propriétés physiques des alliages usuellement utilisés.

Alliage	Composition en %								Masse volumique kg.dm ⁻³	Conductivité électrique %IACS	Conductivité thermique W.m-1.K-1
	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Pb			
1050A	0,20	0,15							2,70	62	231
2017A		0,50	4,0	0,7	0,7				2,79	34	134
2024			4,3	0,6	1,5				2,77	30	120
2030			3,9	0,6	0,9			1,1	2,82	34	135
5083				0,7	4,4	0,15			2,66	29	120
5086				0,4	4,0	0,15			2,66	31	126
5754				0,3	3,1	0,3			2,67	33	132
6060	0,20	0,45			0,48				2,70	52	200
6082		1,00		0,7	0,9				2,71	41	174
7075			1,6		2,5	0,23	5,6		2,80	33	130

Tableau .10: propriétés physiques des alliages usuellement utilisés.

Le tableau.11 donne des valeurs typiques des caractéristiques mécaniques, des propriétés de mise en œuvre et des applications types de ces alliages.

Alliage	Etat	Caractéristiques mécaniques			Résist. corrosion	Aptitu. soudage	Usina.	Aptitu. déform.	Aptitu. anodis.	Applications
		Rm MPa	Rp02 MPa	A%						
1050A	O	80	30	42	A	A	C	A	A	Bâtiment, Cuisine
	H24	115	80	25	A	A	B	B	A	
2017A	T4	420	280	18	C	D	A	C	C	Méca.Géné
2024	T3	465	320	18	C	D	B	D	C	Aéro.
2030	T3	450	390	10	C	D	A	C	C	Décolletage
5083	O	305	160	23	A	A	C	B	A	Chimie, cryo transport
	H116	335	230	20	A	A	B	B	A	
5086	O	278	135	25	A	A	C	B	A	Chimie, cryo C. navale
	H22	310	225	18	A	A	B	D	A	
5754	O	220	100	23	A	A	C	B	A	Chaudron., marine
	H24	270	215	10	A	A	B	D	A	
6060	T5	220	190	16	A	B	C	C	A	Bâtiment
6082	T6	315	280	12	A	B	C	C	A	Transport
7075	T6	565	495	11	C	D	B	D	B	Aéro

Tableau .11: Caractéristiques mécaniques, des propriétés de mise en œuvre et des applications types de ces alliages. **A** : très bon - **B** : bon - **C** : moyen - **D** : mauvais, à déconseiller

III.5.7. Classement des alliages suivant leur utilisation

III.5.7.1. Usinage - Décolletage

L'aluminium et ses alliages s'usinent avec facilité à condition de prendre quelques précautions aux grandes vitesses de coupe et d'utiliser des outils adaptés. Les alliages d'aluminium s'usinent mieux que l'aluminium pur ; c'est en particulier le cas des alliages à durcissement structural. D'une manière générale, les alliages à hautes caractéristiques mécaniques, et donc à capacité de déformation à froid faible, s'usinent bien.

Les alliages - états les plus adaptés à l'usinage sont les suivants :

2017A T4, 2024 T3 ,2618A T851, 5083 H111, 6082 T6, 7075 T651

Les alliages spécifiques pour le décolletage contiennent du plomb ou du plomb et du bismuth (éléments qui favorisent grandement la fragmentation du copeau) sont les suivants :

011 T3, 2030 T3, 6262 T9

III.5.7.2. Soudage

Si de façon générale tous les alliages d'aluminium sont soudables, ils ne se comportent pas tous de manière identique ; il faut distinguer trois classes d'alliages :

* les alliages sans durcissement structural (familles 1000, 3000 et 5000), Ils ont une bonne soudabilité ; lorsqu'ils sont utilisés à l'état recuit, ils ne subissent pas de perte sensible de caractéristiques mécaniques au niveau de la soudure.

Par contre lorsqu'ils sont à l'état écroui, le durcissement dû à l'écrouissage disparaît au voisinage de la soudure.

Les alliages - états typiques sont les : 1050A O ,3003 O ,5083 H111, 5086 O ; l'addition de chrome dans ces deux derniers alliages améliore encore leur soudabilité.

* les alliages à durcissement structural exempts de cuivre (famille 6000 et certains alliages de la famille 7000). Le cycle thermique de soudage affecte les caractéristiques mécaniques du métal de base qui est généralement à l'état trempé-revenu ; cette perte est définitive pour les alliages de la famille 6000 sauf s'il est possible d'effectuer un nouveau traitement de revenu sur la structure soudée ; les alliages de la famille 7000 retrouvent une partie notable de leurs caractéristiques initiales par maturation à la température ordinaire.

Les alliages - états typiques sont les : 6060 T5, 6082 T6 ,7020 T5.

* les alliages à durcissement structural contenant du cuivre (famille 2000 et certains alliages de la famille 7000)

Ces alliages sont dans l'ensemble difficilement soudables parce que, d'une part, ils sont sujets aux criques lors de la solidification de la soudure et que, d'autre part, leurs caractéristiques mécaniques après soudage sont fortement diminuées. Toutefois ces alliages sont plus ou moins sensibles à ces phénomènes : le 2618A T851 est peu sensible aux criques. L'utilisation du procédé TIG à grande concentration d'énergie et à protection gazeuse accrue permet une amélioration notable des résultats.

III.5.7.3.Utilisations structurales

Les alliages d'aluminium sont très utilisés pour des applications structurales faisant concurrence aux aciers.

Le module élastique des alliages d'aluminium, de l'ordre du tiers de celui des aciers, conduit, pour éviter des fléchissements trop importants, à augmenter les épaisseurs des sections par rapport à celles des aciers ; de ce fait, l'allégement résultant du remplacement de l'acier par un alliage d'aluminium n'est pas dans le rapport des densités mais est compris entre 40 % et 60 %. Cependant, la possibilité d'obtenir avec les alliages d'aluminium des profils complexes permet de compenser le faible module élastique du métal par une forme des profils qui conduit à un moment d'inertie élevé.

Les alliages - états les plus utilisés sont les :

5083 H22, 5086 H24 ,5754 H24, 6005A T5 ,6061 T6, 6082 T6, 7020 T5

III.5.7.4.Contraintes mécaniques élevées

Lorsque les constructions sont soumises à des contraintes importantes, l'emploi des alliages ci-dessus conduirait à des épaisseurs ou à des sections incompatibles avec l'allégement recherché. Il est nécessaire alors d'utiliser des alliages à très hautes caractéristiques mécaniques ; ces alliages ont en contrepartie une faible résistance à la corrosion, une faible capacité de déformation à froid et des difficultés à être soudés ce qui limite leur emploi à des applications bien particulières. Les alliages - états utilisés sont les :

2014 T6, 2017A T4, 2024 T3, 7075 T6

III.5.7.5.Résistance à la corrosion

Les alliages d'aluminium sont réputés comme résistant relativement bien à la corrosion. Cependant, dans certaines conditions d'exposition, ils peuvent subir un endommagement. Celui-ci peut se manifester sous différentes formes qui dépendent de la composition de l'alliage et de son état métallurgique.

III.5.7.6.Composition

* Plus la teneur en impuretés fer et silicium est faible, plus l'aluminium et ses alliages résistent à la corrosion.

* Les alliages de la famille 3000 résistent aussi bien à la corrosion que l'aluminium de pureté commerciale.

* Les alliages contenant du cuivre (famille 2000 et certains alliages de la famille 7000) résistent mal à la corrosion.

* Les alliages de la famille 5000 résistent bien à la corrosion si la teneur en magnésium ne dépasse pas 4 %. Au delà de cette teneur, il est nécessaire de traiter thermiquement le métal (état H116).

* Les alliages de la famille 6000 ont un bon comportement et ceci d'autant plus qu'ils ont une très bonne aptitude à l'anodisation qui forme une couche d'alumine épaisse et protectrice.

* Les alliages de la famille 7000 sans cuivre résistent bien à la corrosion. Certains alliages à basse teneur en zinc sont utilisés comme placage de protection des tôles en alliage 7000 au cuivre destinées à l'aéronautique.

III.5.7.7.Etat métallurgique

* Les états écrouis résistent globalement moins bien que les états recuits.

* Les états trempés revenus (T5 et T6), qui confèrent à l'alliage ses caractéristiques maximales, résistent moins bien que les états sur-revenus (T7).

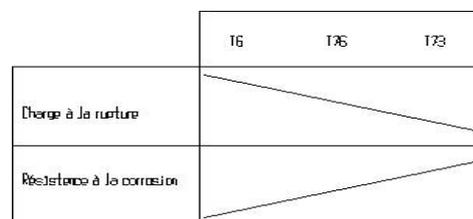


Tableau .12:

Le milieu en contact duquel est placé l'alliage d'aluminium a aussi son importance. Si le pH de ce milieu est compris entre 4 et 9, la couche d'alumine n'est pas dissoute et le métal résiste bien. Dans des milieux acides ($\text{pH} < 4$), les comportements sont très variables. L'aluminium par exemple résiste bien à l'acide acétique et à l'acide nitrique concentré et froid.

Dans les milieux alcalins ($\text{pH} > 9$), l'aluminium est généralement vigoureusement attaqué. Il résiste cependant bien à l'ammoniac et à de nombreuses bases organiques.

Lorsque l'aluminium est en contact avec des matériaux comme le graphite, l'acier doux ou un alliage cuivreux, dans un milieu très conducteur d'électricité comme l'eau de mer, il subit une attaque importante qui peut aller jusqu'à sa destruction complète.

III.5.7.8.Oxydation anodique

L'oxydation anodique ou anodisation permet d'édifier une couche d'oxyde beaucoup plus épaisse que la pellicule d'alumine naturelle ; cette couche confère ainsi au métal :

- une bonne protection contre la corrosion,
- une amélioration de l'aspect de surface, qui va durer dans le temps ; de plus la couche anodique peut être colorée,
- une modification de plusieurs propriétés de la surface comme par exemple : isolation électrique, pouvoir réflecteur, dureté superficielle, coefficient de frottement.

Les alliages d'aluminium ne se prêtent pas de façon identique au traitement d'anodisation. Les alliages les plus aptes appartiennent aux familles 1000, 5000 et 6000. Les alliages contenant du cuivre sont plus difficilement anodisables.

Famille **1000** : la couche est d'autant plus transparente que les teneurs en fer et silicium sont faibles.
 Famille **2000** : la couche a une épaisseur limitée et est poreuse, ce qui diminue son pouvoir protecteur.

Famille **3000** : la couche a une teinte plus ou moins grise.

Famille **5000** : la couche est grisâtre et dépend des autres éléments d'addition (chrome et manganèse).

Famille **6000** : le procédé d'anodisation est largement utilisé dans la menuiserie métallique.

Famille **7000** : les conditions d'anodisation doivent être ajustées à la composition et au type de protection recherchée.

III.5.7.9. Conducteurs électriques

La conductivité des alliages d'aluminium varie de 63 % pour l'aluminium pur à moins de 30 % pour certains alliages des familles 2000, 5000 et 7000.

Les conducteurs électriques sont fabriqués avec des alliages de deux familles :

1000 lorsque la résistance mécanique de l'aluminium est suffisante,

6000 lorsque le conducteur doit avoir une résistance mécanique supérieure.

III.5.7.10. Résistance à haute et basse température

L'alliage dont la résistance mécanique ne diminue pratiquement pas jusqu'à une température de 150°C est le 2618A :

Température	20°C	150°C	200°C
Charge de rupture	440 MPa	390 MPa	320 MPa

Tableau .13: Résistance mécanique de l'alliage 2618A en fonction de la température.

Pour les basses températures, atteintes dans des applications cryogéniques comme le stockage et le transport des gaz liquéfiés, on utilise le 5086 dont la charge de rupture augmente à basse température :

Température	20°C	80°C	195°C
Charge de rupture	278 MPa	295 MPa	390 MPa

Tableau .14: Résistance mécanique de l'alliage 5086 en fonction de la température.

Chapitre IV : Les céramiques techniques

L'emploi de nouvelles matières premières naturelles ou synthétiques a favorisé l'essor des céramiques techniques.

Les carbures, les nitrures, les borures. Très fort développement pour leur.

- Liaison covalente très forte ;
- Haute résistance à la température ;
- Peu chères ;
- Très haute résistance mécanique élastiques (faible ténacité et fragiles).
- Abondantes... La plus connue reste le diamant, utilisé industriellement pour élaborer des outils de coupe, des filières, etc.

Son coût élevé a largement contribué au développement de nouveaux matériaux.

La résistance mécanique d'une céramique moderne dépend de:

- Sa ténacité plus importante ;
- La distribution moins dispersée en taille des micro fissures.

La céramique technique se distingue de la céramique traditionnelle par la température de façonnage plus élevée, un contrôle plus précis des éléments constitutifs et des procédés de mise en forme rigoureux. Ainsi les céramiques techniques modernes présentent-elles, des valeurs de ténacité plus importante couplées à une distribution moins dispersée en taille de micro-fissures.

Parmi les produits considérés à base de céramiques, on distingue :

Industrie	Applications
céramiques /métallurgie	Hautes températures (2000°C). Matériaux réfractaires (haut fourneau, poche de coupe)
Mécanique	Particules abrasives : Polissage, outils de coupe matériaux durs (outils de coupe)
Energie et transport	Eléments chauffants pour les fours hauts de température, bougies d'allumage préchauffage, filtres à particules, supports de catalyseurs...
Energie solaire	Céramique: production de cellules solaires en silicium (économie d'énergie)
Aéronautique et spatial	Composites à matrice céramique : volets de tuyères, chambre de combustion, nez, bord d'attaque, bouclier thermique des navettes spatiales.
Médical	Biocéramiques chirurgie réparatrice, domaine dentaire
Electrotechnique et électronique	Substrat, condensateurs multicouches, thermistance, céramiques magnétiques...
Pièces détachées en céramique et produits pour l'industrie	Soupapes en céramique résistant aux acides et à la corrosion, Outils tranchants et de machine à fraiser en céramique, plus durs que l'acier, Boîtiers pour puces en micro-électronique. Semi-conducteur, outils de coupe, pièces chaudes de moteurs
Bureautique	Tambour en silicium amorphe des imprimantes Ecosys résistant grâce à ses substances en céramique dont durée de vie 30 fois supérieure.
Produits de consommation	Couteaux, ciseaux avec lames en céramique (esthétiques fonctionnels)
Revêtements céramiques	Dépôt de borures, carbures, nitrures, carbonitrures, carbone oxyde...

Tableau .15: Produits à base de céramiques et leurs applications.

V.1 Monocristaux d'alumine (saphirs et rubis)

Le rubis (rouge) est du corindon dans lequel les ions Al^{3+} sont partiellement substitués par des ions Cr^{3+} (0,1 à 2 %). La couleur rouge est due à l'effet du champ cristallin, Cr^{3+} , plus gros que Al^{3+} , déforme le site octaédrique. Le saphir (bleu) est du corindon dans lequel les ions Al^{3+} sont partiellement substitués par des ions Fe^{2+} et Ti^{4+} .

IV.2 Structure

Les céramiques sont composées d'oxydes métalliques, comme l'alumine (Al_2O_3), liés entre eux par frittage à partir de liens ioniques. Les céramiques sont donc des matériaux cristallins. Le point de fusion (plus de $2000^{\circ}C$) étant trop élevé et le matériau étant trop fragile toute mise en forme par moulage, forgeage ou laminage est impossible dans un contexte industriel.

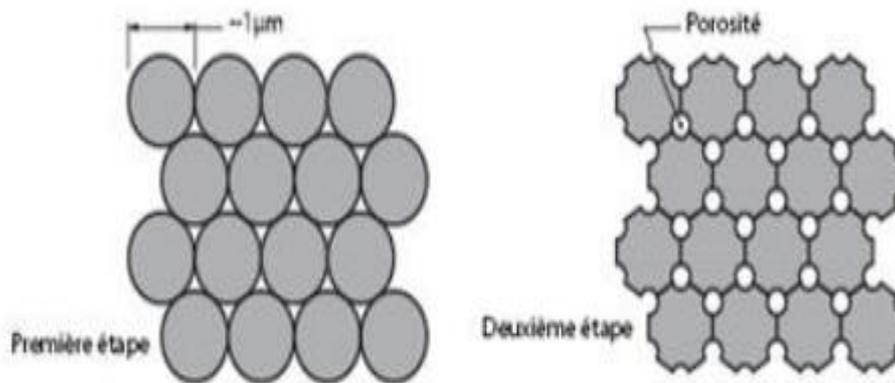


Fig.31. Densification

IV.3 Les différentes céramiques

Céramiques		Propriétés
Oxydes	Alumine (Al_2O_3)	a) Résistance 2500 MPa ; b) Dureté 1600 Hv ; c) Tf $2000^{\circ}C$; e) Isolateurs, support d'éléments chauffants, abrasifs..
	Oxyde de zirconium (ZrO_2)	a) monocristal : zircon ; b) Dureté élevée 1700 Hv ; c) Tf = $2700^{\circ}C$ f) Céramiques dentaires, filtres, pièces d'usure ...
	Titanate d'aluminium (Al_2TiO_5 et $Al_2O_3TiO_2$)	a) Résistance au choc thermique ; b) Résistance aux métaux fondus ; c) T
	PZT (titano-zirconate de plomb)	a) Céramiques piézoélectriques ; b) Conversion tension – déformation. Ex.: Haut parleur d'aigus (tweeter)
	Autres céramiques (oxydes)	a) Magnésie MgO résistant à la température b) UO_2 : Combustible nucléaire : pastilles d' UO_2 .
Silicates	Porcelaine	a) Mélange de quartz, feldspath et kaolin ; b) Produits artistiques, arts ; c) Isolation électrique ; d) 450 MPa en compression, 50 en traction.
	Autres céramiques	a) Silicate d'aluminium (argiles) : Briques, tuiles, carreaux, éviers... b) Stéatite, talc : $MgO-SiO_2$; c) Mullite $3Al_2O_3.2SiO_2$

	(silicates)	T
Carbures (Cermets)	Carbure de tungstène	a) WC: CerMet (métal céramique); b) Tf = 2870°C; c) Dureté 2400 Hv; d) Grande résistance à l'usure ; e) Outils de coupe ; f) Très dense ($\rho=15.600 \text{ kg/m}^3$).
	Carbure de silicium (SiC) pas en nature	a) Carborundum (abrasif); b) Semi-conducteur ; c) Tf = 3000°C; d) Très dur : 2500 Hv ; d) Fibres de SiC.
	Carbure de bore (B4C)	a) Densité 2520 ; b) Deuxième matériau le plus dur : 3200 Hv ; c) Tf = 2450 °C ; d) Blindages militaires, outils de coupe (revêtements).
Nitrures	Sialon	a) nitrure de silicium, nitrure d'aluminium et oxyde d'aluminium ; b) fibres; c) résistance à la chaleur $T>1000^\circ\text{C}$; d) 1800 Hv
	Nitrure de silicium (N4Si3)	a) Dur 1500 Hv; b) Billes de roulements céramiques ; c) Résistant aux chocs ; d). Roulement acier/céramique, Roulement céramique.
	Nitrure de bore	a) Structure graphitique 400 Hv, lubrifiant ; b) Structure diamant (cubique) ; c) Dureté Hv, juste sous le diamant.
Diamant (C)	a) En feuillets: graphite, cristallin : diamant; b) Monocristal (synthétique ou naturel). Matériau dur. Tf = 3550°C; Conducteur de la chaleur ; c) Polycristal Dur, mais T	

Tableau .16: Différentes types de céramiques

IV.4 Applications des céramiques techniques

Les céramiques techniques sont utilisées dans de différents domaines :

Navette spatiale ; - moteur, turbines, soupape moteur céramique ; Freins en céramique ; revêtement d'engins spatiaux ; condensateur céramique ; inertie chimique (implants, porcelaine dentaire, ...) ; stockage de déchets nucléaires ;

IV.4.1. - Matériaux durs (abrasifs et outils de coupe)

IV.4.1.1 Abrasif :

Particules géométriques irrégulières, à arêtes vives, qui agissent sur le matériau à usiner (meulage, rodage, polissage...). Les abrasifs les plus utilisés: Sable de silice; Eméri (alumine + oxydes de fer) ; Produits synthétiques: alumine, SiC, nitrure de bore, diamant

IV.4.1.2. Outils de coupe:

Particules fixées sur un support métallique possédant une ou plusieurs arêtes tranchantes qui coupent le matériau (tournage, fraisage...) les plus utilisés : Carbure de tungstène (matrice de cobalt) ; Nitrure de bore cubique ; Carbure de titane (matrice de nickel et molybdène).

Ces matériaux présentent des propriétés::

- a) Bonne tenue à chaud
- b) Dureté élevé
- c) Résistance mécanique élevée;
- d) Rigidité élevée ;

IV.4.2. Céramiques pour la construction mécanique

La fragilité est souvent un obstacle à l'emploi des céramiques pour des utilisations mécaniques quand les pièces sont soumises à des contraintes de tension.

Avec des propriétés particulières :

- résistance à l'usure-tenue à haute température-inertie chimique.

Certaines céramiques sont utilisées en construction mécanique Nécessité d'un très bon contrôle de la composition et de la microstructure (pores, fissures)

IV.4.3 Biocéramiques :

Chirurgie : prothèses, par exemple hanche (tête et cotyle en alumine frittée) :

a) Faible taux d'usure des surfaces de frottement ;

b) Excellente biocompatibilité de la céramique.

IV.4.4 Céramiques isolantes :

Isolateurs en verre ou porcelaine (système $Al_2O_3-SiO_2-MgO$)

a) Céramiques ferroélectriques : titanate de magnésium, strontium, calcium, baryum;

b) Céramiques ferrimagnétiques :

- Ferrites doux : antennes de réception, noyaux de transformateurs d'impulsion ou de puissance ex : Spinnelle $MO-Fe_2O_3$ (M=Ni, Mn, Zn, Mg) ;

- Ferrites durs : aimants permanents, hauts parleurs... ferrite de baryum.

IV.4.5 Céramiques réfractaires

IV.4.5.1 Des matériaux minéraux de synthèse, de grande diffusion ;

IV.4.5.2 Résistant à des températures élevées et à des agressions sévères (Corrosion, contraintes mécaniques à haute température...).

IV.4.6. Composites céramiques:

Matrice céramique avec fibres ou dispersion de céramiques, métaux ou polymères.

IV.4.6.1 Caractérisation

IV.4.6.2. Comportement thermochimique :

Corrosion

a) La dissolution ;

b) Les réactions complexes entre solides, liquides et gaz ;

c) L'érosion.

IV.4.6.3. Comportement thermomécanique :

Dégradations thermomécaniques dues

a) Aux chocs thermiques ;

b) A l'érosion mécanique à chaud ;

c) Aux sollicitations mécaniques.

IV.4.6.4. L'usinage des céramiques

a) Dureté élevée ;

b) Faible ténacité.

IV.4.6.5. Usinage avec outils diamantés

a) Arrosage important (eau ou autres lubrifiants) ;

b) Vitesse de rotation importante ;

c) Profondeur de passe faible.

IV.4.6.6 Microstructures des particulières :

Matériaux hétérogènes

a) Plusieurs phases minérales (agrégats) ;

b) Un système de liaison (cohésion de l'ensemble) ;

c) Une porosité.

IV.4.7 Élaboration par frittage

L'industrie de la céramique traditionnelle est ancienne, alors que la céramique technique qui remplace d'autres matériaux grâce à des performances, est récente, très variée et en évolution.

Bien que les deux types d'industrie soient différents, ils ont en commun le même schéma de fabrication:

Poudres → prétraitement → mise en forme → séchage → Traitement thermique frittage → produit fini
Le choix de la poudre selon des critères précis et de subir des prétraitements facilitant sa mise en forme, avec adjonction d'adjuvants.

Différents processus de mise en forme peuvent être utilisés pour obtenir des pièces: pressage uniaxial ou isostatique, coulage, extrusion, moulage par injection, usinage à cru...

Après compactage, les poudres doivent subir un déliantage.

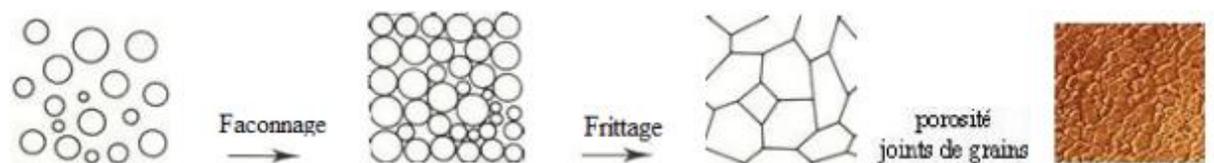
Ensuite, la cuisson ou frittage pour passer de la pièce crue, constituée de grains disjoints, à la pièce massive densifiée, constituée de grains plus ou moins soudés, et une porosité plus ou moins importante.

Enfin l'usinage et le contrôle. Le frittage est un traitement thermique qui permet de passer d'un système de particules individuelles vers un état solide compact. La conversion de la poudre en un solide dense a lieu par changement de la forme des grains de poudre, par le remplacement des interfaces solide-gaz par des interfaces solide-solide et par la disparition de la porosité.

IV.4.7.1 Densification

La densification lors du frittage peut être étudiée par dilatomètre, ce qui permet de suivre l'évolution de la densité de la céramique. Des mesures de densité et de porosité permettent d'évaluer le taux de porosité ouverte ou fermée obtenue lors du frittage. Les paramètres contrôlant le frittage sont : ► La température et la vitesse de chauffage; ► La pression appliquée;

► La composition du mélange des poudres; ► Le temps de maintien ; ► La granulométrie et la morphologie des particules de poudre.



Matières premières Particules agglomérées Céramique produit fritté milieu granulaire, non cohésif, milieu granulaire cohésif (les grains liés pas de propriétés mécaniques. entre eux); Propriétés mécaniques élevées

Fig.32. Consolidation thermique

IV.4.7.2 Frittage

Le frittage est exécuté en deux étapes :

Premièrement, on agglutine entre elles de fines particules de céramique (par compression ou par élimination de l'eau d'un mélange de particules de céramique et d'eau) ;

Deuxièmement, on chauffe la pièce à des températures plus ou moins élevées (900 à 1300 °C pour les céramiques traditionnelles et 1250 à 2600°C pour les céramiques techniques) pour créer des liens (sans fusion) entre les particules.

Le lien qui unit les particules des céramiques traditionnelles est aussi créé par la fusion de silice incorporée dans les mélanges quand le tout est exposé à la chaleur. On parle alors de cuisson plutôt que de frittage.

Sous l'action de la chaleur les céramiques crues se densifient et réduisent leurs porosités en présentant:

- * une perte de masses ;
- * une variation de longueur ;
- * une transformation du réseau cristallin.

Le frittage Basé sur la diffusion à l'état solide, Consolidation sous l'effet de la température d'un agglomérat pulvérulent.

Les particules se soudent entre elles pour donner un solide mécanique cohésive

A/ Frittage en phase solide avec deux cas:

a- Frittage non réactif (même constituant chimique au départ et à la fin);

b- Frittage réactif (la densification est accompagnée de réactions chimiques entre les constituants).

B/ Frittage est dit en phase liquide Si une phase liquide apparaît, la phase liquide (minoritaire pour la tenue mécanique de la pièce) peut provenir de la simple fusion d'un deuxième constituant présent (adjuvant de frittage ou impureté) ou d'une réaction eutectique entre différents constituants.

Selon les contraintes mécaniques appliquées, on distingue le frittage naturel et le frittage sous charge.

La contrainte peut être appliquée de manière uni axiale, machines HP (Hot Pressing) ou de manière isostatique, machines HIP (Hot Isostatic Pressing). Enfin, des machines permettent d'associer l'application d'une contrainte uni axiale et le passage de pulses de courant au travers de l'échantillon ou, du moins si celui-ci n'est pas conducteur, dans la matrice contenant l'échantillon; machines dites SPS (Spark Plasma Sintering) autorisant, des frittages rapides pour conserver des microstructures fines.

IV.4.7.2.1 Frittage naturel

Consolidation par traitement thermique sans pression extérieure ;

IV.4.7.2.2 Frittage sous charge Consolidation par traitement thermique sous une pression extérieure (uniaxiale ou isostatique) ;

IV.4.7.2.3 Frittage en phase solide La consolidation et l'élimination de la porosité se fait sans apparition de phase liquide nécessité de particules très fines et de hautes températures ;

IV.4.7.2.4 Frittage en phase liquide La consolidation et l'élimination de la porosité se fait avec apparition de phase liquide ;

IV.4.7.2.5 Frittage sans réaction Frittage précédé d'un chamottage (matières premières traitées à haute température puis broyées) ;

IV.4.7.2.6 Frittage réactif Mélange de poudre; réaction chimique pendant le traitement thermique.

IV.4.8 Propriétés et comportement des céramiques La cohésion des céramiques cas d'oxydes métalliques est assurée par des liaisons fortes et stables ioniques et/ou covalentes, les températures de fusion des céramiques sont élevées.

Du fait de la stabilité des liaisons chimiques, les céramiques possèdent une grande inertie chimique et résistante à la corrosion. Il implique tous les électrons des atomes en présence, les céramiques sont, de mauvais conducteurs (électriques et thermiques). Dans le cas des silicates, graphite, il existe des liaisons van der Waals.

La microstructure des céramiques, influence les propriétés mécaniques, caractérisées par l'absence de plasticité (fragile), dureté et rigidité élevées, faible résistance à la traction et bonne résistance à la compression. On peut classer les céramiques en deux classes, cristallines ou amorphes.

IV.4.8.1 Microstructure et porosité Du fait de la structure en poudre (0,1 à 1 µm) ou ultra-fine (1 à 100 nm), les effets de surfaces auront une importance sur les propriétés mécaniques. De même la porosité inévitable doit être réduite: au delà de 10% la céramique est inutilisable. La densification est fonction de la:

- a) Pression;
- b) Température;

c) Durée du palier.

Microstructures polycristallines similaires aux alliages métalliques. Chaque grain = monocristal parfait accolé à ses voisins par un joint de grains. Du fait de la structure en poudre (0,1 à 1 µm) ou ultra-fine (1 à 100 nm), les effets de surfaces auront une importance sur les propriétés mécaniques. De même la porosité inévitable doit être réduite: au delà de 10% la céramique est inutilisable. La densification est fonction de la:

- a) pression ;
- b) température ;
- c) durée du palier. 3

IV.5. Propriétés des céramiques

Les céramiques sont des matériaux qui ont généralement les propriétés suivantes :

- Mauvais conducteurs de chaleur et d'électricité ;
- Très résistant à la corrosion.
- Température de fusion élevée ;
- Rigidité élevée ;
- Faible résistance en tension (matériau fragile) ;

IV.5. 1.Sélection

Le choix d'une céramique, se fait par référence à la durabilité (inertie chimique face aux agents corrosifs, stabilité face au rayonnement lumineux, faible sensibilité aux variations climatiques...) et a des critères (esthétiques, historiques,...).

Selon la concurrence avec les autres matériaux et le cout de l'énergie.

- a) Mécaniques: essais traction, fatigue, dureté, impact, fluage, ... ;
- b) Physiques: densité, conductivité, coefficient d'expansion thermique ;
- c) Chimiques: corrosion ;
- d) Microscopique: durcissement, microstructure, granulométrie, ségrégation, inclusion
- e) Considérations liées au processus: formabilité, usinabilité, emboutissabilité, soudabilité... ;
- f) Coût et disponibilité ;
- g) Considérations liées à la vente: couleur et fini de surface.

IV.5. 2. Utilisation des matériaux selon:

- a) Les propriétés mécaniques ou physiques ;
- b) La disponibilité ;
- c) Le coût qui dépend:
 - * Problème de rentabilité (rapport qualité/prix) ;
 - * Mode de fabrication (mise en œuvre).
- d) Facilité de mise en œuvre (choix des matériaux : brasage, soudage) ;
- e) Compatibilité avec l'environnement:
 - * Problèmes de nuisance (bruit, déchets) ;
 - * Recyclage (métaux, polymères).

Chapitre V : Les polymères

V.1 Introduction

Les polymères appartiennent à une science qui a pris son essor dans les années 40, car pendant la guerre, il est apparu nécessaire de fabriquer certains matériaux qui manquaient alors.

Avant 1940, il y avait déjà eu des sursauts. Les premiers soubresauts de la chimie des polymères sont apparus dès les années 1900.

A cette époque, on distinguait les molécules organiques en deux catégories:

- ✓ Les cristalloïdes
- ✓ Les colloïdes

Les cristalloïdes sont des composés organiques cristallisables, de température de fusion et de masses molaires définies.

Les colloïdes sont des molécules visqueuses, ne cristallisant pas et ayant des températures de fusion mal définies. Lorsque l'on mesurait leur masse molaire, on la trouvait supérieur à 100 000. Cela renforçait l'idée que ces molécules étaient des agrégats. Les chimistes allemands appelaient cette chimie la chimie des saletés (« Schmutzen Chemie »).

En 1925, Staudinger déclare que les colloïdes sont une association de plus de 100 000 atomes de carbones reliés entre eux par des liaisons covalentes. A l'époque, c'est une hérésie. (théorie de la chimie moléculaire)

Dans le début des années 1950, Carothers et Flory admettent et montrent que des édifices covalents de masse molaire supérieure à 100 000 existent.

C'est le fondement de la théorie des polymères.

Dès cette époque, on a établi la notion de polymères.

V.2 Définition du polymère

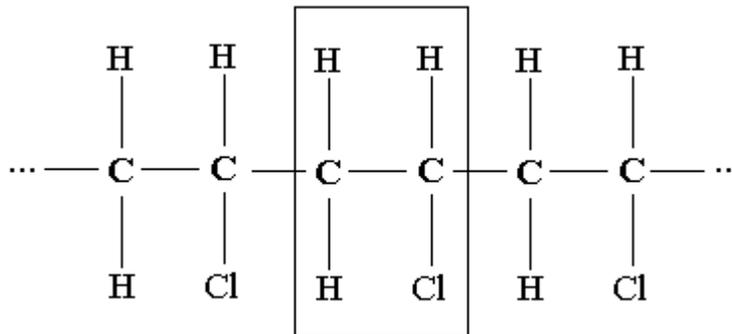
- Les *polymères* (du grec poly : nombreux, méros : parties) sont des molécules de très grande dimension, ou *macromolécules*, constituées par la **répétition** d'un motif *élémentaire*.
- Les molécules constituant le motif élémentaire sont appelées *monomères*
- La réaction conduisant à la formation de *polymères* à partir de *monomères* est la *polymérisation*.

Il y a des polymères naturels et des polymères synthétiques. Ils ont pris une importance considérable dans notre vie quotidienne

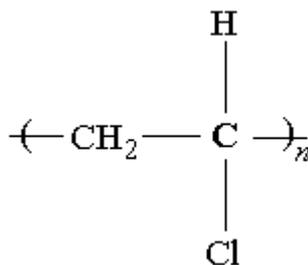
Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs) et préparée à partir de molécules appelées monomère.

V.2 Exemple du polychlorure de vinyle (PVC)

La molécule de PVC se présente :



Qu'on peut écrire de manière condensée :



Le nombre n de motifs que compte une molécule de polymère est son indice ou degré de polymérisation. Ce nombre varie généralement de plusieurs centaines à plusieurs milliers de motifs.

2) Structure du polymère : plusieurs niveaux de polymères.

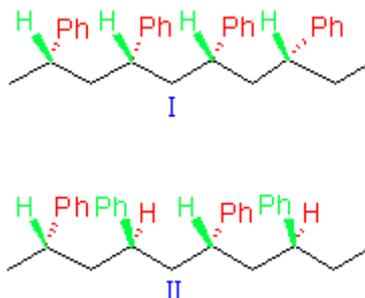
Un polymère va avoir une structure que l'on peut détailler en plusieurs niveaux :

- Structure primaire.
- Structure secondaire.
- Structure tertiaire.

a) Structure primaire.

La structure primaire est l'enchaînement covalent des motifs monomères.

Ainsi du point de vue stéréoisomérique, le motif $-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{Ph})-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{Ph})-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{Ph})-$ va avoir plusieurs formes :



Le cas I est un isomère isotactique et le cas II est le cas syndiotactique.

Quand il n'y a aucun ordre dans le polymère, on parle d'isomère atactique.

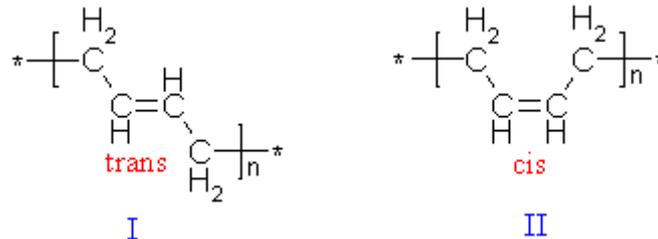
L'existence de plusieurs formes stéréoisomériques va entraîner des propriétés physiques complètement différentes entre les stéréoisomères.

Ainsi si on a un enchaînement covalent de monomères **St** et **Bu**, le polymère obtenu aura une structure primaire de type : *St-Bu-Bu-Bu-St-St-Bu-St*.

Exemple avec le butadiène :

Le butadiène de formule $C_1H_2=C_2H-C_3H=C_4H_2$.

Pour former le polybutadiène, on peut avoir deux types d'addition, l'addition 1,2 qui donne le PBu 1,2 et l'addition 1,4 qui donne le PBu 1,4. Ce dernier possède deux isomères géométriques I et II.

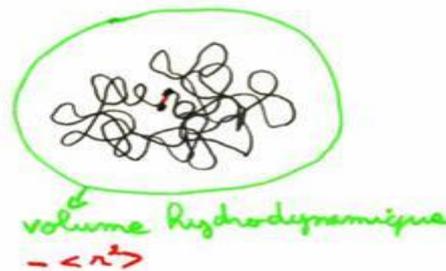


Ainsi cette différence géométrique va entraîner deux polymères de propriétés complètement différentes. Ainsi le polymère I trans est un élastomère (caoutchouc naturel) tandis que le polymère II cis est le gutta percha (utilisé pour les balles de golf).

b) Structure secondaire.

C'est la conformation d'une chaîne isolée.

Ainsi, en solution, la chaîne se met en pelote statistique.



La pelote statistique est sans arrêt en train de bouger mais elle occupe un volume hydrodynamique à peu près constant, la distance entre les deux extrémités étant $\langle r^2 \rangle$.

Sous forme solide, on retrouve la chaîne sous deux formes.

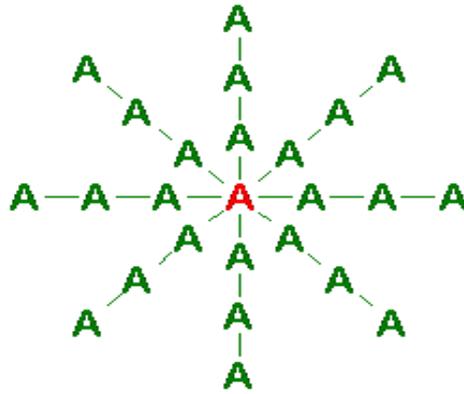
- La chaîne garde son organisation en pelote et le solide obtenu est amorphe.
- La chaîne s'organise du fait d'interactions particulières (liaisons H, interactions polaires).

Ainsi, quand on a une chaîne d'hydrocarbures saturés du type polyéthylène, il y a peu d'interactions. Pour d'autres chaînes du type $HC=CH(C\equiv N)$ (acrylonitrile), le groupement $C\equiv N$ a un grand moment dipolaire, ce qui va organiser la molécule de polymère en forme d'hélice.



c) Structure tertiaire.

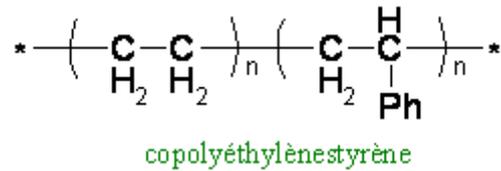
Cette structure touche à l'organisation des chaînes au sein du matériau.



V.3.b. Les copolymères.

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités.

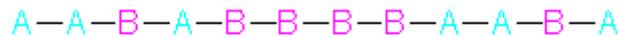
Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymères



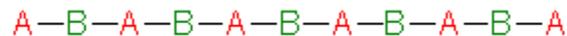
Pour la suite du paragraphe, A et B seront deux unités différentes du copolymère.

Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons :

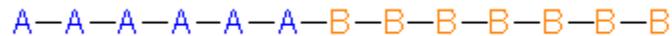
- le mode statistique.



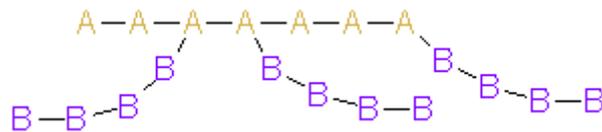
- le mode alterné.



- le mode séquencé.



- le mode greffé.



Les polymères, qu'ils soient homo ou copolymères, peuvent être réticulés.

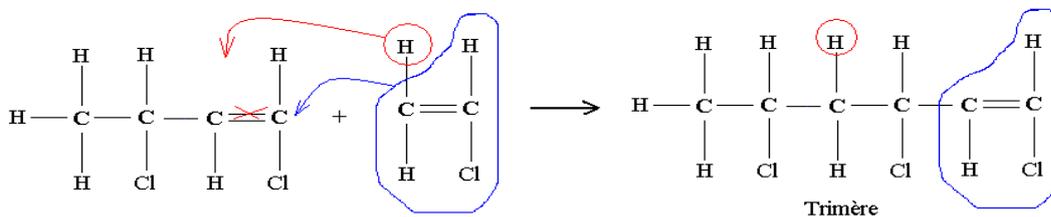
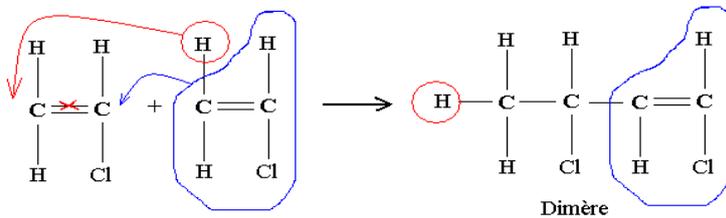
Un polymère réticulé est un polymère dont certaines de ses chaînes sont reliées entre elles par des ponts chimiques covalents.

La plupart des polymères doivent être réticulés avant leur utilisation. En effet, un polymère est un liquide et pour le maintenir en place, il faut le réticuler.

V.4. Polymérisation par polyaddition

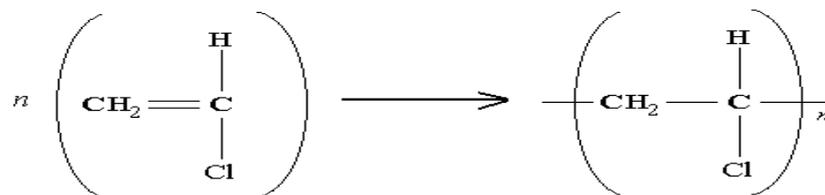
La *polyaddition* est l'*addition*, les unes après les autres, d'un grand nombre de molécules identiques appelées *monomères*. La réactivité des monomères est due à une double liaison C = C. Lors de la *polymérisation*, une liaison de la double liaison s'ouvre.

Exemple du PVC :



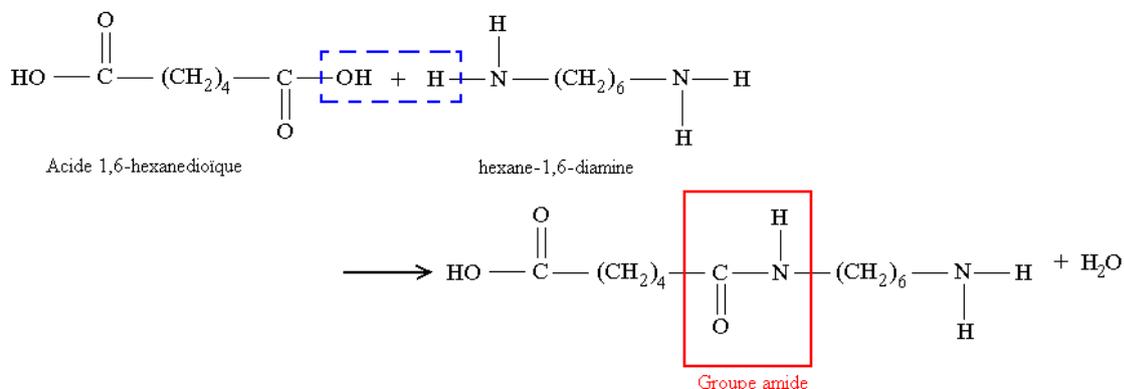
Si on excepte les deux extrémités, on constate que le *polymère* possède la structure annoncée au paragraphe 0, à savoir la répétition du motif $\boxed{\text{CH}_2 - \text{CHCl}}$

L'équation bilan se résume à :



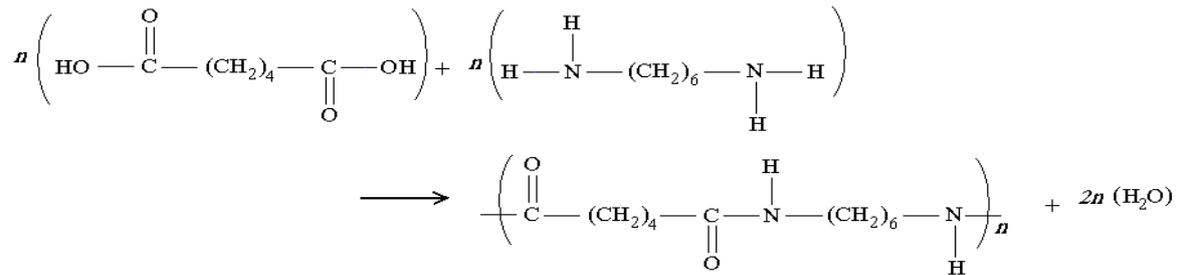
V.5. Polymérisation par polycondensation

Un acide carboxylique et une amine réagissent suivant la réaction :



L'équation générale : diacide + diamine \rightarrow amide + eau

Puis à gauche : le groupe **acide carboxylique** réagit avec un nouveau groupe **amine** et à droite : le groupe **amine** réagit avec un nouveau groupe **acide carboxylique** pour donner la réaction générale :



En faisant réagir une *diamine* avec un *diacide*, on obtient un *polyamide* par *polycondensation* avec **élimination** d'une molécule d'eau.

V.6. Propriétés mécaniques et thermiques des polymères

Les polymères sont classés en trois catégories :

- *Les thermoplastiques*

Ils fondent lorsqu'ils sont chauffés, puis durcissent en refroidissant. Les chaînes moléculaires sont liées entre elles par des *liaisons hydrogène*, de faible intensité.

Exemples : les polyéthènes (flacons de liquide vaisselle ...) et le PVC (tuyau de plomberie)

- *Les thermodurcissables*

Ils durcissent sous l'effet de la chaleur. Ils conservent leur forme, même s'ils sont soumis à l'action de la chaleur. Les liaisons entre les chaînes sont fortes (*liaisons covalentes*, formant une *réticulation* en 3D).

Exemples : résines époxy (colles), la bakélite...

- *Les élastomères*

Ils peuvent subir un allongement important et réversible (de 3 à 10 fois la taille initiale). Il y a présence de *liaisons hydrogène* ou de *liaisons covalentes*.