

RUPUBLIQUE ALGÉRIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

---

# **UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB DE BLIDA**

Institut D'Aéronautique et des Etudes Spatiales



## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du Diplôme

## **MASTER EN AERONAUTIQUE**

Spécialité : Structures Aéronautiques

---

**Caractérisation et analyse mécanique d'un composite à base de  
nanoparticules Aluminium-Carbures de Chrome.**

---

**Présenté par :**

**BEGGAR CHOUROUK**

**ZOUBIRI CHAIMA**

**Encadré par :**

**Dr. HAMADOUCHE.MAHI AMEL**

**Dr. BOUCHAFAA HAMIDA**

À Blida 2020/2021

## Remerciement :

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Tout d'abord, ce travail ne sera ni riche ni possible sans l'aide et l'encadrement de **Dr AMEL MAHI**. Son expérience a joué un rôle important dans la conception de ce projet. Nous le remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel ainsi que pour sa patience, sa présence et sa disponibilité lors de la préparation de ce mémoire.

Sans oublier la co-promotrice madame **BOUCHFAA HAMIDA**.

Merci à l'institut d'aéronautique et des études spatiales, pour nous avoir accordés sa confiance pour la réalisation de ce projet, pour ses précieux conseils, et sa disponibilité, et pour nous avoir guidés tout au long de cette étude.

Merci à tous les membres de jury de notre mémoire et professeurs de l'institut d'aéronautique et des études spatiales de Blida pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Je remercie tout particulièrement **ZOUBIRI CHAIMA**, ma partenaire de mémoire, mon binôme et ma meilleure amie. Je tiens à remercier spécialement monsieur **BASAID DJAMEL**. Je remercie aussi ma famille, mes parents et mes frères et ma sœur pour leurs précieux appuis et leurs conseils tous le long de mon cursus, sans leur soutien et leur amour rien n'aurait été possible. Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux enseignants de cet institut pour leurs efforts à nous guider à travers ces années. Et enfin, je remercie tous mes amis sans exception. **BEGGAR**

Malgré que ce projet de fin d'étude n'a pas pût être complété. Durant la réalisation de ce mémoire on a vécu beaucoup de déception, beaucoup de très difficiles circonstances. Nous avons beaucoup d'espérances, mais hélas le destin avait d'autres mots.

Malgré que ce travail reste basé sur la théorie et que la réalisation n'a pas vu le jour, mais j'offre ce travail surtout à ma reine maman, qui est malade en ce moment. Elle était toujours là, à mes côtés elle m'a soutenue pendant tout mon parcours « maman merci pour tout ».

Je remercie également Madame MAHI qui nous a aidés, soutenu et bien orienté et formé afin de pouvoir rédiger ce mémoire et finir ce travail « merci Madame ».

Je remercie également tous les professeurs de l'institut d'aéronautique et des études spatiales, qui la plupart d'entre eux ont assuré de bien nous former. Je remercie également toutes les personnes de l'institut passant par les techniciens des ateliers, des laboratoires les personnes qui travaillent au niveau de scolarité et ainsi.

Je tiens à remercier ma sœur, qui m'a toujours soutenu et remonté le moral, ma tante Linda et ainsi toute ma famille.

Sans oublié **BEGGAR Chourouk**, merci pour être là pour me rassurer et pour me renforcer.

Merci. **ZOUBIRI Chaima**

## Résumé :

Les nanotechnologies représentent un domaine de recherche très vaste, dont l'utilisation des nanomatériaux dans la construction d'aéronefs. Les nanocomposites répondent à des propriétés physiques, mécaniques et thermiques précises, dont les exigences ne pouvaient pas être satisfaites par un matériau classique.

Nous présentons dans ce mémoire une étude théorique sur les méthodes de synthèse et de caractérisation structurale et mécanique d'un matériau nanostructuré.

Le travail a pris un autre parcours, vers l'étude d'une méthode analytique pour but de modéliser un matériau à gradient des propriétés (FGM) par un logiciel mathématique. L'objectif de ce travail est de montrer l'influence des paramètres spécifiques à une plaque FGM (la géométrie, l'épaisseur et l'indice de la fraction volumique) sur les comportements libres de cette plaque.

## Abstract:

Nanotechnology represents a very large field of research including the use of nanomaterials in aircraft construction. Nanocomposites respond to specific physical, mechanical and thermal properties whose requirements could not be met by a conventional material.

In this paper, we present a theoretical study on the methods of synthesis and structural and mechanical characterization of a nanostructured material. The work took another turn towards studying an analytical method to study a functionally graded materials (FGM) by mathematical software. The objective of this work is to show the influence of the parameters considered of the FGM plate (geometry, thickness and the density fraction index) on the free behaviors of this plate.

## Table des matières

<b>Remerciement :</b> .....	2
<b>Résumé :</b> .....	4
<b>Abstract:</b> .....	4
<b>Table des matières</b> .....	5
<b>La liste des figures :</b> .....	8
<b>La liste des tableaux :</b> .....	8
<b>La liste des symboles :</b> .....	10
<b>Introduction générale :</b> .....	13
<b>1 Chapitre I : Généralités sur la science des matériaux</b> .....	16
1.1 Introduction : .....	16
1.2 Classement général des matériaux : .....	16
1.3 L'aluminium : .....	17
1.3.1 Généralité : .....	17
1.3.2 Les alliages d'aluminium : .....	18
1.3.3 Les normes définissant les alliages d'aluminium : .....	19
1.3.4 Fabrication de l'aluminium et de ses alliages : .....	20
1.3.5 Traitement thermique : .....	21
1.4 Les céramiques : .....	22
1.4.1 Introduction : .....	22
1.4.2 Définition : .....	23
1.4.3 Les classes des céramiques : .....	23
1.4.4 Méthodes de mise en œuvre des céramiques : .....	24
1.4.5 Quelques applications des céramiques : .....	25
1.4.6 Les principaux avantages et limitations des céramiques : .....	26
1.5 Les matériaux composites : .....	27
1.5.1 Généralité : .....	27
1.5.2 L'intérêt des matériaux composites : .....	27
1.5.3 Caractéristiques des matériaux composites : .....	28
1.5.4 Les avantages des matériaux composites : .....	28
1.5.5 Les constituants des matériaux composites : .....	29
1.5.6 Classification des matériaux composites : .....	31
1.5.7 La structure des pièces composites : .....	35
1.5.8 Méthodes de mise en œuvre des matériaux composites : .....	35
1.5.9 Les endommagements et les limites des composites : .....	35

1.6	Conclusion :	37
2	<b>Chapitre II : Généralités sur les matériaux nanostructurés</b>	39
2.1	Le nanomonde :	39
2.1.1	Introduction	39
2.1.2	Les nanotechnologies :	39
2.1.3	Les nanomatériaux :	40
2.1.4	Les catégories des nanomatériaux :	41
2.1.5	Pourquoi un intérêt si fort pour les Nanos :	43
2.1.6	Du macroscopique au nanomonde :	44
2.1.7	Procédés de synthèse des nanoparticules :	46
2.1.8	Application des nanotechnologies et des nanomatériaux en fonction des secteurs d'activité :	47
2.2	Les matériaux à gradient des propriétés :	47
2.2.1	Définition :	47
2.2.2	Les techniques d'élaborations des matériaux à gradient des propriétés :	49
2.3	Conclusion :	53
3	<b>Chapitre III : Caractérisation structurale et mécanique des matériaux</b>	55
3.1	Introduction :	55
3.2	La microstructure :	56
3.2.1	Généralité :	56
3.2.2	Microscopie optique (lumière visible) : <b>Traité des matériaux</b>	57
3.2.3	Microscopie électronique :	57
3.2.4	Diffraction des rayons X :	59
3.2.5	Insuffisances de la micrographie :	60
3.3	Propriétés des matériaux :	60
3.3.1	La rupture :	61
3.3.2	La résilience :	62
3.3.3	Le fluage :	62
3.3.4	Corrosion :	62
3.4	Les essais mécaniques :	63
3.4.1	Essai de traction : <b>Traité des matériaux</b>	63
3.4.2	Mesure de la dureté :	64
3.4.3	L'énergie de rupture en flexion par choc :	65
3.4.4	Fluage :	66
3.4.5	L'étude de la tenue à la corrosion :	66
3.5	Conclusion :	66

4	<b>Chapitre IV : Techniques Expérimentales</b> .....	68
4.1	Introduction :.....	68
4.2	Procédures d'élaboration du matériau.....	68
4.2.1	Caractérisation des matériaux de base.....	68
4.2.2	Etapes d'élaboration :.....	71
4.2.3	Préparation métallographique des échantillons :.....	74
4.3	Outils et techniques de caractérisation structurale :.....	75
4.3.1	Microscopie optique et microscopie à balayage :.....	75
4.3.2	Diffraction des rayons X :.....	76
4.4	Caractérisation mécanique.....	77
4.4.1	Essai de traction :.....	78
4.4.2	Essai de flexion à trois points :.....	79
4.4.3	Microdureté :.....	80
4.5	Conclusions :.....	80
5	<b>Chapitre V : la modélisation d'une plaque FGM</b> .....	83
5.1	Introduction :.....	83
5.2	Les lois régissant la variation des propriétés matérielles des plaques FGM :.....	83
5.3	Propriétés matérielles de la plaque P-FGM :.....	84
5.3.1	Propriétés matérielles de la plaque S-FGM :.....	85
5.3.2	Propriétés matérielles de la poutre E-FGM :.....	85
5.3.3	D'autres propriétés matérielles des plaques FGMs :.....	86
5.4	Théories de déformations des plaques FGM :.....	87
5.4.1	Théorie du premier ordre des plaques moyennement épaisses (FSDPT) :.....	87
5.5	Flexion et Flambage d'une plaque FGM en théorie du 1 <sup>er</sup> ordre.....	92
5.5.1	Equations de mouvement d'une plaque FGM de Mindlin sous chargement $q$ , $P_x$ et $P_y$ : 92	
5.5.2	Cas d'une plaque en flexion : $q \neq 0$ et $P_x = P_y = 0$ .....	93
5.5.3	Cas d'une plaque en flambage : $q = 0$ et $P_x = \lambda_1 P_{cr}$ et $P_y = \lambda_2 P_{cr}$ .....	96
	Conclusion :.....	97
6	<b>Chapitre VI : l'interprétation et la conclusion générale</b> .....	99
6.1	Introduction :.....	99
6.2	Résultats et interprétations :.....	99
6.3	Conclusion générale :.....	104
	<b>Bibliographie</b> .....	105
	<b>Les annexes</b> :.....	108

## La liste des figures :

Figure 1-1:les différentes catégories de céramique et ses méthodes de la synthèse. ....	25
Figure 1-2: Principales méthodes de mise en œuvre des matériaux composites. Elles sont conditionnées essentiellement par la nature de la matrice. ....	35
Figure 2-1: classification des nanostructures selon leurs dimensions. ....	43
Figure 2-2: Diagramme schématique des différents types d'impact possibles pendant le broyage. De gauche à droite : impact frontal, impact oblique, impact multi-bille. ....	47
Figure 2-3: Schéma de principe du broyage à haute énergie : alternance de déformations plastiques, fractures, collages. ....	47
Figure 2-4: (a) Variation continue des propriétés (b) Variation discrète des propriétés. ....	48
Figure 2-5: Concept des matériaux à gradient de propriétés. ....	48
Figure 2-6: Types de Gradation de la microstructure (i) microstructure doucement graduée (ii) vue agrandie et (iii) FGM céramique/métal. ....	49
Figure 2-7 : Processus de fabrication typique des FGM par la méthode de métallurgie des poudres. ....	50
Figure 2-8: Étapes classiques durant le frittage en phase liquide du mélange de poudres. ....	52
Figure 3-1:Vue schématique de l'assemblage des cristaux : La structure cristalline est représentée par un réseau quadrillé: cristal unique (monocristal); (b) structure polycristalline (assemblage de grains cristallins) avec, en traits noirs, les joints de grain. ....	55
Figure 3-2 : Particules émises lors de l'interaction électron-matière. ....	58
Figure 3-3 :Quelques exemples de microstructures obtenue par Microscope Electronique à Balayage ....	58
Figure 3-4Figure : Principe de fonctionnement d'un microscope électronique en transmission. ....	59
Figure 3-5:(a) Représentation schématique d'une caméra de rayon X utilisée pour la méthode des poudres; le film enregistreur est enroulé sur la partie cylindrique interne de la caméra; (b) diagramme de rayon X d'une poudre cristalline (maille cubique primitive) enregistré sur le film. A correspond au trou de passage des rayons X. ....	60
Figure 3-6: Courbe contrainte $\sigma$ – déformation $\epsilon$ d'une barre cylindrique soumise à une traction pour un métal à comportement ductile ; Eprouvettes de traction d'un (a) matériau métallique, (b) matériau polymère ou composite. ....	64
Figure 3-7: Courbe de transition de la résilience. ....	65
Figure 4-1: Géométrie d'une plaque FGM. ....	84
Figure 4-2 Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM. ....	85
Figure 4-3 : Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM. ....	85
Figure 4-4:Variation de Module de Young de la plaque E-FG. ....	86
Figure 4-5: Description de la plaque FGM. ....	89

## La liste des tableaux :

Tableau 1-1:Propriétés physico-chimiques de l'aluminium. ....	18
Tableau 2-1:Exemples de propriétés recherchées par l'utilisation de nanoparticules dans différents secteurs d'activité économique. ....	49
Tableau 3-1: principaux essais de dureté. ....	65

Tableau 4-1: Composition chimique en poids du 2024 T3 .....	69
Tableau 4-2:Composition chimique en poids du 7075 T6.....	69
Tableau 4-3:Nomenclature des échantillons à étudier .....	70

## La liste des symboles :

$A_{ij}$  : Matrice de rigidité en membrane.

$B_{ij}$  : Matrice de couplage membrane-flexion-torsion.

$C_{ij}$  : Matrice de rigidité en flexion.

$E$  : Module de Young.

$\lambda$  : Charge de flambage.

$h$  : Épaisseur du matériau suivant l'axe z.

$K_{ij}$  : Matrice de rigidité.

$q(x, y)$  : Chargements transversaux de la plaque.

$Q_{ij}$  : Matrice de rigidité réduite.

$U, V, W$  : Déplacements suivant x, y et z.

$V_m$  : Fraction volumique du matériau.

$\nu$  : Coefficient de poisson.

$\sigma_i$  : Contrainte normale.

$\varepsilon_i$  : Déformation normale.

$\varepsilon_m$  : Déformation en membrane.

$\varepsilon_f$  : Déformation en flexion.

$\sigma_{ij}$  : Contrainte en cisaillement.

$\psi_x$  : Angle de rotation suivant l'axe x.

$\psi_y$  : Angle de rotation suivant l'axe y.

FSDT : théorie de déformation des plaques du premier ordre.

FGM : matériau à gradient fonctionnel.

P-FGM : matériau à gradient fonctionnel en puissance.

E-FGM : matériau à gradient fonctionnel en exponentiel.

S-FGM : matériau à gradient fonctionnel en sigmoïde

# **Introduction Générale**

## Introduction générale :

La recherche dans le secteur de l'aéronautique a permis d'obtenir des matériaux aux propriétés ciblées, qui assurent un bon fonctionnement des aéronefs sur tout l'éventail opérationnel. Les matériaux du transport aérien doivent respecter différents critères : résistance mécanique, résistance à la fatigue, élasticité, densité, résistance à la corrosion et, bien sûr des prix compétitifs. Un bon indicateur de l'adéquation d'un matériau aéronautique est le rapport résistance mécanique/densité (la résistance spécifique), dont les valeurs doivent être élevées. Il faut tenir compte du fait que ces propriétés doivent se maintenir, quelles que soient les conditions opératoires de l'avion.

Avec l'évolution des matériaux au sein de ce secteur, la recherche s'est concentrée sur deux points : l'augmentation de leur résistance spécifique et l'amélioration de la faisabilité de la fabrication des aéronefs et de leurs composants. Ces dernières années, les matériaux ont pris de plus en plus d'importance dans la construction aéronautique, en particulier les matériaux composites, qui proviennent de l'association d'au moins deux matériaux différents, insolubles et séparables par action mécanique. L'un d'entre eux a une fonction de matrice et l'autre vient en renfort. Le premier se charge de la forme et de la cohésion du matériau composite et transmet les forces de compression, alors que le renfort améliore son comportement face aux autres charges mécaniques. Les matériaux composites sont de plus en plus présents et représentent désormais plus de 50 % des derniers modèles des grands fabricants d'aéronefs, comme l'A350 XWB d'Airbus et le B787 Dreamliner de Boeing. De plus, ces matériaux autorisent une meilleure intégration des pièces, dès leur formage. Mais s'il existe une branche de la recherche dont la nouveauté est à souligner, c'est l'utilisation de nanomatériaux dans la construction d'aéronefs. Le but serait d'obtenir une amélioration structurelle et fonctionnelle, qui viendrait compléter une réduction du poids. Les entreprises qui souhaitent atteindre et maintenir leur position de leaders s'engagent à continuer d'étudier de nouvelles solutions de rechange pour les années à venir. Dans ce domaine, certaines des avancées prévues par l'industrie se basent sur la recherche de matériaux autoréparables ou qui s'adaptent au passager.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite et liberté de formes, ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes. L'utilisation de renforts de taille nanométrique aboutit à l'appellation des nanocomposites qui présentent plusieurs intérêts par rapport aux composites classiques. Le premier intérêt réside dans la surface interraciale entre les nanocharges et la matrice.

Pour un poids donné, les nanoparticules présentent une surface d'échange beaucoup plus importante que les particules de taille microscopique. Les nanocomposites ont donc de meilleures propriétés en comparaison avec les composites classiques, comme par exemple une meilleure répartition des contraintes à l'intérieur de la matrice.

Les nanocomposites à matrice métallique offrent une combinaison de bonnes propriétés mécaniques à la fois à température ambiante et à haute température qui en font des matériaux intéressants pour des applications aérospatiales et militaires avancées. L'incorporation de renforts céramiques haute résistance et haute rigidité permet d'améliorer leurs performances mécaniques.

Dans ce manuscrit nous présentons un travail qui s'articule autour de la synthèse des nanocomposites à matrice métallique (alliage d'aluminium) et renfort céramique (nanoparticule de carbure du chrome), de leurs caractérisations physico-chimique, de l'amélioration de leurs propriétés thermomécanique à des fractions volumiques différentes et aussi de modélisation analytique des nanocomposites fabriqués à base de poudre nanométrique et confrontation de résultats avec les résultats expérimentaux.

Cette étude inclus six chapitres, la recherche bibliographique est incluse dans les trois premiers chapitres : Chapitre un est une généralité sur la science des matériaux, l'aluminium, and les céramiques et ainsi les matériaux composites, chapitre deux présente une généralité sur nanomonde et nanomatériaux et chapitre trois montre les caractérisations microscopiques et macroscopiques des matériaux. Le quatrième chapitre est dédié aux méthodes de synthèse et caractérisation de matériau fabriqué et le cinquième chapitre présent la modélisation d'une plaque FGM par la théorie de déformation des plaques du premier ordre et chapitre 6 interprétations des résultats et conclusion générale.

Enfin, nous concluons sur les résultats significatifs obtenus au cours de ce travail et nous proposons des perspectives de recherche ouvertes par les travaux réalisés.

**Chapitre I :**  
**Généralités sur la science des matériaux**

## 1 Chapitre I : Généralités sur la science des matériaux

### 1.1 Introduction :

Les matériaux ont de tout temps défini le niveau de développement de notre civilisation. Les premiers pas de l'humanité ont ainsi été marqués par l'Age de la Pierre, du Bronze et du Fer. Aujourd'hui, ils jouent un rôle déterminant dans toutes les mutations technologiques. Quelle que soit sa spécialité, l'ingénieur ne peut ni concevoir, ni construire de nouveaux objets sans tenir compte des propriétés des matériaux qu'il utilise. C'est en général le comportement des matériaux qui limite les performances des machines et des équipements. Aucun objet ne peut être réalisé sans matériaux. Tous les secteurs de l'activité humaine dépendent des matériaux. (1)

La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine de plusieurs révolutions dans l'histoire des technologies. La science des matériaux permet d'étudier les matériaux adaptés à chaque nouvelle application. Selon leurs utilisations, on pourra distinguer deux grandes catégories de matériaux :

a- Les matériaux de structure, qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques.

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

### 1.2 Classement général des matériaux :

Les matériaux sont communément classés en fonction de leurs propriétés les plus typiques, qui en résultant par la nature des liaisons et par les structures atomiques :

- les métaux et leurs alliages (liaisons métalliques) : Les plus utilisés sont le fer, l'aluminium et le cuivre. Les alliages métalliques sont, en général, les combinaisons de deux ou de plusieurs métaux comme dans le cas des laitons (alliages de cuivre et de zinc), mais ils peuvent également contenir des éléments non métalliques. Parmi ce type d'alliage on trouve, par exemple, la plupart des aciers.
- les polymères organiques (liaisons covalentes et liaisons secondaires) : Les polymères organiques sont des matériaux composés de molécules formant en général de longues chaînes d'atomes de carbone sur lesquels sont fixés des éléments comme l'hydrogène ou le chlore, ou des groupements d'atomes .
- les céramiques (liaisons ioniques et liaisons covalentes) : Les céramiques sont des matériaux inorganiques qui, en règle général, résultent de la combinaison d'un nombre limité

d'éléments métalliques (Mg, Al, Ti, ...) avec des éléments non métalliques dont le plus courant est l'oxygène.

Les trois types de matériaux peuvent être combinés pour former des matériaux composites.

(1) Selon leur structure et la nature de leurs composants, les propriétés des matériaux composites sont extrêmement variables : pour la plupart, elles sont intermédiaires entre les propriétés des matériaux qui les constituent. Parfois cependant, certaines propriétés émergentes (propriétés résultant de l'ensemble de la structure et des constituants du matériau) peuvent prendre des valeurs inattendues. (3)

### 1.3 L'aluminium :

#### 1.3.1 Généralité :

L'aluminium a connu un développement spectaculaire depuis sa naissance en 1854, Mais le véritable début du développement industriel de l'aluminium et ses alliages se produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium. Un tel développement repose bien évidemment sur les propriétés particulières de l'aluminium : léger, tenace, résistant à la corrosion, conducteur de la chaleur et de l'électricité, décoratif ; les alliages d'aluminium se prêtent également à tous les processus de transformation : laminage, filage, matriçage, moulage... Ceci explique qu'ils soient aujourd'hui utilisés dans la plupart des grands marchés industriels : transports terrestres, maritimes ou aérospatiaux, emballage, bâtiment, électricité, mécanique... (4)

Les propriétés d'aluminium (sa faible masse spécifique ; sa faible résistivité électrique ; sa forte conductivité thermique et sa bonne résistance à certaines corrosions et notamment à la corrosion atmosphérique) font qu'il soit très utilisé à l'état pur ou plus exactement à l'état non allié qui se définit selon les critères suivants :

- Cr, Mg, Mn, Ni et Zn ; chacun  $\leq 0,1$  %;
- Fe + Si  $\leq 1$  %.
- Cu  $\leq 0,1$  % (on admet  $\leq 0,2$  % si Cr  $\leq 0,05$  % et Mn  $\leq 0,05$  %) ; (5)

Tableau 1-1: Propriétés physico-chimiques de l'aluminium. (5)

Point de fusion : $\theta_f = 660 \text{ }^\circ\text{C}$
Structure cristalline : CFC
Masse volumique : $\rho = 2\,700 \text{ kg/m}^3$
Conductivité thermique : $\lambda = 237 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Coefficient de dilatation linéique (à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) : $\alpha = 23,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Résistivité électrique : $\rho = 0,0265 \text{ }\mu\Omega \cdot \text{m}$
Caractéristiques mécaniques à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Al pur) :
$R_m = 70 \text{ à } 80 \text{ MPa}$
$R_e = 10 \text{ à } 20 \text{ MPa}$ (très sensible à l'érouissage)
$A \% = 50 \text{ à } 60 \%$
$E = 70\,000 \text{ MPa}$

### 1.3.2 Les alliages d'aluminium :

L'aluminium non allié ayant des propriétés mécaniques faibles souvent insuffisantes pour l'utilisation, on est conduit, pour améliorer ces propriétés, à ajouter des éléments qui modifient plus ou moins profondément la microstructure du métal. (4)

Ces alliages sont, du point de vue de leur composition chimique définis par les critères suivants :

- Al prédomine en masse sur chacun des éléments d'alliage ;
- la teneur totale en masse des éléments d'alliage dépasse 1 %;
- – la teneur en masse de chaque élément satisfait aux conditions (pour Cr, Cu, Mg, Mn, Ni et Zn ; teneur  $> 0,1 \%$ , Fe + Si  $> 1 \%$ ).

Les principaux éléments d'alliage introduits dans l'aluminium sont le cuivre, le manganèse, le magnésium, le silicium, le zinc et le lithium. Ces éléments peuvent être ajoutés seuls ou associés. Certains autres éléments sont ajoutés ou, au contraire exclus plus ou moins, pour améliorer une propriété particulière. Ainsi la ténacité des alliages avec magnésium et silicium est fortement améliorée par des additions de manganèse et de chrome en teneurs limitées (souvent Cr  $< 0,4 \%$  et Mn  $< 1 \%$ ) et par une limitation sévère des teneurs en éléments nocifs tels le fer. La présence des éléments d'alliage provoque une légère augmentation du module d'élasticité.

### 1.3.3 Les normes définissant les alliages d'aluminium :

La norme NF EN 573 définit deux systèmes européens de désignation des alliages d'aluminium qui, tous deux, font référence à la composition chimique.

- un système numérique.
- un système alphanumérique.

#### Système numérique :

Ce système met en jeu un code à 4 chiffres et fait indirectement référence à la composition chimique, 4 lettres : EN AW

- EN : fait référence à la normalisation européenne.
- A : indique qu'il s'agit d'aluminium.
- W : précise qu'il s'agit de métal corroyé (Terme général employé pour les produits obtenus par déformation plastique à chaud et/ou à froid).

#### 4 chiffres :

- le premier indique le groupe d'alliages
- le second chiffre peut être : 0 s'il s'agit du métal original et 1 à 9 si l'alliage présente des particularités (pureté d'un aluminium non allié, variante d'un alliage...).
- ❖ le troisième et le quatrième chiffre ont une signification différente selon qu'il s'agit : d'un aluminium non allié (ce sont alors les deux premières décimales du nombre exprimant la teneur minimale en Al) ; ou d'un alliage (ces deux nombres, choisis par le normalisateur, servent seulement à différencier les nuances d'un même groupe).

Tableau 1-2 : Familles d'alliages d'aluminium corroyés. (5)

Aucun 1000
Cuivre 2000
Manganèse 3000
Silicium 4000
Magnésium 5000
Magnésium et silicium 6000
Zinc (et cuivre) 7000

### Le système alphanumérique

Aluminium non allié : La désignation débute par le symbole chimique de l'aluminium Al suivi de la teneur minimale en % du métal exprimée avec une ou deux décimales.

Normalement cette désignation doit être précédée de la désignation numérique et être alors placée entre crochets, soit ici EN AW-1098 [Al 99,98].

Alliages d'aluminium : La désignation débute par le symbole chimique de l'aluminium Al suivi du ou des symbole(s) chimique(s) du ou des principaux éléments d'alliage suivis chacun par un nombre représentant la teneur moyenne (%) arrondie de l'élément indiqué.

Normalement cette désignation doit être précédée de la désignation numérique et être alors placée entre crochets, soit ici, respectivement :

- EN AW-4015 [AlSi2Mn] ;
- EN AW-4045 [AlSi10] ;
- EN AW-4343 [AlSi7,5]. (5)

### États métallurgiques :

Ils sont conformes à la norme Afnor NF EN 515 qui désigne :

- l'état métallurgique de base par une lettre F, O, H ou T ;
- le moyen principal d'obtention par un ou plusieurs chiffres complémentaires.

Désignation des états métallurgiques de base : (Voir l'annexe 1)

- F : État brut de fabrication.
- O: État recuit.
- H : État écroui et éventuellement restauré ou stabilisé.
- T : État durci par traitement thermique. (4)

### **1.3.4 Fabrication de l'aluminium et de ses alliages :**

L'importance prise aujourd'hui par l'aluminium n'est pas seulement celle de l'aluminium brut mais celle de toute une filière avec, en amont, le minerai et, en aval, l'industrie de transformation en produits semi-finis et finis. L'aluminium est produit actuellement dans le monde entier par le procédé mis au point par Héroult et Hall en 1886, qui consiste en l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue à environ 1 000 °C, dans une cuve comportant un garnissage intérieur en

carbone-cathode. L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve, et l'oxygène de l'alumine réagit avec le carbone de l'anode pour former de l'oxyde de carbone et du gaz carbonique.

L'aluminium liquide, éventuellement allié avec différents éléments d'addition, afin d'obtenir l'alliage désiré, est coulé par les procédés suivants :

- soit par le procédé de coulée semi-continue sous forme de plaques pour laminage ou de billettes pour filage ou forgeage,
- soit par un procédé de coulée et laminage continu sous forme de fil machine de diamètre de 7 à 25 mm,
- soit directement dans des lingotières afin d'obtenir des lingots en aluminium ou alliages de moulage. (5)

### 1.3.5 Traitement thermique :

#### A. Traitements thermiques de durcissement structural :

Le durcissement structural a une importance primordiale dans la métallurgie des alliages d'aluminium car c'est le processus par excellence qui permet d'obtenir des niveaux élevés de résistance mécanique. Pour obtenir le durcissement structural les trois phases ci-après sont nécessaires

- Première phase (mise en solution) : Elle consiste en un maintien à une température suffisamment élevée afin de dissoudre, c'est-à-dire mettre en solution solide, les éléments d'addition présents dans l'alliage en phases dispersées.
- Deuxième phase (trempe) : Après sa mise en solution, l'alliage doit être refroidi suffisamment rapidement pour maintenir à la température ambiante la solution solide, il présente alors une résistance mécanique relativement faible mais une bonne plasticité.
- Troisième phase (maturation – revenu) : Après trempe, l'alliage durcit plus ou moins rapidement suivant sa composition par simple éjour à la température ambiante : c'est la maturation ou vieillissement naturel. Le phénomène est plus ou moins rapide suivant la température. (4)

#### B. Traitements thermiques d'adoucissement :

Ce traitement a pour but principal d'améliorer ou de régénérer la plasticité d'un alliage donné.

- Mise en solution : Suivie d'un refroidissement provoquant une précipitation peu durcissant La première étape de ce traitement est identique à la première étape du traitement de durcissement, seule la température sera limitée au niveau le plus bas possible. Le refroidissement qui suit sera généralement lent (souvent en four programmé) ; il doit provoquer une précipitation peu efficace en ce qui concerne son effet durcissant. Ce processus souvent appelé « recuit » n'est pas général ; il est réservé à certains alliages qui s'y prêtent (aciers non ou peu alliés par exemple). (5)
- Etat recuit : **C'est** à l'état recuit que l'aluminium (ou l'alliage d'aluminium) présente la résistance mécanique minimale mais la plasticité maximale : l'état recuit est donc l'état optimal pour réaliser des déformations ou mises en forme à froid importantes et difficiles. (4)

## 1.4 Les céramiques :

### 1.4.1 Introduction :

Jusqu'à présent, en raison de leur caractère ductile et de leur aptitude à subir des chocs thermiques importants, les alliages métalliques ont été quasi exclusivement utilisés pour remplir les fonctions qui imposent des contraintes mécaniques importantes. À cause de leur manque de ténacité, les céramiques sont restées confinées dans un rôle d'isolant thermique sous forme de couches rapportées ou de pièces statiques.

La limite d'utilisation des alliages métalliques (environ 1000 à 1100 °C) pour les applications à température élevée et dans une atmosphère oxydante est plus ou moins atteinte dans les équipements actuels, et on se tourne de plus en plus vers les céramiques en raison de leur caractère réfractaire.

Les céramiques possèdent une résistance à la température très élevée (1300- 1500 °C) et une très grande dureté (le carbure de silicium est le solide le plus dur après le diamant). Le carbure de silicium est caractérisé par une conductivité thermique comparable à celle de certains alliages métalliques. Ce cas est assez exceptionnel car la plupart des céramiques sont des matériaux isolants.

On développe actuellement des céramiques techniques (nitrure, carbure de silicium, oxyde de zirconium) qui ont une résistance thermique et mécanique très élevée et qui sont destinées à des applications techniques à très haute température. Ces céramiques techniques se mettent en général en œuvre par la technologie des poudres (frittage). (1)

### 1.4.2 Définition :

Historiquement, les céramiques sont surtout des matériaux à base d'argile (kaolin) obtenus par cuisson à haute température. Ces céramiques traditionnelles constituent des produits de grande consommation : briques, matériaux réfractaires, poteries, etc. À côté de ces céramiques traditionnelles, une nouvelle génération de céramiques, comme le carbure et nitrure de silicium, s'est développée. Ces céramiques techniques sont largement utilisées par les technologies avancées : matériaux abrasifs, céramiques ferrimagnétiques, vitro cérames qui sont des matériaux microcristallins réfractaires, de dureté élevée. Ces céramiques techniques constituent un pôle extrêmement important de développement technologique. (1)

Les céramiques sont constituées de composés d'éléments non métalliques avec d'autres éléments non métalliques ou métalliques : fréquemment des oxydes, mais aussi des carbures, nitrures, borures... (5) . Les céramiques sont caractérisées par des liaisons fortes, ce qui se traduit dans la pratique par une très bonne tenue en température et une excellente rigidité élastique. La faible tendance à la plasticité qui en résulte rend ces matériaux fragiles, peu tenaces, peu ductiles, mais en revanche, résistants à l'usure. (2)

Le groupe des céramiques englobe une vaste gamme de matériaux, comme les ciments, les verres, les céramiques traditionnelles faites d'argile et céramiques techniques ... (1)

### 1.4.3 Les classes des céramiques :

Nous distinguerons brièvement quatre grandes familles de céramiques,

#### A. Briques et terres cuites :

Les matériaux pour briques, poteries, etc. contiennent trois principaux constituants :

- Une argile (par exemple la kaolinite  $Al_2O_3 - 2SiO_2 - 2H_2O$ ), qui permet la mise en forme ;
- Un flux (généralement un feldspath), qui apporte les éléments sodium ou potassium et fluor nécessaires à la cuisson ;
- Une charge (sable de quartz, ou « chamotte »), qui sert à limiter le retrait après cuisson.

#### B. Verres :

Le verre est essentiellement composé de silice  $SiO_2$  mais aussi de fondants, qui contiennent des éléments (Na, K) permettant d'abaisser le point de fusion .Le verre est produit par une méthode assez proche de celle utilisée pour la plupart des matériaux métalliques : fusion des différents constituants, puis coulée et mise en forme par déformation ou moulage, ce qui permet des prix de production assez bas.

**C. Ciments et bétons :**

Avec le bois, les ciments et bétons sont, et de loin, les matériaux les plus employés en génie civil dans le monde. Le ciment est une fine poudre contenant de la chaux (CaO) avec, pour le ciment Portland (le plus utilisé), de l'argile ( $2\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ ) ou, pour le ciment alumineux, de l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Le ciment Portland est obtenu par séchage et cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile dans un grand four rotatif.

Le béton est un composite constitué d'environ 40% (en volume) de pâte de ciment durcie et de 60% d'un mélange de sable (60%) et de gravier (40%), encore moins cher que le ciment et plus résistant.

**D. Les céramiques techniques :**

Telles que l'alumine, la zircone, le carbure ou le nitrure de silicium, possèdent un point de fusion élevé (utile pour les faire travailler à haute température. Elles sont dures et fragiles, ce qui rend leur usinage dans la masse long et coûteux. Il a donc fallu trouver un autre moyen de mise en forme. On utilise le frittage à partir de poudres très pures. (6)

❖ Selon leur composition chimique :

• Monolithiques :

Oxyde :

- produits siliceux ( $\text{SiO}_2$ ),
- produits alumineux, avec 30 à 100 % d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : aluminosilicates (argile, mullite), alumine-oxyde de chrome-silice (ACS), haute teneur en alumine,
- produits basiques, à base de magnésie ( $\text{MgO}$ ),

Non-oxydes :

- carbure,
- nitrure,

• Composites : matrice céramique à renfort céramique, ou matrice céramique à renfort métallique.

(7)

**1.4.4 Méthodes de mise en œuvre des céramiques :**

L'élaboration est spécifique à chacune des familles de matériaux céramiques, celles-ci se distinguant précisément par leur mode d'élaboration. Celle-ci se fait soit par frittage soit par fusion, à relativement haute température, ou soit par prise, à la température ambiante, pour les liants

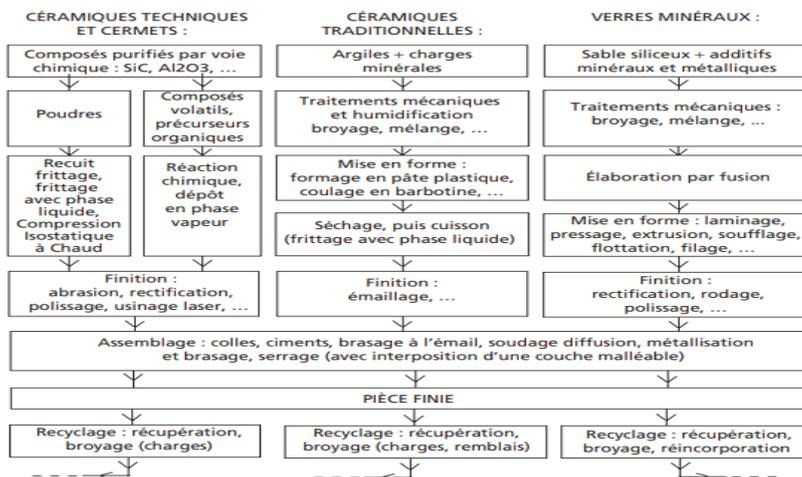
minéraux (Quand l'un des composants reste à l'état solide lors de la cuisson, le procédé est appelé frittage, En revanche, quand il y a fusion de tous les composants, le procédé est appelé fusion). (8)

Le procédé le plus général pour l'obtention de pièces massives en céramiques est le frittage. Il s'agit du soudage progressif de grains de poudres sous l'effet conjoint de la pression de contact et de la température.

**Schéma de fabrication :**

**Poudres → prétraitement → mise en forme → séchage → traitement thermique (frittage) → produit fini**

Figure 1-1: les différentes catégories de céramique et ses méthodes de la synthèse [HABER et SMITH 1987].



Si l'on souhaite obtenir une céramique sans porosité, il faut utiliser l'un des moyens suivants :

- Frittage sous chargement mécanique uni axial ou hydrostatique (compaction isostatique à chaud) : on apporte une énergie PV par unité de volume, qui s'ajoute aux tensions de surface pour réduire la porosité... mais augmente le coût de mise en œuvre.
- Cristallisation de la céramique à partir d'un verre (vitrocéramiques) : La pièce obtenue est quasiment aux cotes finies, ce qui réduit fortement l'usinage, avec son coût élevé et son risque de rompre la pièce. (6)

**1.4.5 Quelques applications des céramiques :**

(Voir l'annexe 2)

Tableau 1-3 : Quelques exemples de propriétés des céramiques. (2)

Type de céramique	Masse vol. (Mg/m <sup>3</sup> )	Temp. de fusion ou de ramoll. (°C)	Conduc. therm. (W/m · K)	Coeff. de dilatation linéaire (10 <sup>-6</sup> /K)	Module de Young (GPa)	Résist. à la compr. (MPa)	Module de rupture (MPa)	Ténacité (MPa · m <sup>1/2</sup> )
Carbone diamant	3,52	3 720 à 3 910	600 à 2 200	0,8 à 1,2	990 à 1 050	30 000 à 65 000	4 000 à 6 000	2,3 à 3,4
Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,9	2 050 à 2 060	24 à 35	8 à 8,9	330 à 400	1 750 à 3 000	350 à 580	3,5 à 4,5
Zircone ZrO <sub>2</sub>	5,6	2 680 à 2 710	2 à 12	7 à 9	180 à 240	1 650 à 3 600	140 à 270	2 à 6,9
Carbure de silicium SiC	3,2	2 700 à 2 830	90 à 200	4,3 à 4,6	390 à 440	2 000 à 3 500	450 à 600	3 à 5,1
Nitrure de silicium Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3,2	1 890 à 1 900	15 à 43	2,6 à 3,3	280 à 310	11 000 à 15 000	480 à 960	4 à 5,4
Nitrure de bore BN	2,1	2 900 à 3 100	20 à 52	1 à 10	20 à 100	225 à 540	30 à 100	2,5 à 5
Carbure de titane TiC	4,9	3 170 à 3 250	18 à 25	6,6 à 7,4	420 à 450	3 570 à 5 850	275 à 450	2 à 3
Carbure de tungstène WC	15,6	2 820 à 2 920	28 à 88	4,5 à 7,1	600 à 670	6 600 à 10 000	510 à 820	2 à 3,8
Carbure de bore B <sub>4</sub> C	2,5	2 410 à 2 450	27 à 36	3,5 à 5,6	440 à 472	1 400 à 3 400	600 à 680	3,4 à 3,9
Quartz SiO <sub>2</sub>	2,2	-	1,4 à 1,5	0,48 à 0,52	54	1 200	100 à 110	0,6 à 0,8
Sialons Si <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> N <sub>5</sub>	3,25	2 480 à 2 540	18 à 23	3,3 à 3,7	265 à 300	3 800 à 4 500	450 à 600	4 à 7,7

#### 1.4.6 Les principaux avantages et limitations des céramiques :

Les céramiques possèdent une résistance à la température très élevée (1300- 1500 °C) et une très grande dureté (le carbure de silicium est le solide le plus dur après le diamant). Le carbure de silicium est caractérisé par une conductivité thermique comparable à celle de certains alliages métalliques. Ce cas est assez exceptionnel car la plupart des céramiques sont des matériaux isolants. Par contre, le nitrure de silicium avec une conductivité thermique environ quinze fois plus faible que le carbure de silicium est un isolant.

Les caractéristiques les plus spécifiques des céramiques sont leur caractère réfractaire (résistance à de très hautes températures), leur dureté, leur grande inertie chimique et en général leurs très faibles conductivités thermique et électrique. On leur confère également certaines propriétés plus spécifiques comme le ferrimagnétisme, la semi conductivité ou la supraconductivité à haute température.

#### Défauts des céramiques :

Les céramiques ne sont généralement pas ductiles et ont une faible résistance au choc thermique. Ces deux défauts majeurs limitent fortement leurs applications. Un ensemble de recherches se poursuit actuellement pour augmenter la ductilité et la résistance des céramiques, on fabrique des céramiques à haute ténacité à partir de zircone modifiée. (1)

## 1.5 Les matériaux composites :

La technologie moderne a besoin de matériaux qui allient à la fois rigidité, résistance mécanique, ténacité élevée et une grande légèreté. Aucun matériau simple ne permet de combiner ces caractéristiques physiques, et pour atteindre cet objectif il faut nécessairement utiliser un matériau composite. (1)

En associant des matériaux appartenant aux grandes classes (ou même simplement des matériaux différents bien qu'appartenant à la même classe). Il est possible d'obtenir une combinaison de propriétés inédite, ajustable à la demande de l'utilisateur : légèreté et ténacité, transparence et conduction électrique. Deux matériaux combinés à l'état dispersé, à une échelle nettement inférieure à celle de la pièce, ce qui permet (du moins pour les calculs et raisonnements à l'échelle de la pièce) de considérer l'ensemble comme un matériau homogène à propriétés nouvelles. Un tel matériau homogénéisable est qualifié de matériau composite. (3)

### 1.5.1 Généralité :

Les matériaux composites sont vieux comme le monde. Il y a plusieurs millénaires, les artisans de l'Égypte ancienne augmentaient déjà les propriétés mécaniques des briques par une adjonction de paille courte à l'argile fraîche. Certains matériaux naturels comme le bois (fibre de cellulose dans une matrice de lignine) et l'os (mélange complexe de collagène et de phosphate de calcium) sont des matériaux composites. (1)

Les matériaux composites, au sens le plus courant du terme, sont un ensemble de matériaux de synthèse conçus et mis en œuvre essentiellement pour des applications structurales, et où la fonction mécanique est donc dominante. Il est constitué de deux ou plusieurs matériaux dont les propriétés individuelles se combinent pour former un matériau hétérogène ayant des performances globales fortement améliorées. (3)

Ils combinent un matériau de renfort, dispersé sous forme de particules, fibres courtes ou fibres longues, au sein d'une matrice qui les enrobe. (3)

### 1.5.2 L'intérêt des matériaux composites :

Dans le développement d'une technologie, il est fréquent de substituer un matériau à un autre, soit pour des raisons de performance, soit pour des motifs économiques ou écologiques. On tend également à alléger les structures et les objets en mouvement pour réaliser des économies énergétiques ce qui est assuré par les matériaux composites. L'utilisation des matériaux fait

intervenir d'autres critères de choix (résistance à la corrosion, apparence...) que celui de la résistance mécanique.

Les matériaux composites, en fonction de leurs constituants, présentent un grand nombre d'intérêts.

- D'un point de vue mécanique, ils offrent d'excellentes propriétés en traction, flexion, compression, cisaillement plan et transverse ainsi qu'une excellente absorption aux chocs. Leur résistance mécanique combinée à leur faible densité en fait un élément incontournable des conceptions actuelles qu'elles soient structurelles ou non.
- D'un point de vue physico-chimique, ils s'adaptent parfaitement à différents milieux ambiants et peuvent être très performants en termes de résistance aux produits chimiques, au feu, ou à la corrosion.

Néanmoins, leur plus grand intérêt réside dans la possibilité de pouvoir intégrer plusieurs fonctions en une seule opération réduisant de fait et de façon conséquente, le nombre de pièces d'un ensemble mécanique ou d'une conception et par là même son coût de revient. Bien que leur fabrication nécessite des investissements parfois lourds en termes d'outillages de moulage, ils constituent un compromis technico-économique intéressant lorsqu'ils sont fabriqués en série. (9)

### 1.5.3 Caractéristiques des matériaux composites :

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- des propriétés des matériaux constituants,
- de leur distribution géométrique,
- de leurs interactions, etc.

Pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- la nature des constituants et leurs propriétés,
- la géométrie du renfort, sa distribution,
- la nature de l'interface matrice-renfort. (10) (voir l'annexe 3)

### 1.5.4 Les avantages des matériaux composites :

- Les caractéristiques mécaniques des composites sont plus faibles que celles des métaux notamment en matière de flexion, de résistance à la rupture, ou encore de températures limites d'utilisation.

- Les composites présentent aussi une meilleure indentation, c'est-à-dire que suite à des petits chocs urbains, il n'y a pas de marque ou d'empreinte sur leur surface contrairement aux métaux.
- L'absence de corrosion dans la plus part des matériaux composites et le gain de poids grâce à une densité faible (acier : 7,8 ; aluminium : 2,7 ; composites : entre 1 et 2) font souvent pencher la balance dans le choix de ces matériaux.
- Pour le bruit, le pouvoir amortissant des composites contribuent à la diminution des nuisances sonores soit en remplacement d'organes métalliques, soit en tant qu'écran acoustique.
- Les procédés de mise en œuvre des pièces finies sont souvent plus lents, mais permettent d'obtenir des formes complexes, des intégrations de fonctions et des surmoulages d'éléments métalliques, entraînent souvent des investissements faibles et suppriment des usinages de finition tels que découpes ou ébavurages. Les économies se font ainsi sur les autres étapes.
- Le prix au kilo des matériaux composites est souvent plus élevé (surtout par rapport à l'acier), mais la diversité des technologies de mise en œuvre par moulage (injection, compression...) limite la quantité de matière engagée au juste nécessaire (pour compenser ainsi le coût au kilo). (9)

### 1.5.5 Les constituants des matériaux composites :

#### ❖ Matrice :

Les trois grandes classes de matériaux (métaux, céramiques, polymères organiques) peuvent être utilisées comme matrices pour les matériaux composites. En raison de leur légèreté et de leur facilité de mise en œuvre, ce sont les matrices organiques qui sont actuellement les plus utilisées. (1)

Les matrices jouent un rôle important dans la structure des pièces composites :

- elles maintiennent la disposition géométrique des fibres,
- elles apportent au composite ses caractéristiques chimiques et thermiques,
- elles transfèrent les sollicitations mécaniques.

Il existe différentes sortes de matrices que nous pouvons classer dans les catégories suivantes :

- les matrices thermodurcissables,
- les matrices thermoplastiques,
- les matrices métalliques,
- les matrices biodégradables.

❖ **Les charges et aditifs :**

Les charges et additifs sont des matières d'origine minérale, végétale, synthétique ou organique se présentant sous forme pulvérulente ou fibreuse chimiquement pures et inertes vis-à-vis des résines. Mélangées à une résine, elles apportent de nouvelles propriétés et modifient les caractéristiques du produit fini.

❖ **Les renforts :**

Les renforts assurent les performances mécaniques du matériau composite. Un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des propriétés et des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Ils se caractérisent par la nature des fibres qui les composent et leur présentation commerciale. (9)

Ils doivent également être compatibles avec la matrice du composite sur le plan chimique, c'est-à-dire assurer une adhérence interfaciale renfort-matrice suffisante et stable dans le temps. Les principaux types de renforts se distinguent par leur géométrie (particules, billes, fibres courtes, fibres longues), par leur disposition, notamment pour les fibres (aléatoire 3D, feutres, nappes de mat 2D, nappes unidirectionnelles, tissages 2D, tissages 3D) ou par leur nature. (3)

Les fibres les plus employés : Les fibres de verre, Les fibres de carbone, Les fibres aramides, Les fibres céramiques, Les fibres de basalte.

❖ **Les âmes :**

Une âme est un élément renforçant utilisé pour la réalisation de structure sandwich. Elle a pour rôle de maintenir l'écartement entre deux peaux afin de donner une rigidité à l'ensemble de la structure. Le choix d'une âme sandwich est principalement dicté par les propriétés mécaniques et thermiques imposées par le cahier des charges. Les âmes utilisées pour la fabrication de structures sandwich peuvent être de différentes natures en fonction du cahier des charges de la pièce.

Les plus courantes sont :

- Les plastiques alvéolaires (mousses) : polyuréthane, phénolique, PVC, polystyrène (utilisé avec des résines spéciales).
- Les nids d'abeille : de papier kraft, de papier aramide, d'alliage d'aluminium, d'alliage de titane, de polypropylène.
- Le bois : balsa, contreplaqué, latté. (9)

### 1.5.6 Classification des matériaux composites :

#### A. Suivant type de matrice :

Les matrices peuvent être de différentes sortes permettant ainsi de différencier plusieurs types de composites et notamment :

- Les composites à matrice thermoplastique :

Les matrices polymères thermoplastiques peuvent se présenter sous différentes formes granulés, filament, poudre et plaque. De densité relativement faible, elles se ramollissent sous l'effet de la chaleur et deviennent malléables à chaud.

- Les composites à matrices thermodurcissables :

Les matrices thermodurcissables peuvent se présenter sous deux formes liquide visqueux appelé résine et poudre. Les thermodurcissables ne se ramollissent pas sous l'effet de la chaleur et forment après polymérisation une structure chimique tridimensionnelle qui confère au produit final des propriétés physico-chimiques et mécaniques intéressantes.

Les composites réalisés à partir de ces matrices peuvent être renforcés avec toutes sortes de fibres mais les plus communes restent la fibre de verre, la fibre de carbone ou la fibre d'aramide.

- Les composites à matrice métallique :

Par définition, un composite à matrice métallique est constitué d'une matrice métallique et d'un renfort métallique ou céramique. Développé à partir des années 1960-1965, ce type de composite était destiné à des applications exclusivement orientées vers l'aéronautique et l'espace car le coût des fibres était très élevé. Dans les années 80, l'apparition des fibres céramiques a permis d'élargir leur champ d'application à l'automobile.

Ces matériaux restent encore en pleine évolution et de nombreuses recherches restent à faire pour déterminer l'ensemble de leurs propriétés.

La matrice métallique peut être :

- monophasée (métal pur ou solution solide : magnésium, titane...)
- multiphasée (alliage durci par précipitation : aluminium et ses alliages, acier ...).

Les renforts utilisés peuvent être de deux types :

- soit des particules ou des fibres courtes (carbure de silicium, nitrure de silicium, titanate de potassium...) qui apportent des propriétés mécaniques légèrement supérieures à celles du

métal formant la matrice, et pouvant être utilisées dans les procédés de mise en forme des métaux.

- soit des fibres longues céramiques ou métalliques (carbone, bore, aluminium, céramique, tungstène...) générant des propriétés bien supérieures à celles de la matrice, mais avec des procédés de mise en forme plus coûteux (Infiltration de métal fondu autour d'un renfort fibré).

Comparativement aux matrices organiques, les matrices métalliques présentent plusieurs avantages :

- meilleure tenue en température permettant de reculer les limites d'utilisation en environnement moteur,
- meilleures propriétés mécaniques intrinsèques de la matrice, permettant l'utilisation de renforts localisés ou unidirectionnels,
- meilleure tenue au vieillissement et au feu,
- ductilité élevée de la matrice,
- meilleure étanchéité aux gaz (herméticité)...

Mais les techniques de transformation restent complexes et doivent se réaliser à la température de fusion du matériau.

- Les matériaux composites à base d'élastomère :

Les élastomères constituent une grande famille sous laquelle se regroupent les caoutchoucs naturels, les néoprènes, les nitriles, les EPDM, etc. mais aussi et plus particulièrement les matériaux composites, les polyuréthanes et les silicones. Tous ces élastomères peuvent être renforcés par des fibres de toutes natures sans exception particulière.

- Les biocomposites :

Les fibres principalement utilisées dans les biocomposites sont le lin, le sisal et le kénaf. Toutes trois présentent des propriétés mécaniques intéressantes malgré une reprise d'humidité rapide et conséquente qui doit être maîtrisée lors de la mise en œuvre. D'autres fibres sont en voie de développement et l'avenir de ces fibres reste très prometteur. Transformées sous-vide, par injection ou par compression, ces fibres sont, pour l'instant, associées à des matrices polyester, époxy voire phénolique. Mais des développements sur l'utilisation de matrices hermoplastiques et de matrices végétales comme les matrices PLA à base de cellulose sont en cours. Notons que la principale contrainte au développement massif des biocomposites reste la

difficulté de produire de gros volumes de fibre (limitation des cultures) et la constance de la qualité des fibres. (9)

**B. Classification suivant la forme des constituants :**

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

- Composites à fibres :

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan. Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur :

- la nature des constituants,
- la proportion des constituants,
- l'orientation des fibres,
- suivant le cahier des charges imposées.

L'importance des matériaux composites à fibres justifie une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques. En conséquence, le présent ouvrage sera essentiellement consacré par la suite à l'étude de ce type de matériaux.

- Composites à particules :

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Par exemple, des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage. Des particules de métaux fragiles tels le tungstène, le chrome et le molybdène, incorporé dans des métaux ductiles, augmenteront leurs propriétés à températures élevées, tout en conservant le

caractère ductile à température ambiante. Les cermets sont également des exemples de composites métal-céramique à particules, adaptés à des utilisations à températures élevées.

Par exemple, les cermets à base d'oxydes sont utilisés pour les outils de coupe à vitesse élevée, et pour les protections à hautes températures. Également, des particules d'élastomère peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragiles, de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration. Ainsi, les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse.  
(10)

- Composites : HP ET GD

Le terme «composites hautes performances» concerne des matériaux syntactiques, constitués d'un assemblage de couches ayant une matrice métallique ou plastique (élastomère) renforcés (partiellement ou totalement) par des fibres continues, dont les propriétés mécaniques spécifiques (résistance spécifique et module spécifique) sont nettement supérieures à celles des matériaux métalliques conventionnels. Ces propriétés dépendent du type de renfort utilisé, du taux (volumique) dans la matrice, de l'orientation des fibres de renfort dans les différentes couches, du type de matrice utilisé et de la direction dans laquelle ces propriétés sont caractérisées. A l'opposé des matériaux techniques traditionnels, le matériau composite doit au niveau de ses propriétés s'adapter aux exigences de conception, alors qu'habituellement la conception se trouve adaptée aux possibilités des matériaux.

Le terme «composite grande diffusion» concerne les matériaux composites n'entrant pas dans la catégorie «hautes performances ». Cette distinction est quelque peu arbitraire dans la mesure où tous les composites renforcés par des fibres longues obéissent aux mêmes lois physiques et sont réalisés par des techniques sensiblement identiques au niveau de leur principe.

Toutefois, la dénomination «composite H.P.» (Hautes Performances) implique systématiquement les caractéristiques d'une pièce composite étant hautement anisotropes, que les efforts locaux aux différents points de la pièce soient connus. Par ailleurs, l'emploi de composites H.P. permet de retenir des coefficients de sécurité relativement faibles sous réserve d'essais systématiques (par exemple de l'ordre de 1,5 et moins pour certaines structures aéronautiques militaires), alors que les coefficients de sécurité utilisés pour des composites de grande diffusion (par exemple cuve bobinée polyester — verre pour la chimie) sont beaucoup plus importants (6 et plus).

En général, les composites H.P. sont des matériaux relativement chers, alors que les composites grandes diffusions peuvent atteindre des coûts de structure (pièce) finie du même ordre de grandeur que ceux des pièces ou structures métalliques.

### 1.5.7 La structure des pièces composites :

(Voir l'annexe 4)

### 1.5.8 Méthodes de mise en œuvre des matériaux composites :

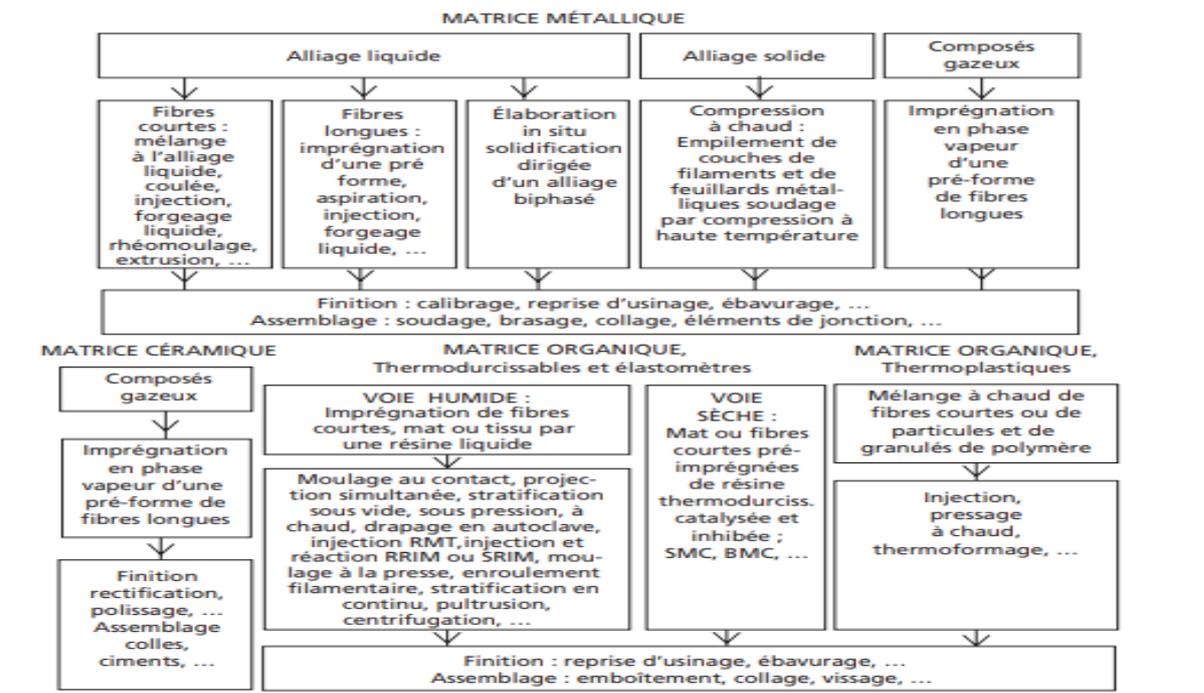


Figure 1-2: Principales méthodes de mise en œuvre des matériaux composites. Elles sont conditionnées essentiellement par la nature de la matrice. (1)

### 1.5.9 Les endommagements et les limites des composites :

#### A. les défauts internes :

Les principales dégradations des matériaux composites proviennent des actions mécaniques qu'ils subissent. En effet, le réseau d'interfaces structurées des stratifiés (surtout à fibre longue) est particulièrement exposé aux dégradations car ces interfaces sont situées entre des constituants ayant des propriétés mécaniques différentes. Lors de contraintes, les endommagements ont ainsi tendance à suivre ce réseau de fibres. Des phénomènes différents peuvent aussi se produire dans les plis de ce réseau en fonction du sens de sollicitation de l'effort : parallèle aux fibres ou non.

#### B. Les effets à prendre en compte sur les comportements :

Le comportement d'un composite est la relation entre les efforts appliqués et la déformation du matériau. Les composites peuvent être ruinés par des dégradations telles la rupture de fibre ou le délaminage. Ces endommagements apparaissant suite à de très fortes contraintes, il est nécessaire de faire attention au sens des fibres.

### C. les défauts de surface :

De nombreux défauts de surface peuvent apparaître lors de la fabrication des composites. En voici les principaux :

#### ➤ **Le retrait des composites :**

Le retrait des composites est un défaut interne qui aboutit le plus souvent à un défaut de surface. Lors de la polymérisation de la matrice, le retrait de la résine polymérisée est causé par le phénomène de dilatation différentielle lors de la polymérisation, lequel dépend fortement des conditions de mise en œuvre. Il implique ainsi inévitablement un retrait de la résine polymérisée. Des charges et des additifs sont souvent incorporés dans un matériau composite pour diminuer ce phénomène de retrait.

#### ➤ **Les porosités :**

Les porosités peuvent être de deux sortes : ouvertes ou fermées. Les porosités ouvertes débouchent sur la surface du matériau tandis que les porosités fermées sont isolées à l'intérieur. Ce sont des microcavités dues à l'emprisonnement de gaz (air, solvants...) dans la matrice d'un stratifié, qui réduisent les propriétés mécaniques du matériau.

#### ➤ **L'écaillage :**

Il s'agit de défauts d'usinage constatés en sortie de fabrication des pièces. Les traces d'outils sont des marques laissées par un outillage en appui lors de la fabrication ou de l'assemblage de la pièce, tandis que les rayures sont des défauts longilignes occasionnées par un objet en mouvement.

#### ➤ **Les vaguelettes ou télégraphing :**

Les vaguelettes sont souvent causées par des défauts de moules ou par la nature même du renfort. Le télégraphing est un phénomène lié au taux d'humidité du nida lors de sa mise en œuvre. L'exothermie chauffe l'eau contenue dans la maille issue de l'humidité, qui se dilate puis se condense lors du refroidissement, créant l'effondrement du renfort au-dessus de la maille.

#### ➤ **Le manque de résine :**

Le manque de résine ou « fibre sèche » est une zone qui laisse apparaître les fibres du composite à l'air libre. Un excès de résine peut en être aussi la cause. En effet, la résine mise en surabondance peut fluer et se concentrer sur une autre zone provoquant un manque au départ de ce glissement.

### ➤ **La prise d'eau :**

Une prise d'eau est une infiltration d'eau dans les fibres ou l'âme d'un composite. Un stratifié n'est pas un matériau totalement imperméable, il présente toujours une absorption d'eau et les problèmes risquent d'apparaître si cette eau rencontre des vides (bulles d'air, parties mal imprégnées...). Le volume de liquide contenu dans les cavités augmente alors jusqu'à créer une pression capable d'engendrer des cloques. On parle aussi d'osmose.

### ➤ **Les impacts :**

Suite à un choc, la longueur, la largeur et la profondeur des dégâts seront propres à l'objet qui est venu impacté. Les composites étant de nos jours beaucoup plus présents sur un véhicule, ils sont dès lors plus soumis à des chocs. (9)

## 1.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur les différentes classes des matériaux. Nous avons focalisé dans notre recherche sur l'aluminium et ses alliages, ainsi sur les céramiques et les matériaux composites.

Nous avons également présenté les différentes propriétés spécifiques pour chaque classe et leurs méthodes de fabrication aussi que les principaux avantages et limitations de leurs performances.

**Chapitre II :**  
**Généralités sur les matériaux nanostructurés**

## 2 Chapitre II : Généralités sur les matériaux nanostructurés

### 2.1 Le nanomonde :

#### 2.1.1 Introduction

« Imaginez une machine tellement petite qu'elle est invisible à l'œil nu. Imaginez des machines avec des engrenages pas plus grands qu'un grain de pollen. Imaginez que ces machines soient fabriquées par milliers à la fois, chacune coûtant quelques dixièmes d'euros. Imaginez un monde si petit que la gravité ne joue plus de rôle, mais où les effets des forces atomiques prédominent... » (D'après Paul McWhorter).

« There is plenty of room at the bottom. » (Richard Feynman).

L'une des tendances majeures des sciences et des technologies d'aujourd'hui est la course à la miniaturisation. Faire toujours plus petit est le maître mot de nombreux scientifiques et industriels. Faire toujours plus petit pour mieux connaître et utiliser les lois fondamentales du comportement de la matière. Faire toujours plus petit pour être plus rapide. Faire toujours plus petit pour être moins cher... Dans le domaine technologique, faire plus petit, c'est travailler avec les atomes, les utiliser et les manipuler.

Cette fiction commence à devenir réalité dans les années 1980. 1981 voit l'invention du microscope à effet tunnel (STM). Dans un STM, une pointe métallique, si fine que son bout n'est composé que d'un ou de quelques atomes, se déplace à une fraction de nanomètre de la surface d'un solide. En déplaçant la pointe sur la surface de manière contrôlée, on parvient à voir les atomes à leur propre échelle. La dimension d'un atome est de l'ordre du dixième de nanomètre.

Une étape supplémentaire est franchie en 1990, lorsque D. Eigler et E. Schweizer réussissent à déplacer des atomes de xénon un par un et à les arranger sur une surface de nickel. Il devient ainsi possible de manipuler la matière, atome par atome. C'est le point de départ d'un nouveau domaine d'activités : les nanotechnologies. (11)

#### 2.1.2 Les nanotechnologies :

Les nanotechnologies présentent aujourd'hui des enjeux majeurs en termes technologique, économique, éthique, social et environnemental, car elles offrent le potentiel d'améliorer de façon substantielle les propriétés de multiples produits dans tous les secteurs d'activité. (12)

Les « nanotechnologies » sont la conception, la caractérisation, la production et l'application de structures, dispositifs et systèmes par contrôle de la forme et de la taille à l'échelle nanométrique. Dans les nanotechnologies, les propriétés physiques et chimiques ne sont pas indépendantes entre elles, et sont fonction de la manière dont on synthétise et fabrique les systèmes étudiés. D'après la Royal Society britannique, la nanoscience est l'étude des phénomènes et la manipulation des matériaux aux échelles atomique, moléculaire et macromoléculaire, où les propriétés diffèrent significativement de celles à plus grande échelle (11) (car les nanomatériaux transforment radicalement les propriétés de différents produits finis : meilleur conducteur électrique, propriétés optiques uniques, force accrue, etc. Ces propriétés exceptionnelles des nanomatériaux ne se retrouvent pas dans les substances de même composition chimique, mais de plus grande taille). (12)

### 2.1.3 Les nanomatériaux :

Un nanomatériau est soit un matériau dont au moins une dimension externe est à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire comprise entre 1 à 100 nanomètres (nm ou  $10^{-9}$  m), ou soit un matériau qui possède une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique. Pour se représenter cette taille infime, mentionnons qu'on obtient le même rapport de  $10^{-9}$  en comparant le diamètre d'une pièce de monnaie de dix cents au diamètre de la terre. (12)

Les nanomatériaux contiennent des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat :

- "particule" : un minuscule fragment de matière possédant des contours physiques bien définis ;
- "agglomérat" : un amas friable de particules ou d'agrégats dont la surface externe globale correspond à la somme des surfaces de ses constituants individuels ; dans un agglomérat les nanoparticules sont faiblement liées entre elles et sont faciles à séparer.
- "agrégat" : une particule constituée de particules soudées ou fusionnées. Dans un agrégat les particules sont fortement liées entre elles et sont difficiles à séparer. Ici l'aire de la surface externe résultante peut être plus petite que la somme des aires des surfaces de chacun des composants. (13)

Les nanomatériaux peuvent provenir de trois origines différentes :

- a) certains sont synthétisés volontairement afin d'exploiter les propriétés uniques qui se révèlent uniquement à ces dimensions ; ce sont les nanomatériaux manufacturés, b) d'autres sont d'origine humaine ou c) d'origine naturelle, ces deux derniers étant constitués majoritairement de produits indésirables appelés poussières ultrafines et provenant d'opérations

mécaniques (p. ex. usinage de métaux) ou thermiques (p. ex. émissions de moteurs diesels) ou de phénomènes naturels (p. ex. fumées volcaniques, air salin ou feux de forêt).

Les nanomatériaux manufacturés sont regroupés en deux grandes catégories : les nano-objets et les matériaux nanostructurés. Les nano-objets ont une (p. ex. feuillet de graphène), deux (p. ex. nanotube, nanofilament, nanofil) ou trois (p. ex. dioxyde de titane, fullerène) dimensions externes à l'échelle nanométrique alors que les matériaux nanostructurés, de plus grande taille, possèdent une structure interne ou de surface à des dimensions nanométriques.

Tous les produits solides peuvent être réduits à des dimensions nanométriques. Néanmoins, plusieurs ne sont pas considérés comme des nanomatériaux car ils ne démontrent pas de propriétés nouvelles, améliorées ou encore commercialement intéressantes. (12)

#### 2.1.4 Les catégories des nanomatériaux :

##### a) Nano-objets :

On désigne par nano-objets les matériaux nanostructurés qui ont une, deux ou trois dimensions externes à l'échelle nanométrique :

1. nanoparticules si les 3 dimensions externes sont inférieures à 100 nm (Ex : NP de latex, de silice, d'oxydes métalliques, alumine, carbonate de calcium) ;
2. nanofibres, si 2 dimensions externes sont inférieures à 100 nm :
  - nanotubes, si les nanofibres sont creuses, (nanotubes de carbone),
  - nanotiges, si les nanofibres sont pleines, (nanofibres de polyesters),
  - nanoconducteurs, dans le cas de nanofibres électriquement conductrices ou semi-conductrices ;
3. nanoplaques, si une dimension externe seulement est inférieure à 100 nm, on parle alors de :
  - nanofeuillets, (nanofeuillets d'argile),
  - nanocouches,
  - nanorevêtements.

##### b) Matériaux nanostructurés :

Un matériau nanostructuré est un matériau qui a une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique. Il existe, dans la norme ISO, 5 catégories de matériaux nanostructurés :

1. Poudre nanostructurée :

Une poudre nanostructurée est composée d'agglomérats ou d'agrégats nanostructurés, ou d'une particule cœur-écorce nanostructurée (cœur (diamètre nanométrique) + une ou plusieurs écorces d'épaisseur également nanométrique), ou encore d'une capsule nanostructurée composée d'une coque d'épaisseur nanométrique capable d'accueillir d'autres substances (vide infra.)

2. Nanocomposite :

Solide composé d'un mélange de plusieurs matériaux de phases distinctes dont une ou plusieurs sont des nanophases :

- nanocomposite à matrice polymère, contenant au moins une phase polymère majoritaire (équipements sportifs, modification des propriétés mécaniques),
- nanocomposite à argile polymère dont la matrice polymère contient une phase argileuse nanostructurée,
- nanocomposite à matrice métallique contenant au moins une phase métallique majoritaire,
- nanocomposite à matrice céramique contenant au moins une phase céramique majoritaire.

3. Nanomousse solide :

Composée d'une matrice solide remplie d'une seconde phase, gazeuse ; il en résulte un matériau de densité plus faible, comprenant une matrice nanostructurée.

4. Matériau nanoporeux :

Un matériau nanoporeux est un matériau solide contenant des nanopores : un nanopore est une cavité dont au moins une dimension est à l'échelle nanométrique. Cette cavité peut contenir un gaz ou un liquide. Des nanopores reliés entre eux donnent au matériau une certaine perméabilité permettant des déplacements à travers celui-ci.

5. Nanodispersion fluide :

Une nanodispersion fluide est un matériau hétérogène dans lequel des nano-objets ou une nanophase sont dispersés dans une phase fluide continue de composition différente. On distingue ainsi plusieurs situations :

- nanosuspension : nanodispersion fluide à phase dispersée solide,
- nano-émulsion : nanodispersion fluide contenant au moins une nanophase liquide,

- nanomousse liquide : nanodispersion fluide remplie d'une seconde nanophase gazeuse ; comme dans le cas de la nanomousse solide, le matériau est généralement de densité plus faible ;
- nano-aérosol : nanodispersion fluide composée d'une matrice gazeuse et d'au moins une nanophase liquide ou solide. (13)

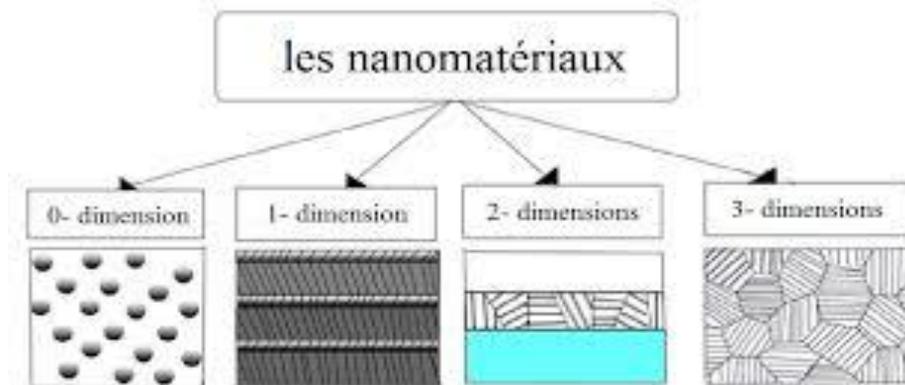


Figure 2-1: classification des nanostructures selon leurs dimensions. (12)

### 2.1.5 Pourquoi un intérêt si fort pour les Nanos :

Les nanotechnologies et les nanomatériaux représentent un nouveau « monde » où la matière possède des propriétés très différentes de ce qu'elle présente à une échelle plus grande ou à l'échelle macroscopique. Rappelons que la diminution de la taille des matériaux va se traduire par le fait que leur surface va occuper une place de plus en plus grande par rapport à leur volume : le ratio Surface/Volume est alors plus important. (13)

Les nanotechnologies conduisent donc à l'élaboration de matériaux dont les propriétés fondamentales (chimiques, mécaniques, optiques, biologiques, etc.) peuvent être modifiées d'une manière importante. Par exemple, l'or est totalement inactif à l'échelle micrométrique alors qu'il devient un excellent catalyseur de réactions chimiques lorsqu'il prend des dimensions nanométriques.

La structuration des matériaux à l'échelle nanométrique, et les propriétés nouvelles qui en découlent, permet de concilier des propriétés jusqu'ici impossibles à obtenir simultanément dans un même matériau, comme par exemple la flexibilité et la résistance. Des propriétés particulières peuvent être apportées à des surfaces, comme les revêtements qui sont utilisés dans l'industrie mécanique pour les rendre plus dures, plus résistantes à la corrosion et pour diminuer le frottement des pièces mécaniques.

Les propriétés de la matière changent fortement quand la taille des objets se rapproche du nanomètre. Ceci est dû en partie au fait que la surface d'un matériau joue un rôle de plus en plus grand dans ses propriétés physiques lorsque sa taille décroît, alors que le nombre d'atomes appartenant à la surface est négligeable dans le cas d'un matériau macroscopique. Par contre, pour un objet nanométrique, la fraction des atomes appartenant à la surface est loin d'être négligeable. Cela va conduire à l'échelle nanométrique : (14) (15)

- à ce que la fraction des atomes sur la surface soit très importante, de l'ordre de 80% des atomes du matériau
- à la prépondérance de la surface et des forces surfaciques par rapport aux forces volumiques ;
- à une plus grande réactivité de la matière : les réactions chimiques se produisant à la surface, il va en résulter que les propriétés de surface (échanges, adhérence, réactions chimiques) vont dominer les propriétés du volume, et l'on va observer des comportements de la matière totalement différents ;
- points d'ébullition et points de fusion différents aux deux échelles nanométrique et classique ;
- le point de fusion n'est plus à une température identique à la température de solidification : le matériau va présenter une hystérésis centrée autour de la température de transition de phase du corps macroscopique, et cette hystérésis va dépendre de la taille de la nanoparticule ;
- la solubilité va augmenter ;
- la dureté et la durabilité seront différentes, généralement plus élevées pour les nanos par rapport au matériau macroscopique ;
- la couleur et la fluorescence vont changer : l'or est rouge à l'échelle nanométrique. Il en sera de même pour de nombreuses autres propriétés, par exemple : la perméabilité magnétique, la conductivité électrique, la réactivité chimique, etc. (13)

### 2.1.6 Du macroscopique au nanomonde :

Lorsque les dimensions caractéristiques des éléments diminuent du macroscopique au microscopique (quelques micromètres), des effets prépondérants à notre échelle deviennent négligeables, alors que d'autres deviennent très importants. Par exemple, alors que les effets de la gravité terrestre sont importants à notre échelle, ils deviennent négligeables à l'échelle de quelques dizaines de micromètres. Ce sont alors les forces de tensions superficielles (ou d'interactions atomiques entre surfaces) qui sont de loin les plus intenses.

Lorsque l'on diminue encore les dimensions pour atteindre le domaine des nanomètres, une autre frontière apparaît. Alors que, au-dessus du micromètre, les propriétés macroscopiques de la matière restent valables, il n'en est plus de même dans le domaine nanométrique. Le nombre d'atomes en surface devient non négligeable vis-à-vis de ceux en volume. Le comportement de la matière donne alors lieu à de nouvelles propriétés physiques, chimiques, voire biologiques. Cette approche, dite **top-down** (de haut en bas), permet aussi de concevoir l'extrapolation des méthodes actuelles de la microélectronique ou de la chimie, par exemple, à des échelles plus petites. La plupart des produits labellisés « nano » aujourd'hui sur le marché résultent de cette approche.

En allant du macroscopique au nanoscopique, on rencontre donc une zone mal définie, entre mondes « classique » et « quantique ». C'est le domaine dit de la physique mésoscopique.

L'approche inverse, dite **bottom-up** (de bas en haut), permet de comprendre comment aller de l'échelle atomique à l'échelle des nanosystèmes. Lorsque les atomes se regroupent, ils forment des molécules plus ou moins complexes, puis des amas dont les formes évoluent le plus souvent vers un polyèdre. Lorsque l'amas compte plusieurs centaines d'atomes, voire plus, on obtient des nanoparticules qui peuvent croître jusqu'à des dimensions de l'ordre du micromètre.

À l'échelle atomique ou moléculaire, la physique classique n'est pas suffisante pour comprendre les propriétés de ces particules. Il faut faire appel à la mécanique quantique. C'est l'un des aspects des nanotechnologies qui rend leur étude à la fois intéressante, déroutante (notamment pour les ingénieurs) et difficile... En effet, les chimistes théoriciens savent depuis longtemps calculer les propriétés des molécules. C'est le domaine de la chimie quantique. Mais cela demande des ordinateurs puissants, car les calculs sont longs et complexes. Et plus le nombre d'atomes est grand, plus les ordinateurs doivent être puissants. Calculer les propriétés de nanoparticules comportant plusieurs centaines d'atomes est impossible.

À l'autre bout de l'échelle des dimensions, viennent les solides. Or les solides sont cristallins, et présentent donc des propriétés mathématiques utiles : les atomes s'arrangent périodiquement dans l'espace, et cette périodicité permet de simplifier les calculs.

C'est ici le domaine de la physique des solides. Quant aux nanosystèmes, on s'aperçoit qu'ils ont des propriétés « intermédiaires » entre celles des atomes et molécules et celles des solides. Malheureusement, les simplifications de calculs de ces deux extrêmes ne sont plus possibles. C'est donc tout un nouveau domaine de recherches qui s'ouvre au monde scientifique. (11)

### 2.1.7 Procédés de synthèse des nanoparticules :

Les principaux procédés de synthèse : les procédés chimiques, les procédés physiques et les procédés mécaniques. (16)(Voir l'annexe 5)

Il existe de nombreuses méthodes de synthèse mécaniques des nanoparticules, la technique la plus employée est expliquée ci-après :

#### La mécanosynthèse : (Mechanical Alloying)

La mécanosynthèse est un procédé de synthèse par broyage à haute énergie à sec de poudres d'éléments purs qui permet d'obtenir toutes sortes de matériaux. Elle connaît maintenant un développement considérable en raison de l'intérêt porté aux nanomatériaux et plus généralement aux matériaux métastables. Parmi les nombreuses techniques qui permettent d'élaborer des nanomatériaux, la mécanosynthèse est un véritable moyen pour mélanger et combiner des solides jusqu'à l'échelle atomique et pourrait jouer un rôle important car elle est simple à mettre en œuvre et permet de produire des quantités appréciables de matériaux avec une bonne reproductibilité.

Cette technique a été développée accidentellement en 1968 pour la fabrication d'alliages métalliques. Les métaux ont été co-broyés dans un broyeur fortement énergétique, produisant une poudre fine selon un mécanisme alterné de fractures et de soudures froides. Gilman et Benjamin (1983) se sont intéressés aux mécanismes de formation des alliages et ont appliqué la technique à un grand nombre d'éléments métalliques.

#### Principe :

Dans les méthodes de l'approche descendante, on considère principalement les techniques de broyage. Le broyage pour l'obtention des nanoparticules est généralement réalisé dans des broyeurs à billes. Le broyage à haute énergie consiste à agiter plus ou moins violemment, une poudre et des billes contenues dans une jarre. Sous l'effet des collisions, les grains de poudre sont alternativement déformés plastiquement, fracturés et recollés les uns aux autres, conduisant à un mélange des différents constituants. Ces billes rentrent en collision entre elles, en piégeant des particules (figure 2-2). Comme conséquence de cet impact, les particules emmagasinent de l'énergie élastique. En effet, le broyage transmet par chocs de l'énergie au "système poudres", et c'est l'énergie d'origine mécanique qui est soit commuée en énergie de réaction au sens chimique et permet aux particules de réagir chimiquement entre elle, soit génératrice de défauts qui permettent des transformations de phase via un changement structural. Lorsqu'une fissure apparaît au sein d'une particule, cette fissure se propage dans la mesure où l'énergie cumulée excède l'énergie

nécessaire pour créer la nouvelle surface. Pour cette raison, les billes utilisées sont en général en acier ou en carbure de tungstène, (plus lourdes que les billes céramiques), et l'énergie cinétique qu'elles peuvent transférer aux particules lors des collisions est grande.

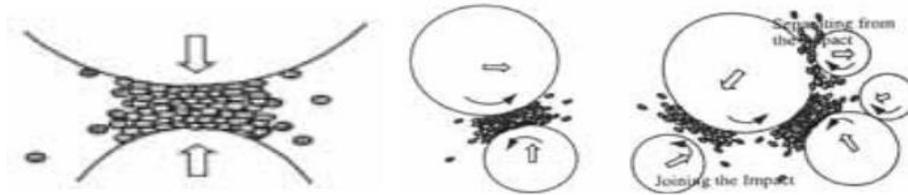


Figure 2-2: Diagramme schématisant des différents types d'impact possibles pendant le broyage. De gauche à droite : impact frontal, impact oblique, impact multi-bille. (17)

C'est le rapport des fréquences de fracture et de collage qui fixe la taille finale des agrégats de poudre. Ces trois phénomènes sont à l'origine de l'obtention d'une structure nanocristalline (Figure 2-3). (17)

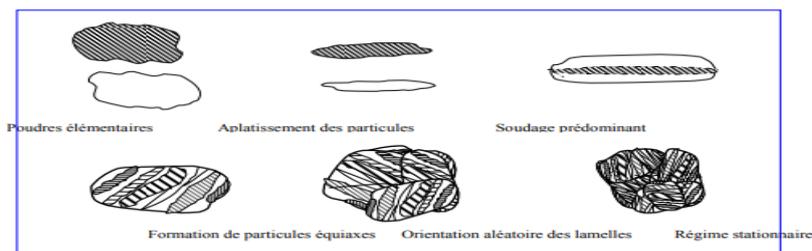


Figure 2-3: Schéma de principe du broyage à haute énergie : alternance de déformations plastiques, fractures, collages. (17)

## 2.1.8 Application des nanotechnologies et des nanomatériaux en fonction des secteurs

### d'activité :

(Voir l'annexe 6)

## 2.2 Les matériaux à gradient des propriétés :

### 2.2.1 Définition :

Les matériaux à gradient de propriétés mécaniques, (dite en anglais : Functionally Graded Materials), qui s'inscrivent dans une tendance relativement nouvelle de la science des matériaux. Ce sont des matériaux ayant une variation graduelle et continue des fractions volumiques de chaque constituant, générant des changements en conséquence des propriétés des matériaux. L'idée

originale du concept des matériaux FGM a été proposée en 1984 par des chercheurs japonais, pour la préparation de nouveaux matériaux dans la construction de barrière thermique (18). Cette technologie permet de résoudre le problème de l'interface entre deux matériaux par l'élimination de discontinuités et d'améliorer la résistance au délaminage et à la propagation des fissures. (19)

Les matériaux à gradient fonctionnel sont une nouvelle classe de matériaux composites dont les propriétés thermomécaniques varient selon une loi de fonction continue (figure 2-4-a) ou discrète (figure 2-4-b) à travers l'épaisseur (20). Grâce à la structure spéciale de ces matériaux, il est possible d'éviter les concentrations de contraintes au niveau des interfaces (provoquant le délaminage) et d'améliorer les propriétés mécaniques et thermiques des pièces par association de matériaux. Ces matériaux sont de plus en plus utilisés dans les industries aéronautiques, aérospatiale, biomécanique, automobile et dans bien d'autres applications technologiques.



Figure 2-4: (a) Variation continue des propriétés (b) Variation discrète des propriétés. (20)

Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure d'un matériau « FGM » est illustré dans la figure (2-5). Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés des « FGM ». Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente. (21)

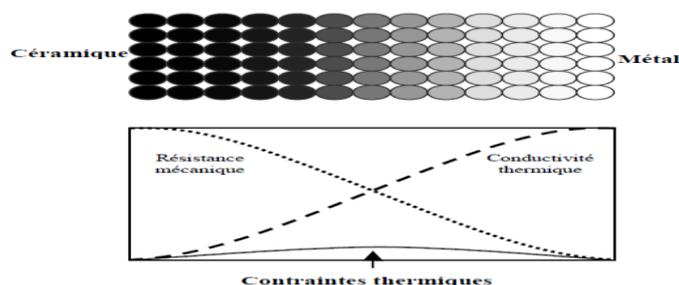


Figure 2-5: Concept des matériaux à gradient de propriétés. (21)

Les très populaire FGMs disponibles sont des composites céramique-métal, où la partie céramique présente une bonne capacité de résistance à la corrosion et à la chaleur et une partie métallique offrant une ténacité à la rupture et une soudabilité supérieure. Une microstructure

continuellement graduée avec des constituants en métal/céramiques est représentée dans la figure 2-6. (21)

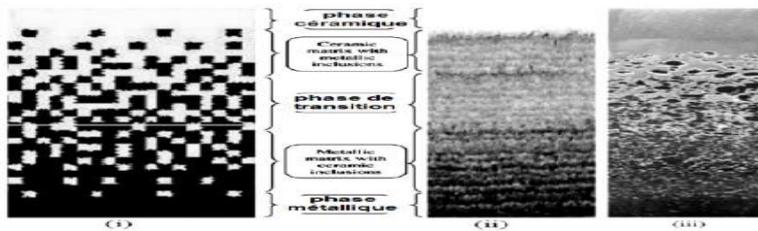


Figure 2-6: Types de Gradation de la microstructure (i) microstructure doucement graduée (ii) vue agrandie et (iii) FGM céramique/métal. (18)

### 2.2.2 Les techniques d'élaborations des matériaux à gradient des propriétés :

Il existe plusieurs méthodes différentes physiques et chimiques pour la fabrication des FGMs selon le type de matériaux, l'application et les commodités accessibles. Les méthodes de traitement des FGMs peuvent être classées en deux grandes catégories basées sur le traitement constructif et le transport de masse.

Dans la première catégorie, le FGM est construit couche par couche en commençant par une distribution appropriée dans laquelle les gradients sont littéralement construits. L'avantage de cette technique est de fabriquer un nombre illimité de gradients. Pendant ce temps, dans la seconde catégorie, les gradients à l'intérieur d'un composant dépendent du phénomène de transport naturel tel que le flux de fluide, la diffusion d'espèces atomiques ou la conduction thermique. Cependant, les progrès de la technologie d'automatisation au cours des deux dernières décennies ont offert des processus de gradation constitutifs technologiquement et économiquement réalisables. (22)

Les techniques existantes et les plus à jour pour la fabrication des FGMs sont donnés en détail et la vue d'ensemble des processus de fabrication est présentée dans le tableau.

Tableau 2-1:Exemples de propriétés recherchées par l'utilisation de nanoparticules dans différents secteurs d'activité économique. (23)

S1.NO	Process	Variability of transition function	Versatility in phase content	Type of FGM	Versatility in component geometry
1	Powder stacking	Very good	Very good	Bulk	Moderate
2	Sheet lamination	Very good	Very good	Bulk	Moderate
3	Wet powder spraying	Very good	Very good	Bulk	Moderate
4	Slurry dipping	Very good	Very good	Coating	Good
5	Jet solidification	Very good	Very good	Bulk	Very good
6	Sedimentation/centrifuging	Good	Very good	Bulk	poor
7	Filtration/slip]casting	Very good	Very good	Bulk	Good
8	Laser cladding	Very good	Very good	Bulk, Coating	Very good
9	Thermal spraying	Very good	Very good	Coating, Bulk	Good
10	Diffusion	Moderate	Very good	Joint, Coating	Good
11	Directed solidification	Moderate	Moderate	Bulk	Poor
12	Electrochemical gradation	Moderate	Good	Bulk	Good
13	Foaming of polymers	Moderate	Good	Bulk	Good
14	PVD, CVD	Very good	Very good	Coating	Moderate
15	GMFC process	Very good	Moderate	Bulk	Good

Il existe de nombreuses méthodes d'élaboration des matériaux à gradient de propriétés, les techniques les plus employées sont brièvement expliquées ci-après : (voir l'annexe 7)

**A. La métallurgie des poudres :**

La métallurgie de poudres est une technique utilisée pour la fabrication de pièces en partant de poudres. Le processus classique comprend les étapes suivantes : fabrication de la poudre, mélange de cette poudre avec des adjuvants (lubrifiant, élément d'alliage, etc., qui vont améliorer son comportement lors d'une étape suivante ou les propriétés finales du matériau), mise en forme, frittage, finition. La mise en forme de la pièce peut se faire à température ambiante ou à chaud. La mise en forme à température ambiante est généralement effectuée par compaction de la poudre dans une matrice, dont la forme est homothétique de la forme finale de la pièce souhaitée. Finalement la consolidation du matériau est obtenue par frittage, c'est-à-dire lors d'un traitement thermique à une température en dessous du point de fusion du composant principal du matériau. Durant la mise en forme à chaud, les étapes de pressage et frittage sont simultanées, ce qui peut se réaliser à une température plus basse mais l'équipement nécessaire est très coûteux. (23)

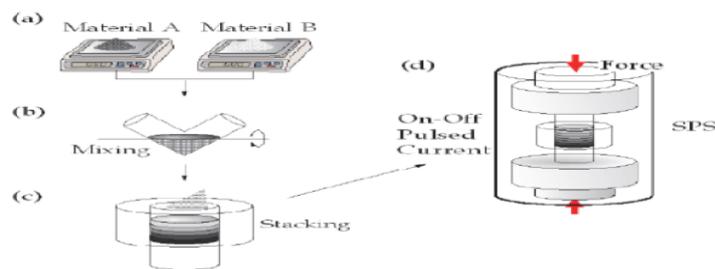


Figure 2-7 : Processus de fabrication typique des FGM par la méthode de métallurgie des poudres. (23)

La métallurgie de poudres a été utilisée depuis l'époque des Egyptiens pour la décoration des sculptures et pour la fabrication des instruments de fer. Néanmoins, la métallurgie de poudres s'est développée très lentement à cause de la difficulté de fabrication de la poudre, jusqu'au 19ème siècle quand une méthode a été mise au point par Wollaston pour produire un compact de platine. Au début du XX siècle le développement des lampes à incandescence aux Etats Unis a lancé la production de filaments de différents matériaux, principalement de tungstène, pour lequel il n'existe pas d'équipement capable de produire la très haute température de fusion (3410°C). Plus tard, pendant la deuxième guerre mondiale, a été développée la technologie de fabrication de poudres d'acier en Europe Centrale. Dans les années 70, la fabrication d'outils en acier et de pièces en superalliages a été réalisée par compactage isostatique à chaud. A la fin de 20 siècles la technologie de moulage par injection et la solidification rapide sont apparues aux Etats Unis. Actuellement la fabrication de nanomatériaux est très commode par métallurgie de poudres, grâce à la fabrication de

nano poudres et de nouvelles méthodes qui permettent de contrôler la taille de grains pendant le frittage. (24)

La réduction des coûts de production, la possibilité de mieux contrôler la microstructure, la précision dimensionnelle des pièces et la combinaison de propriétés spécifiques sont les principaux avantages offerts par la métallurgie de poudres. (23)

### **B. Le frittage :**

Le frittage est un traitement thermique effectué à une température au-dessous du point de fusion du composant principal du matériau qui permet la génération de liaisons fortes entre les particules par diffusion de matière. Dans la plupart des cas, le frittage est accompagné d'un retrait (réduction des dimensions de la pièce) et donc d'une densification (réduction de volume de la pièce). Le cycle de frittage comprend généralement une période de chauffage à la température de frittage, ensuite une période isotherme et finalement un refroidissement. Les vitesses de chauffage et refroidissement doivent être contrôlées pour éviter une fissuration, surtout dans les matériaux céramiques. L'élimination des lubrifiants et liants ajoutés à la poudre avant la mise en forme se déroule au début de la période de chauffage. Le palier isotherme permet la croissance des liaisons inter particulaires et la densification du matériau et entraîne parfois un grossissement de grains. Le frittage peut se faire en phase solide ou en présence d'une phase liquide. Industriellement le frittage en phase solide est le plus utilisé, surtout pour la fabrication de pièces métalliques, car le changement de dimensions est faible. Le frittage avec phase liquide est surtout utilisé pour la fabrication de composites de matrice métallique ou céramique. D'autres méthodes de consolidation d'une poudre sont le frittage réactif et le frittage sous pression.

#### Frittage en phase solide :

La poudre est chauffée à haute température mais aucun des constituants ne fond. Les liaisons entre les particules se font principalement par déplacement d'atomes, on parle de diffusion de matière à l'état solide. La force motrice de ce processus spontané, activé par la température, est la réduction de la grande énergie de surface présente dans le matériau au début du frittage. Cette réduction est opérée par différents mécanismes de transfert de matière, selon le système en question. On parle de frittage actif lorsque l'atmosphère du frittage interagit avec le matériau. L'atmosphère peut être neutre (vide, argon), réductrice (hydrogène, azote) ou oxydante.

#### Frittage en phase liquide

Dans ce procédé de frittage l'un des constituants (minoritaire) du mélange de poudres passe en phase liquide. Comme dans le frittage en phase solide la réduction de l'énergie inter faciale est la

force motrice. La propriété de mouillage de la phase solide par la phase liquide est importante pour réaliser le frittage. La densification durant le frittage en phase liquide se déroule en 3 étapes : réarrangement, dissolution- ré précipitation et grossissement de grains comme on peut l'observer sur la figure 2-8. Pendant le chauffage pour atteindre la température de fusion d'un des composants, une densification en phase solide peut se produire. Elle peut mettre être consécutive pour certains systèmes. Une fois que la phase de plus bas point de fusion devient liquide, l'étape de réarrangement de grains est activée. Ensuite il y a un ajustement de forme des grains qui conduit à une élimination de pores importante. Finalement pendant la dernière étape une croissance microstructurale est observée, au cours de laquelle la taille moyenne des grains et des pores augmente continuellement. Les applications industrielles de cette technique de frittage sont les alliages lourds (W-Ni, W-Ni-Cu), les carbures cémentés (WC-Co, notamment), les alliages Fe-Cu et Cu-Sn, les amalgames dentaires Ag-Sn-Hg, et de nombreuses céramiques.

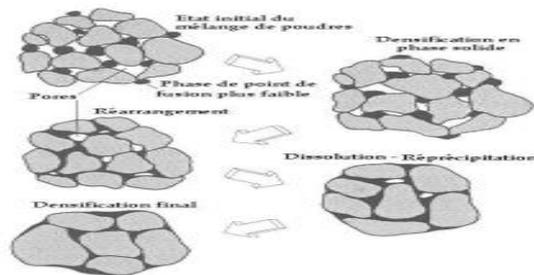


Figure 2-8: Étapes classiques durant le frittage en phase liquide du mélange de poudres. (23)

### Frittage réactif

Ce type de frittage se réalise en provoquant une réaction chimique entre les différentes poudres d'un mélange à haute température. Il est aussi possible de produire un frittage réactif entre la poudre et un liquide ou un gaz.

### Frittage sous pression mécanique

Le frittage sous contraintes est effectué quand on veut obtenir une densification plus complète ou utiliser une température plus basse. Pour appliquer la pression on peut mettre en œuvre la compaction en matrice ou la compaction isostatique. Les contraintes appliquées activent la diffusion aux contacts particulières à des températures relativement basses par rapport au frittage conventionnel et peuvent, pour les métaux, entraîner une déformation plastique. Les dislocations ainsi créées accélèrent encore les phénomènes de diffusion. (23)

### 2.3 Conclusion :

Ce chapitre est divisé en deux parties ; la première est consacré à l'intérêt des matériaux nanostructurés « nanomatériaux », qui réside à leurs leurs propriétés singulières vis-à-vis des matériaux massif correspondants, aussi les nombreux procédés utilisés dans l'élaboration de ces nanomatériaux, ces derniers se divisent en deux grands familles, suivant l'approche sur laquelle ils s'appuient.

La seconde partie de ce chapitre présente une revue générale sur les matériaux à gradient des propriétés et ces différentes techniques d'élaboration.

**Chapitre III :**  
**Caractérisation structurale et mécanique des**  
**matériaux**

### 3 Chapitre III : Caractérisation structurale et mécanique des matériaux

#### 3.1 Introduction :

Les propriétés des matériaux sont définies par la nature des liaisons chimiques, l'arrangement atomique et la microstructure. La microstructure décrit l'ensemble des grains ou des particules de taille microscopique, qui caractérise la structure d'un grand nombre de matériaux. La microstructure d'un matériau est donc formée par l'ensemble des grains, des particules ou des défauts observables par microscopie (optique et électronique).

#### Cristallographie :

Les matériaux métalliques couramment utilisés, ainsi que de nombreuses céramiques ont une structure polycristalline qui est formée d'une multitude de microcristaux (grains) reliés entre eux par des zones moins ordonnées (joints de grains), chaque grain d'un matériau métallique étant un monocristal. La structure en grain existe également dans certains polymères mais elle est très particulière parce qu'elle est semi-cristalline. Chaque grain est, dans ce cas, constitué d'une sphérolithe qui est un édifice constitué d'un ensemble de lamelles cristallines solidarisiées par une phase amorphe.

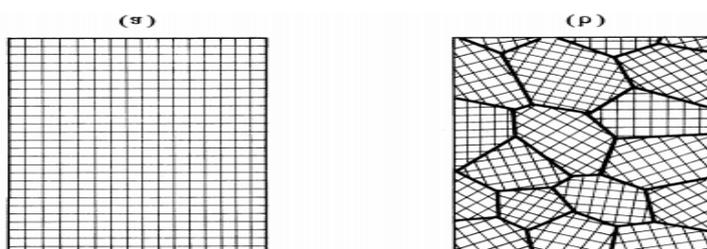


Figure 3-1: Vue schématique de l'assemblage des cristaux : La structure cristalline est représentée par un réseau quadrillé : (a) cristal unique (monocristal) ; (b) structure polycristalline (assemblage de grains cristallins) avec, en traits noirs, les joints de grain (1)

Tous les corps sont en principe susceptibles d'exister sous quatre états : solide cristallin ou amorphe, liquide ou gaz.

- La structure amorphe, dense et peu ordonnée et qui est similaire à celle des liquides.
- La structure cristalline, qui est caractérisée par une distribution périodique des atomes ordonnés à grande distance.

La cristallographie décrit l'architecture des cristaux, c'est-à-dire la répartition des atomes dans l'espace et les lois géométriques qui en fixent la position. Les solides cristallins sont donc

caractérisés par un ensemble d'atomes arrangés périodiquement suivant les trois directions de l'espace dans un ordre strict qui définit la structure cristalline. (1)

## 3.2 La microstructure :

Actuellement, les aubes des turbines à gaz conservent des propriétés mécaniques élevées et résistent à l'oxydation jusqu'à une température légèrement supérieure à 1000 °C. Celles-ci sont fabriquées en alliages métalliques à base de nickel contenant une dizaine d'éléments dont l'aluminium, le titane et le chrome. La résistance de ces alliages aux sollicitations mécaniques à température élevée résulte essentiellement de leur microstructure. (2)

### 3.2.1 Généralité :

La microstructure détermine les propriétés d'un très grand nombre de matériaux. C'est grâce à la modification contrôlée de la microstructure lors de la fabrication ou de la transformation que l'ingénieur en matériaux obtient une large gamme de propriétés. Une variation de la microstructure au cours du temps lors de l'utilisation du matériau entraîne une modification importante de ses propriétés (phénomène de vieillissement). Pour obtenir des matériaux fiables, il est indispensable de maîtriser les phénomènes de vieillissement qui sont le résultat de modifications physiques ou de réactions chimiques. Pour comprendre le comportement des matériaux, il faut établir la liaison entre des phénomènes qui se déroulent à l'échelle microscopique et sub-microscopique et les propriétés du matériau. La microstructure d'un matériau est donc formée par l'ensemble des grains, des particules ou des défauts observables par microscopie (optique et électronique). Les éléments de la microstructure d'un matériau sont en général définis par plusieurs paramètres :

- ✓ Composition ;
- ✓ Arrangement atomique ;
- ✓ Quantité relative ;
- ✓ Morphologie ;
- ✓ Taille.

Pour caractériser certains matériaux, on s'aide de plusieurs types de méthodes (observations : à l'œil nu, observation au microscope, essais : mécaniques, ou autres) et ce en se basant sur certaines propriétés de ces matériaux. Les métallurgistes peuvent fréquemment identifier un métal ou un alliage, découvrir d'éventuelles impuretés et vérifier l'efficacité des traitements de trempe et de recuit. (25)

La Métallographie étudie la structure cristalline des métaux et des alliages, et les relations entre cette structure et les propriétés physiques des métaux. Les principaux outils utilisés en métallographie sont le microscope et le générateur de rayons X. (25) Plusieurs étapes de grossissement sont donc nécessaires, pour passer de l'échelle de l'aube d'une turbine à gaz à l'observation de la microstructure et à la détermination de l'arrangement des atomes. Ces analyses mettent successivement en jeu le microscope optique (observation du mm au  $\mu\text{m}$ ), le microscope électronique (observation de 100  $\mu\text{m}$  au nm) et la diffraction des rayons X pour l'analyse de l'arrangement à l'échelle atomique (observation à l'échelle du nm). (2)

### 3.2.2 Microscopie optique (lumière visible) : **Traité des matériaux**

On utilise deux techniques expérimentales principales : la microscopie à transmission lorsque la lumière traverse l'échantillon et la microscopie à réflexion dans le cas d'échantillons opaques où l'on observe la lumière qui est réfléchiée à la surface. La microstructure des matériaux opaques, comme les métaux, s'étudie au microscope optique à réflexion après polissage de l'échantillon et attaque chimique. Le polissage produit un état de surface comparable à celui d'un miroir et l'attaque chimique de la surface polie révèle les différences d'orientation cristallographique et de composition chimique. Les avantages de la microscopie optique est de permettre d'étudier en direct le développement des microstructures

### 3.2.3 Microscopie électronique :

Pour l'observation de certains détails de la microstructure des matériaux, il est nécessaire d'utiliser des grossissements supérieurs à 1000 (limite de la microscopie optique) et de recourir aux techniques de la microscopie électronique. La structure en grains des alliages métalliques, dont les dimensions caractéristiques sont en général inférieures au micron, est presque toujours étudiée par microscopie électronique. Les structures des métaux après trempe et des céramiques fabriquées à partir de poudres de taille sub-microscopique sont aussi mises en évidence par les techniques de microscopies électroniques. (2)

#### 3.2.3.1 Microscope électronique à balayage (MEB) :

Le fonctionnement du MEB est basé sur l'émission d'électrons produits par une cathode et la détection de signaux provenant de l'interaction entre ces électrons et un échantillon. L'envoi d'un faisceau d'électrons incidents d'énergie  $E_0$  sur la surface d'un échantillon entraîne la formation de différentes particules

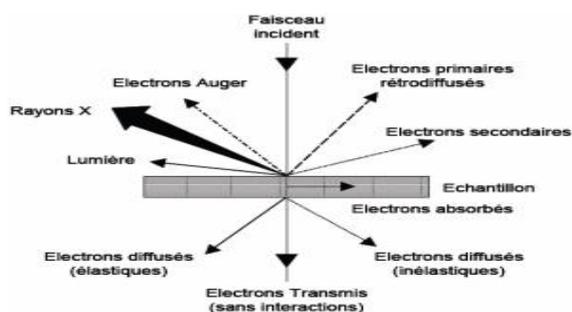


Figure 3-2 : Particules émises lors de l'interaction électron-matière. (25)

Les trois principaux signaux utilisés en microscopie électronique à balayage :

- Les électrons secondaires sont créés par l'éjection d'un électron faiblement lié d'un atome de l'échantillon par un électron incident qui lui a cédé une partie de son énergie. Ces électrons permettent d'obtenir des renseignements sur la topographie de l'échantillon.
- Les électrons rétrodiffusés sont des électrons incidents qui sont rentrés en collision avec des noyaux des atomes de l'échantillon. Ils repartent avec une énergie proche d' $E_0$ . Ces électrons permettent d'obtenir une image par contraste de numéro atomique.
- Les rayons X sont créés par désexcitation d'un atome de l'échantillon suite à son ionisation. Leur détection permet donc d'obtenir des renseignements sur la nature chimique des éléments constituant l'échantillon. (25)

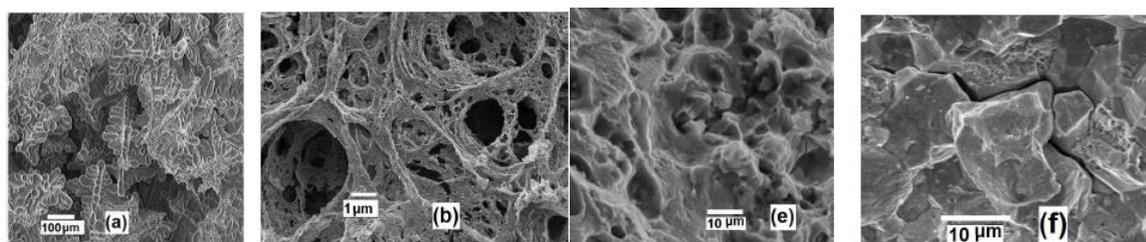


Figure 3-3 : Quelques exemples de microstructures obtenues par Microscopie Electronique à Balayage (25)

- (a) Dendrites avec porosité dans l'alliage d'aluminium de fonderie AlSi9, (b) Une nano-mousse d'un alliage ferreux, (e) Faciès de rupture ductile en traction d'un aluminium de série 2000, (f) Faciès de rupture fragile inter-granulaire (à travers les joints de grains).

### 3.2.3.2 Microscopie électronique en transmission (MET) :

Le principe du MET est la formation d'une image d'un échantillon mince par des électrons transmis. Un faisceau d'électrons est généré et accéléré par un canon à électrons. Il est ensuite focalisé en direction de l'échantillon par des lentilles magnétiques. Un second

Le système de lentilles magnétiques permet d'agrandir l'image obtenue. Le MET permet d'atteindre des résolutions atomiques que le MEB ne peut atteindre. Cette résolution n'est pas limitée par la longueur d'onde des électrons mais par les aberrations des lentilles magnétiques. Les conditions expérimentales sont différentes de celles utilisées pour le MEB. Les tensions d'accélération sont généralement comprises entre 100 et 300 kV et les courants sont plus faibles que ceux utilisés pour le MEB.

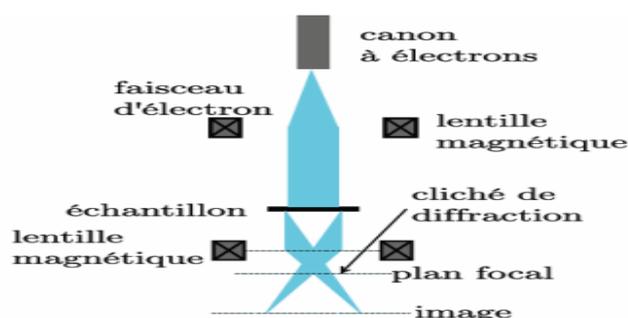


Figure 3-4 : Principe de fonctionnement d'un microscope électronique en transmission. (25)

La méthode la plus utilisée pour étudier la structure des solides à l'échelle de l'atome est la microscopie électronique. Cependant, comme les faisceaux d'électrons sont fortement absorbés par la matière, il est impossible d'analyser par cette technique le cristal en profondeur. En microscopie électronique à transmission, on utilise des échantillons très minces de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de nm. En microscopie électronique à balayage, on utilise des échantillons plus épais car l'image est formée par émission d'électrons secondaires et d'électrons rétrodiffusés. (25)

### 3.2.4 Diffraction des rayons X :

Les rayons X, comme la lumière, sont des radiations électromagnétiques. Lorsqu'une radiation électromagnétique rencontre une particule chargée comme un électron, elle induit un déplacement périodique de cette charge électrique. La radiation incidente est donc en partie diffusée par la particule chargée. L'échantillon est placé au centre de la caméra et le film enregistreur est enroulé sur la partie cylindrique interne. L'orientation des éléments de la poudre est complètement aléatoire et il n'y a qu'une certaine fraction des particules qui ont des plans réticulaires orientés correctement pour diffracter. L'intensité diffractée par une famille de plans parallèles conduit à la formation de cône d'angle  $2\theta$  qui coupe le film enregistreur suivant un arc de cercle. La diffraction des rayons X intervient à chaque fois que la loi de Bragg (voir l'annexe 8). On obtient ainsi un spectre de diffraction constitué d'un ensemble de lignes qui est caractéristique de la maille cristalline de la substance analysée. (1)

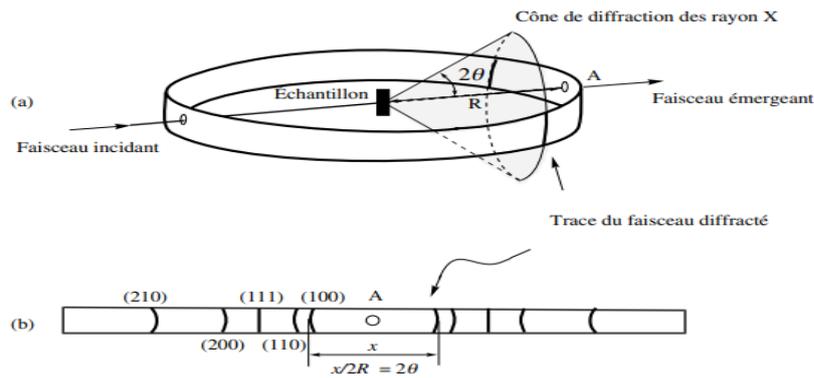


Figure 3-5:(a) Représentation schématique d'une caméra de rayon X utilisée pour la méthode des poudres ; le film enregistreur est enroulé sur la partie cylindrique interne de la caméra ; (b) diagramme de rayon X d'une poudre cristalline (maille cubique primitive) enregistré sur le film. A correspond au trou de passage des rayons X. (1)

Chaque espèce cristalline possède son propre diagramme de poudre et le diagramme de poudre d'une substance constitue l'empreinte qui permet de l'identifier. Il existe actuellement un fichier informatisé de l'ensemble des substances cristallines connues (fichier ASTM (American Society for Testing materials) qui facilite cet examen). En comparant l'intensité d'une raie intense (hkl) et avec la même raie dans un mélange témoin on détermine la concentration des constituants d'un matériau. La méthode la plus utilisée pour étudier la structure cristalline est la diffraction des rayons X. Ceux-ci, en raison de leur faible coefficient d'absorption, pénètrent en profondeur dans la matière. (1)

### 3.2.5 Insuffisances de la micrographie :

- L'examen ne donne que des indications sur la petite plage examinée.
- La micrographie reste incapable à répondre à certaines questions : lorsque les éléments forment une solution solide, on ne peut ni effectuer un dosage, ni déterminer la répartition des divers éléments.
- L'examen en micrographie ne se fait qu'à la température ambiante, d'où l'insuffisance de nous donner une idée sur les mouvements des constituants. (25)

### 3.3 Propriétés des matériaux :

Un matériau possède un ensemble de propriétés qui détermine son comportement. On caractérise une propriété d'un matériau en analysant la réaction du matériau à une sollicitation extérieure. On détermine en général une propriété à l'aide d'un essai normalisé. Selon le type de sollicitations extérieures, on distingue trois catégories de propriétés : (1)

• Les propriétés mécaniques : qui reflètent le comportement des matériaux déformés par un ensemble de forces.

- Modules d'élasticité,
- Limite d'élasticité, écrouissage, ductilité.
- Viscosité, vitesse de fluage, amortissement
- Charge à la rupture, résistance à la fatigue, à l'usure, ... (2)

• Les propriétés physiques qui mesurent le comportement des matériaux soumis à l'action de la température, des champs électriques ou magnétiques ou de la lumière.

- Conductibilité électrique, aimantation, -
- Conductibilité thermique :  $k$  ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ) caractérise le transfert de chaleur à travers un matériau, d'une région chaude vers une région froide ; (3)
- chaleur spécifique ;
- Le coefficient de dilatation thermique linéaire  $\alpha$  ( $\text{K}^{-1}$ ) représente la variation relative de longueur produite par une variation de température de 1 K ; (3)
- Température et chaleur latente de transformation,
- Energie de surface, de liaison,
- Transparence. (2)

• Les propriétés chimiques : qui caractérisent le comportement des matériaux dans un environnement réactif.

- Résistance à la corrosion, à l'oxydation,
- stabilité chimique,
- diagrammes d'équilibre. (2)

Certaines propriétés dérivent directement de l'arrangement des atomes et de la nature des liaisons. C'est le cas de l'opacité des métaux, de la transparence des verres ou de l'extensibilité des caoutchoucs. D'autres propriétés des matériaux sont fortement dépendantes de leur microstructure qui est composée de grains ou de particules de taille microscopique, dotés d'une morphologie déterminée. (1)

### 3.3.1 La rupture :

La rupture est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties, sous l'action d'une contrainte. Cette séparation se produit à plus ou moins grande vitesse par propagation de fissures existant dans le matériau. La rupture est donc fortement influencée par la présence de défauts

internes comme les microfissures (qui deviennent instables et conduisent à la rupture lorsque la force appliquée dépasse une valeur critique) les pores, les inclusions de particules fragiles et par la présence d'entailles (macrofissures) résultant de défauts de fabrication ou de conception.

La ténacité est également influencée par la vitesse de déformation. Certains matériaux, qui ont un comportement ductile à faible vitesse de mise en charge, se rompent fragilement sous l'action d'un choc. L'étude du comportement d'une fissure sous contrainte constitue la base de la mécanique de la rupture. (1)

La rupture ductile : C'est un mode de rupture qui apparaît à l'issue d'une déformation plastique généralement importante.

La rupture fragile :

Les ruptures à temps : Ces modes de rupture qui se développent pendant des durées importantes passent généralement par plusieurs étapes faisant intervenir des mécanismes différents.

- La rupture par fatigue : Elle se développe sous des charges répétées un grand nombre de fois
- La rupture par fluage : Elle se produit à chaud, généralement sous charge statique,
- La rupture par corrosion sous tension Au contraire de la précédente, la rupture fragile n'est pas précédée d'une déformation plastique.

Ces types de ruptures à temps se produisent sous des efforts inférieurs à la résistance du métal, (5)

### 3.3.2 La résilience :

La résilience est une caractéristique conventionnelle qui permet, dans des conditions bien déterminées, d'apprécier la résistance d'un métal à une rupture brutale. (5)

### 3.3.3 Le fluage :

Au-delà d'un certain domaine de température, on remarque que, sous une charge de traction constante (souvent inférieure à sa limite d'élasticité), un métal peut se déformer progressivement et même se rompre au bout d'un temps plus ou moins long (de quelques heures à plusieurs dizaines de milliers d'heures, voire d'avantage). Cette évolution, qui perturbe la mesure de la limite d'élasticité, est la conséquence d'un autre processus de déformation plastique à chaud : le « fluage ». (5)

### 3.3.4 Corrosion :

Dans de nombreux exemples, la corrosion est limitée à la surface. C'est le cas de l'oxydation qui se produit à l'interface métal-atmosphère et qui peut être complètement éliminée en isolant la

surface du métal par un revêtement organique (peinture) ou par une couche d'oxydes étanches. La corrosion superficielle prend souvent une forme beaucoup plus localisée. Souvent, elle est limitée à un endroit bien déterminé de la surface, par exemple à un défaut du revêtement protecteur ou à un défaut de surface (joints de grains par exemple), ou encore à l'intérieur d'une fissure superficielle du matériau. Ces corrosions localisées sont les plus dangereuses, car elles progressent souvent à très grande vitesse et finissent par affecter une section importante du matériau. Selon leur type, certaines corrosions sont considérablement accélérées par la présence de contraintes statiques ou cycliques. La corrosion est également susceptible de se produire à l'intersection de deux matériaux de composition différente. (1)

- la corrosion dite humide qui fait systématiquement intervenir l'eau et qui est, de ce fait, considérée comme un phénomène électrochimique. (5)
- la corrosion sèche qui procède par réaction directe d'un composant du milieu ambiant avec le métal et qui prend souvent un nom dérivé de celui de l'agent actif. (5)

### 3.4 Les essais mécaniques :

Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue, et ce dans des conditions variables, par exemple de température ou de vitesse de sollicitation. Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la géométrie de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Ces normes définissent donc :

- 1- la forme de la pièce d'essai dont on teste le matériau, on parle alors d'éprouvette normalisée ;
- 2- Comment sont exercés les efforts sur l'éprouvette, on parle alors d'essai normalisé. (25)

#### 3.4.1 Essai de traction : Traité des matériaux

L'essai le plus courant permettant de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction. On applique une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture suivant un processus de mise en charge à vitesse de déformation constante. En enregistrant la force appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif, on détermine une série de caractéristiques mécaniques essentielles. (1)

La courbe de traction de déterminer les quatre grandeurs caractéristiques suivantes :

- le module d'Young,  $E$ , ou module d'élasticité longitudinale, exprimé en (MPa) ou en (GPa) ;

- la limite d'élasticité (lorsqu'elle existe),  $R_e$ ,  $\sigma_e$  ou  $\sigma_y$  (yield stress), qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
- la résistance à la traction  $R_m$  ou  $\sigma_m$ , qui définit la limite à la rupture ;
- l'allongement à la rupture  $A$ , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications ;
- le coefficient de Poisson, qui correspond à la fraction (ou le pourcentage) de déformation transversale divisée par la fraction (ou le pourcentage) de déformation axiale. (25)

Pour des questions de sécurité, de manière générale, les éléments de machines sont calculés de façon à maintenir les contraintes à un niveau inférieur à la limite élastique. Le comportement mécanique ne dépend alors que du module d'élasticité  $\varepsilon$ . (1)

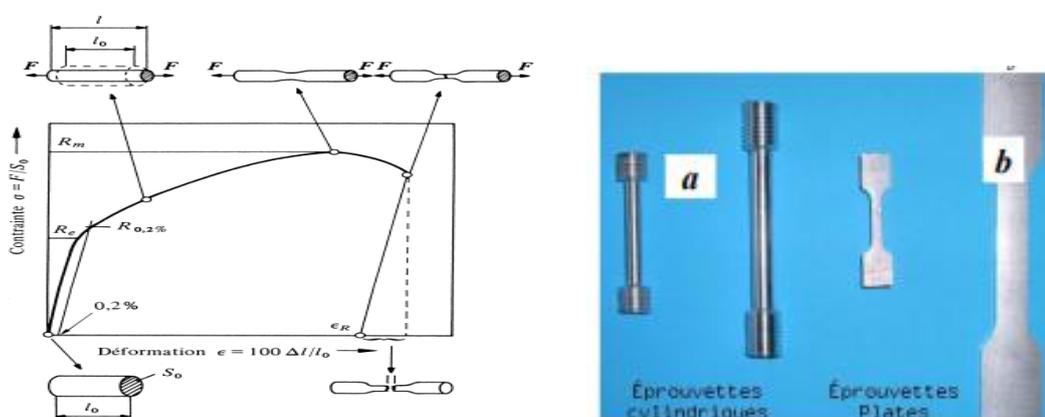
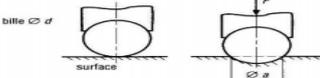
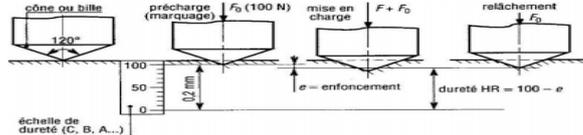


Figure 3-6: Courbe contrainte  $\sigma$  – déformation  $\varepsilon$  d'une barre cylindrique soumise à une traction pour un métal à comportement ductile ; Eprouvettes de traction d'un (a) matériau métallique, (b) matériau polymère ou composite (25)

### 3.4.2 Mesure de la dureté :

Les mesures de traction sont souvent associées à des mesures de dureté qui constituent une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée. Les méthodes de mesures de la dureté (duretés Brinell, Vickers, etc.) sont basées sur la pénétration forcée d'un indenteur très dur à la surface du matériau. Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte faite par l'indenteur soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées. La détermination de la dureté est un des tests le plus utilisé pour caractériser un matériau car c'est un essai non destructif qui se réalise à l'aide d'un appareillage peu évolué. C'est un test complexe peu facile à interpréter que l'on peut relier de manière empirique à la résistance en traction. Cette détermination est donc complémentaire de l'essai de traction. (1)

Tableau 3-1: principaux essais de dureté. (1)

Principaux essais de dureté		
Essai	Symbole	Principe et conduite de l'essai
Brinell	HB	 $HB = \frac{0,102 \cdot F}{S}$ $S = \frac{\pi d}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$ <p>(F en N, a et d en mm)</p>
Vickers	HV	 $HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$ $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ <p>(F en N, d1 et d2 en mm)</p>
Rockwell	HR (HRC, HRB...)	 <p>échelle de dureté (C, B, A...)</p>

### 3.4.3 L'énergie de rupture en flexion par choc :

L'essai consiste à rompre, à l'occasion d'un choc unique, sur un mouton-pendule (figure 3.3) une éprouvette entaillée en son milieu, reposant sur deux appuis et sollicitée en flexion. On mesure alors l'énergie absorbée par la rupture. Pour les métaux à structure cubique centrée on analyse les variations de l'énergie de rupture mesurée à différentes températures. Pour ce faire on trace la courbe dite de transition qui représente les variations de cette énergie de rupture en fonction de la température d'essai. La principale caractéristique tirée d'une telle courbe de transition est une donnée arbitraire appelée « température de transition » qui est la température à laquelle l'énergie de rupture atteint un niveau donné. Ces températures de transition doivent être utilisées avec précaution car leur relation avec les températures minimales de service des constructions est fort complexe ; elle dépend de nombreux paramètres tels que les caractéristiques mécaniques du métal. On voit donc que les essais de flexion par choc permettent de tester la résistance à la rupture brutale du métal dans des conditions très particulières et si particulières que les résultats obtenus (énergies de rupture ou température de transition). (5)

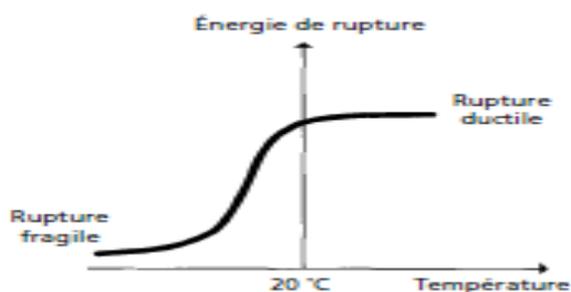


Figure 3-7: Courbe de transition de la résilience. (5)

#### 3.4.4 Fluage :

Pour déterminer ces caractéristiques on effectue des essais de fluage qui consiste à porter une éprouvette à la température choisie et à lui appliquer une charge de traction constante dans le temps jusqu'à l'obtention d'un allongement plastique fixé ou jusqu'à sa rupture.

#### 3.4.5 L'étude de la tenue à la corrosion :

■ **les essais globaux** : on peut apprécier la tenue d'un métal face à un milieu corrosif en exposant des éprouvettes de ce métal au milieu considéré et ceci dans des conditions conventionnelles ou au contraire dans des conditions les plus proches de la réalité vécue. Les mesures portent sur les variations de poids, ces variations de poids étant ramenées à l'unité de surface et évaluées en fonction du temps.

■ **Essais électrochimiques** : Lorsque le métal étudié peut se recouvrir d'une couche passive, sa tenue à la corrosion humide peut être analysée à l'aide d'essais électrochimiques ; Ces essais électrochimiques sont très sensibles aux conditions opératoires et, notamment, à l'état de l'éprouvette (état de surface et état structural) et à l'état de l'électrolyte (agitation, aération, impuretés...).

■ **Essais spécifiques** : Pour apprécier les risques et les développements de processus de corrosion par piqûres et sous tension, il est nécessaire de procéder à des essais particuliers qui font souvent appel à des examens micrographiques et à des mesures physiques et mécaniques. (5)

#### 3.5 Conclusion :

Un matériau est défini par sa microstructure (type de liaison, porosités...), qui influent d'une façon directe son comportement. Le comportement macroscopique d'un matériau se résulte par les propriétés qui se déterminent par des essais.

**Chapitre IV :**  
**Techniques Expérimentales**

## 4 Chapitre IV : Techniques Expérimentales

### 4.1 Introduction :

L'intérêt du présent chapitre est l'élaboration d'un nanocomposite de matrice métallique (aluminium) et renfort céramique (Carbure du chrome - Nickel Chrome), dans le but d'étudier l'amélioration des propriétés thermiques d'aluminium, sans abaisser celles mécaniques et physiques.

Le but de cette élaboration, est l'étude de la possibilité de faire le premier pas dans l'utilisation des composites dans les parties chaudes des turbomoteurs, afin de gagner du poids ainsi que diminuer les coûts très chers qui résultent de l'emploi des superalliages.

Ainsi dans ce qui suit, le travail voulu réaliser se partage en :

- Elaboration d'un nanocomposite en utilisant des poudres.
- Caractérisation du matériau obtenu, ainsi la recherche de la fraction volumique qui donne de bonnes propriétés.

La méthode d'élaboration qui a été choisi est le frittage en phase liquide, ce choix était fait en premier lieu par rapport à la disponibilité des outillages nécessaires au sein de laboratoire au niveau de (usthb), après l'étape de réduction de la taille de la poudre du céramique en échelle nanométrique par broyage.

Hélas, dû au COVID-19, le travail n'a pas été réalisé, et le seul résultat que nous avons pût obtenir est les caractéristiques du cermet à l'échelle micro.

Dans ce qui se suit, nous avons résumé brièvement les étapes que nous allions faire car ça reste théorique sans résultats expérimentaux.

### 4.2 Procédures d'élaboration du matériau

Le choix des matériaux de base s'est fait en tentant compte de plusieurs paramètres influençants, un compromis entre les paramètres recherchés (renfort réfractaire, une légèreté relative de matrice, des bons paramètres mécaniques des constituants, bonne compatibilité entre les deux matériaux...) et la disponibilité des matières premières.

#### 4.2.1 Caractérisation des matériaux de base

- **Composition chimique du métal de base :**

Les deux métaux de base utilisés dans notre étude nous ont été fournis par le service de maintenance d'Air Algérie.

- **Alliage 2024 T3 :**

Le premier métal de base étudié est l'alliage 2024 T3, désigné par la suite par MB1. C'est un alliage Al-Cu-Mg qui présente un durcissement structural après traitement thermique. L'état initial de l'alliage est dénommé T3. Cet état correspond à un traitement de trempe après mise en solution (550°C environ) suivi d'un laminage à froid et mûrissement (vieillissement naturel). A rappeler que cet alliage est utilisé dans les structures aéronautiques pour le fuselage. L'analyse chimique effectuée sur l'alliage est présentée sur le tableau 1 ci-dessous.

Les valeurs des éléments de cette composition chimique sont une moyenne de 4 analyses par EDAX qui utilise les photons X pour déterminer aussi bien localement que globalement la nature des éléments chimiques présents. L'analyse est faite sur une surface de l'échantillon de 40µm \* 40µm.

*Tableau 4-1: Composition chimique en poids du 2024 T3.*

Eléments	Al	Cu	Mg	Mn	Zn	Autres
Teneurs masse%	92.42	4.91	1.98	0.59	0.008	0.092

- **Alliage 7075 T6 :**

Le second métal de base sujet de notre étude est l'alliage 7075T6, désigné MB2

Le revenu 7075-T6 a une résistance à la traction maximale de 510 à 540 MPa et une limite d'élasticité d'au moins 430 à 480 MPa. Il a un allongement de 5 à 11%. Le revenu T6 est généralement obtenu en homogénéisant le 7075 coulé à 450 ° C pendant plusieurs heures, en trempant, puis en vieillissant à 120 ° C pendant 24 heures. Cela donne la résistance maximale de l'alliage 7075.

Les échantillons ont été traités par la suite au niveau du laboratoire des Grands Travaux Pétroliers (GTP) de Reghaia (Wilaya de Boumerdès) pour déterminer et vérifier la composition chimique. Ce travail a été fait dans le but de vérifier la conformité de la fiche technique du fournisseur du matériel. La composition chimique de ce métal est présentée dans le tableau 2

*Tableau 4-2:Composition chimique en poids du 7075 T6.*

Eléments	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Cr	Si	Ti	Mn	Autres
Teneurs masse%	89.72	5.63	2.50	1.53	0.22	0.19	0.10	0.04	0.03	0.03

- **Poudre Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> :**

La poudre Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr, désigné par P1, utilisée dans notre étude est un cermet de composition 80Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>– 20(80Ni20Cr) fournie par la société Sulzer-Metco. C'est un composite avec phase de

carbure entièrement revêtue chimiquement d'un alliage de nickel-chrome avec une granulométrie moyenne de 25µm (Fig.1). Sa microdurté est 800-1150 Hv 0.3.

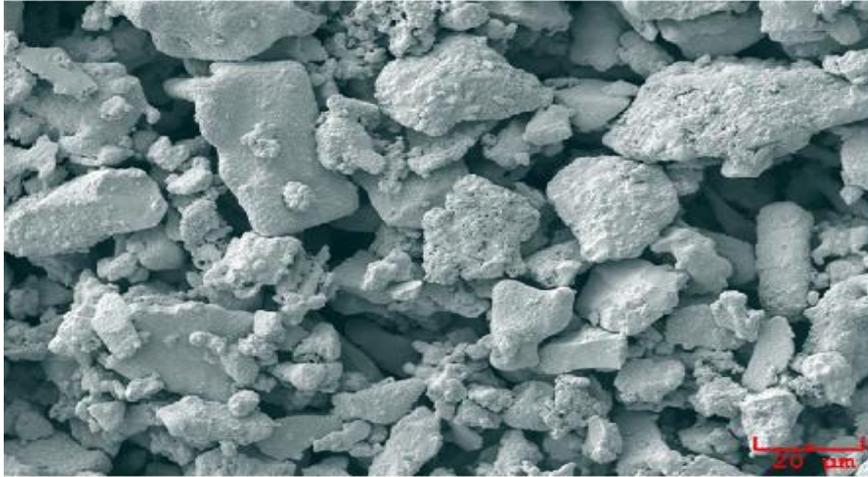


Figure 4-1: Image MEB montrant la morphologie de la poudre utilisée Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr.

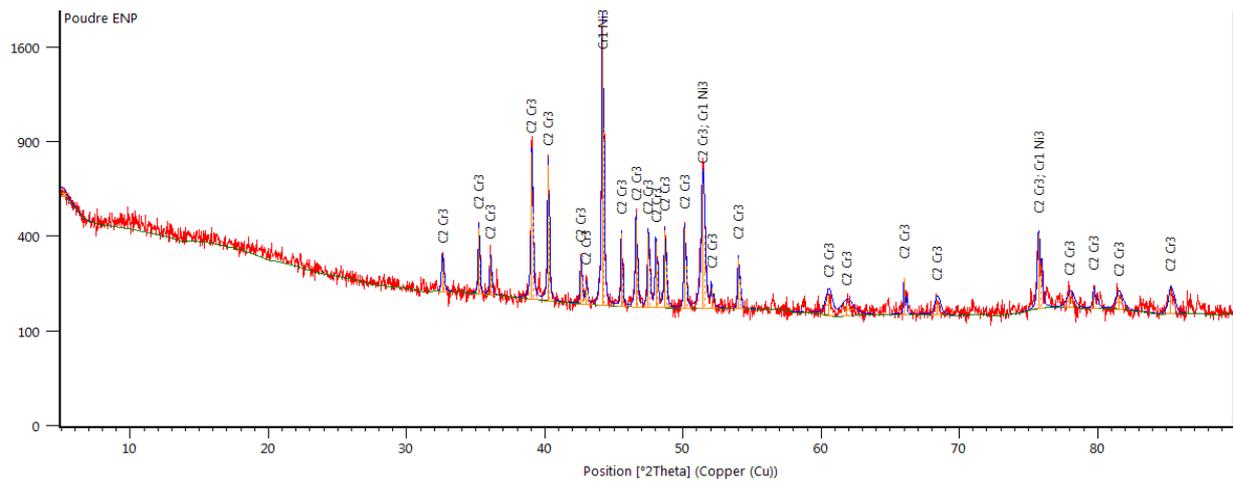


Figure 4-2: Diffractogramme RX de la poudre Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr utilisée dans l'étude.

Le diffractogramme de la figure II.6 révèle la présence prédominante de la phase Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, de structure orthorhombique, et par la présence d'une autre phase dont les trois raies correspondent bien aux diffractions des plans (111), (002) et (022) caractéristiques de CrNi<sub>3</sub> de structure cubique à face centrées avec un paramètre de maille a = 3.5400Å.

Nous avons attribué à chaque échantillon une désignation alphanumérique notées avec les proportions d'éléments en présence (Tableau II.3).

Tableau 4-3: Nomenclature des échantillons à étudier

Echantillons	Désignation	Proportion (W%)		
		MB1	MB2	P1

1	E1	99,5	-	0.5
2	E2	99	-	1
3	E3	97	-	3
4	E4	95	-	5
5	E5	-	99,5	0.5
6	E6	-	99	1
7	E7	-	97	3
8	E8	-	95	5

#### 4.2.2 Etapes d'élaboration :

##### ○ Préparation des poudres :

La poudre nano  $\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{NiCr}$  a été élaborée par la mécanosynthèse, Grâce à l'énergie mécanique apportée, cette méthode est utilisée dans le but de réduction de la taille des particules, et/ou modification de leurs morphologies. Pour la synthèse, nous avons utilisé un broyeur planétaire de type RETCH PM400 (modèle Pulvérisette 7), équipé d'un plateau tournant mené de quatre jarres contenant les billes et la poudre. Les jarres sont fixées au plateau tournant d'une vitesse pouvant atteindre la valeur  $\Omega_{\text{max}} = 380 \text{ tr/min}$ . Les jarres sont-elles même animées d'un mouvement de rotation, dont le sens est contraire à celui du plateau. La vitesse de rotation  $\omega$  des jarres est corrélée à celle du plateau par la relation  $\omega = -1,25 \Omega$ .

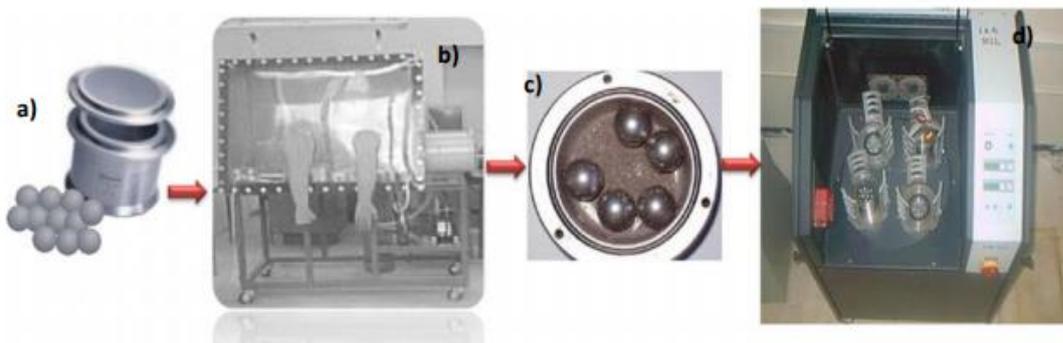


Figure 4-3: a) jarre et billes avant élaboration ; b) boîte à gants ; c) jarre et billes utilisés pour la mécanosynthèse de la poudre  $\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{NiCr}$  ; d) broyeur planétaire de marque commerciale Retsch PM400.

La poudre à broyer est placée avec des billes dans une jarre de volume donné. La jarre est ensuite fixée sur un plateau. Le plateau et la jarre tournent en sens inverse. La force résultante de ces 2 rotations, force centrifuge ou centripète, agit sur les billes et la poudre. Dans le cas où la force résultante est centrifuge les billes restent collées sur la paroi de la jarre, la poudre est alors soumise à des frictions entre les billes et la paroi, ce qui tend à souder les grains de poudre (Figure). Si la force

résultante est centripète, les billes traversent diagonalement la jarre, et dans ce cas, la poudre a une tendance à se fracturer sous l'effet des collisions billes-billes et billes-paroi opposée. L'énergie résultante du broyage dépend de plusieurs paramètres tels que la vitesse de rotation, le temps de broyage, le rapport de masse billes/poudre, le volume du remplissage de la jarre, la taille des billes et la nature des billes.

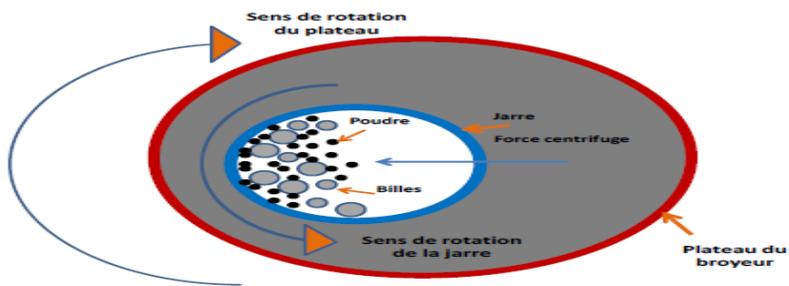


Figure 4-4: Schéma du principe de fonctionnement du broyage planétaire.

Le travail était réalisé au sein du Laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux (LSGM) à l'Université des Sciences et la Technologie Houari Boumediène (USTHB), les paramètres de broyage sont :

- L'atmosphère de broyage (Argon) afin de réduire la contamination de la poudre.
- La matière des jarres et des billes utilisées est l'acier inoxydable
- Le diamètre des billes 10 mm.
- La vitesse de rotation du plateau était fixée à 200 tours par minute (tr/min).
- o **Mélange des poudres :**

La distribution d'une phase par rapport à l'autre est très importante, pour assurer une bonne homogénéité de l'échantillon avant frittage. Un échantillon qui était mieux mélangé offrira une meilleure configuration initiale du frittage.

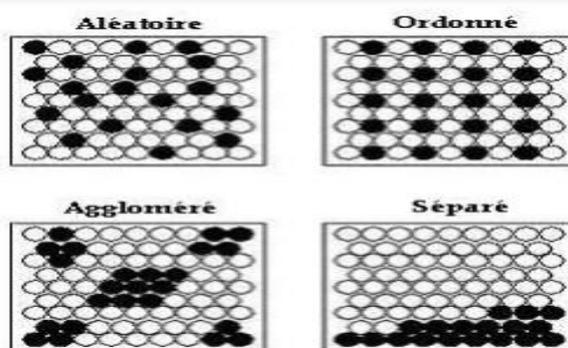


Figure 4-5: Distribution des phases dans un mélange de poudres. .

(Le cas ordonné est très improbable dans la réalité), l'arrangement aléatoire est plus convenable.

Le mélange des deux poudres se fait à l'aide du broyeur planétaire de type RETCH PM400 (modèle Pulvérisette 7), au sein du Laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux (LSGM) à l'Université des Sciences et la Technologie Houari Boumediène (USTHB).

Les deux poudres sont mises dans les jarres sans billes, la quantité des poudres à utiliser est calculée à l'aide de fraction volumique 0.5, 1,3 et 5%. La jarre est ensuite fixée sur un plateau. Le plateau et la jarre tournent en sens inverse d'une vitesse bien déterminée afin d'assurer une bonne homogénéité. La poudre peut être mélangée à sec ou dans un milieu liquide.

○ **Mise en forme des poudres :**

Avant le frittage la mise en forme se fait par une compression sous contrainte (force axiale). Cette étape assure le moulage de la poudre contre les parois verticales de l'outil de compression.

Les étapes se résume en : remplissage par la poudre, fermeture de l'outil, application de la force axiale, décharge et finalement l'injection de l'échantillon comprimé.

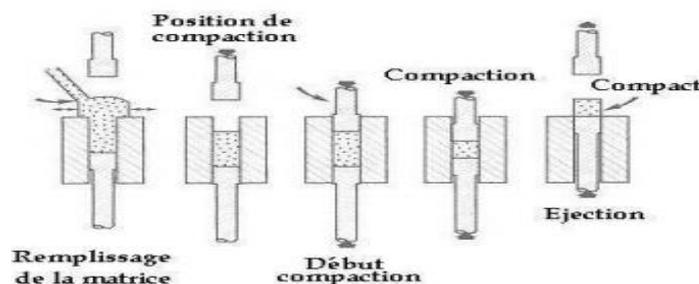


Figure 4-6: Cycle de compaction de poudres.

○ **Frittage en phase liquide :**

Le frittage permet la génération de liaisons fortes entre les particules du mélange, généralement le frittage est accompagné par retrait.

Le cycle de frittage contient une période à la température de frittage, ensuite une période isotherme et finalement un refroidissement. La vitesse de chauffage et refroidissement doivent être contrôlées pour éviter les fissurations surtout pour les céramiques. La partie isotherme permet la croissance des liaisons interparticulaires.

Cette étape de frittage en phase liquide se déroule au sein de laboratoire de métallurgie au niveau de (IAESB), à l'aide d'un four qui fournit une température qui dépasse 1000°C.

Mettre l'échantillon déjà mise en forme dans un creusé, il est ensuite préchauffé à une température qui atteint 750°C. La phase liquide est celle d'aluminium qui a une température de fusion la plus basse. Quand l'aluminium se fond des ajouts de Mg sont ajoutés dans la masse fondue pour augmenter sa mouillabilité afin de faciliter le coulage dans le moule.

Le mélange métal liquide-poudre est agité pendant 10 minutes à une vitesse de rotation de 500 tr/min pour garantir une bonne distribution.

Avant coulage, le moule qui est à base de graphite, de fonte ou d'alumine est préchauffé à 650°C. Après coulage de la masse fondue, elle se laisse pour se solidifier et on passe à l'étape de caractérisation.

#### 4.2.3 Préparation métallographique des échantillons :

La préparation de l'échantillon, pour les caractérisations de la microstructure et l'étude des propriétés mécaniques, est une démarche importante car les résultats obtenus dépendent fortement de la qualité de l'échantillon. Dans cette section, sont présentés les appareils et les démarches à suivre pour la préparation des échantillons.

Après retrait des consolidés du moule, la préparation des échantillons, en vue de l'analyse microstructurale, se déroule de la manière suivante :

**1<sup>ère</sup> phase** : meulage des échantillons afin d'enlever l'excès de liant et d'obtenir une rugosité de la surface admissible pour un polissage ultérieur.

**2<sup>ème</sup> phase** : polissage mécanique sous eau et sur papier abrasif de granulométrie décroissante jusqu'au grade 1200 (polisseuse manuelle).

**3<sup>ème</sup> phase** : polissage de finition réalisé par une patte diamantée de 9, 3 et 1  $\mu\text{m}$  sur un drap en feutre.

- **Attaque chimique**

La révélation de la microstructure est réalisée à l'aide d'une attaque chimique qui met en évidence des différentes phases du composite étudié, pour cela les échantillons sont attaqués au réactif KELLER dont la composition est :

1ml HF (48%)

1.5ml HCl (acide chlorhydrique)

2.5ml HNO<sub>3</sub> (acide Nitrique)

100ml H<sub>2</sub>O

L'attaque est menée durant une quarantaine de secondes. Un nettoyage des échantillons dans un bac à ultrasons puis un rinçage à l'éthanol est toujours appliqué avant et après attaque chimique avant observation au MO ou MEB.

### 4.3 Outils et techniques de caractérisation structurale :

Cette partie, dédiée aux techniques de caractérisation, a pour but de décrire tous les outils et les méthodes utilisés pour la caractérisation des microstructures (à l'échelle locale) ainsi que les propriétés mécaniques (à l'échelle macroscopique) des matériaux. Cette approche expérimentale, qui consiste à étudier les modifications qui apparaissent dans la microstructure de nos échantillons, est susceptible de nous fournir des indications fiables pour l'interprétation et la compréhension du comportement mécanique de ces derniers.

Pour ce faire, nous avons fait appel pour l'étude des microstructures des échantillons élaborés, à plusieurs techniques de microscopies.

#### 4.3.1 Microscopie optique et microscopie à balayage :

La microscopie électronique à balayage (MEB) permet d'obtenir des micrographies de surface des échantillons analysés. Pour les faibles grossissements (jusqu'à 1000), les observations métallographiques sont effectuées sur un microscope métallographique Nikon EPIPHOT 300 équipé d'une caméra. Pour les observations à des grossissements inférieurs à 2000 fois, nous avons utilisé la microscopie électronique à balayage (MEB) qui est une technique de microscopie basée sur le principe des interactions électrons-matière. Un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules (Figure II.1-a). Différents détecteurs permettent d'analyser ces particules et de reconstruire une image de la surface de l'échantillon.

Pour se faire, deux microscopes électroniques à balayage JEOL JSM 6830 (Figure II.1-b) et JEOL JSM 6060, couplés à la Spectrométrie à Energie Dispersive (EDS), disponible respectivement au Laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux (LSGM) de l'USTHB et à l'université de Complutense de Madrid (UCM), ont été utilisés.

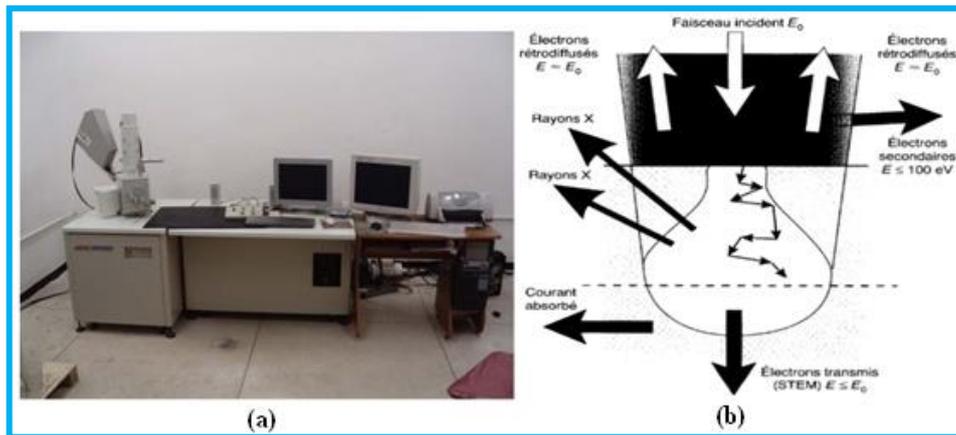


Figure 4-7:(a) Microscope électronique à balayage JEOL JSM 6830 ; (b) Interactions électron-matière utilisables en microscopie électronique [COR98].

la MEB a été utilisée dans le but de :

- Caractériser la morphologie de la poudre de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr avant et après broyage, ainsi que la microstructure des éprouvettes fabriquées après le frittage (détecteur SE).
- Evaluer les différentes phases générées après le frittage (détecteur BSE).

La spectroscopie à rayons X (EDS), couplée à la microscopie électronique permet une analyse de la composition chimique. Suite à l'interaction électrons- matière les rayons X émis ont des énergies qui sont caractéristique des éléments présents dans la poire d'interaction (voisin de 1  $\mu$ m). Cette permet de réaliser soit des analyses ponctuelles ou des cartographies de distribution des éléments chimiques.

Dans notre étude, cette technique a été utilisée pour évaluer la composition chimique de phases présentes dans la poudre broyée et les pièces fabriquées par frittage.

#### 4.3.2 Diffraction des rayons X :

La diffraction des rayons X (DRX) a été utilisée dans le but d'accéder à des informations qualitatives et quantitatives sur les différentes phases étudiées, la structure cristalline ainsi que l'évaluation des paramètres de maille. Cette technique a permis :

- L'identification des phases cristallines au sein du matériau avant et après frittage à l'aide des positions des pics ( $\theta$ ).
- L'analyse de la texturation et de l'orientation des cristaux à travers le rapport des intensités des pics.
- Le calcul de la taille des cristallites par les méthodes de Scherrer et de Williamson-Hall en se basant sur les largeurs des pics.

- Le calcul du taux de micro-contraintes par la méthode de Williamson-Hall.

Les diffractogrammes RX ont été enregistrés à l'aide de deux diffractomètres PANalytical PRO et PANalytical, équipés d'une anticathode de cuivre ( $\lambda_{K\alpha} = 1.541874 \text{ \AA}$ ) excitée sous une tension de 40 kV et une intensité de 30 mA (Figure II.2) disponibles respectivement au Laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux (LSGM) de l'USTHB et à l'université de Complutense de Madrid (UCM). La plage angulaire explorée se situe entre  $30^\circ$  et  $120^\circ$ , ce qui permet d'avoir accès aux cinq premiers pics. Le pas angulaire des diffractogrammes est de  $0,01^\circ$ , avec un temps de comptage de 10 s. L'appareil est piloté par le logiciel X'Pert HighScore.

L'identification des phases en présence a été réalisée sur le logiciel X'Pert HighScore Plus contenant une base de données de fiches ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) qui contient 140092 fiches (année 2011), ainsi que la fiche PDF2 (Powder Diffraction File) de l'ICDD (International Centre for Diffraction Data) qui répertorie 163835 fiches (année 2004). Le programme se base sur la superposition des diffractogrammes modèles figurant dans la base de données avec le diffractogrammes obtenus, en choisissant les candidats qui présentent le score le plus élevé.

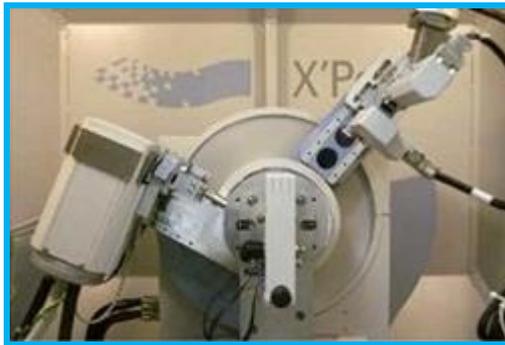


Figure 4-8: Goniomètre vertical, montage Bragg-Brentano.

#### 4.4 Caractérisation mécanique

Les valeurs caractéristiques obtenues par les méthodes d'essai mécanique sont utilisées dans le développement des matériaux, la conception des composants, ainsi que dans l'application de l'assurance qualité. Afin de caractériser aussi précisément que possible les propriétés des matériaux, on dispose d'une série de méthodes d'essai normalisées.

Les éprouvettes adoptent deux géométries : cylindrique ou plate. La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter des concentrations de contrainte excessives. Dans le cas des éprouvettes plates, le

centrage de l'éprouvette peut devenir problématique si des trous calibrés ne sont pas percés dans les têtes.

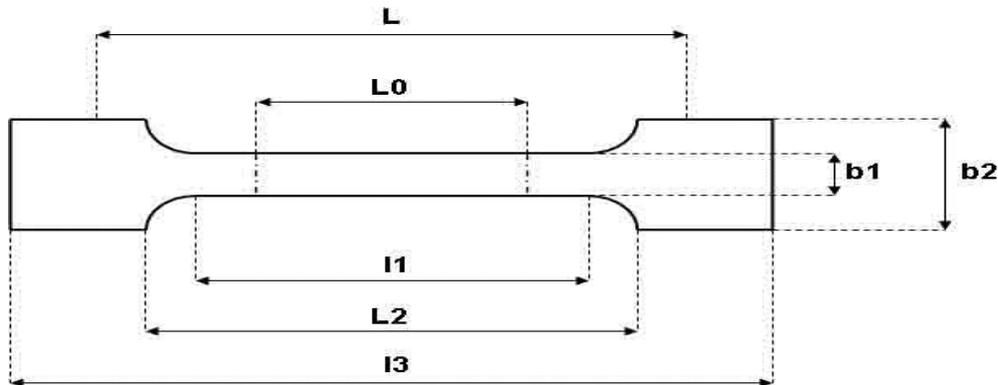


Figure 4-9: une éprouvette plate.

- $L_0$  = Longueur de référence
- $L$  = Ecartement entre outillages
- $l_1$  = Longueur de la partie calibrée étroite
- $L_2$  = Ecartement entre les parties parallèles larges
- $l_3$  = Longueur totale
- $b_2$  = Largeur dans la zone d'épaulement
- $b_1$  = Largeur dans la zone de la longueur de référence
- $h$  = épaisseur de l'éprouvette

Nous avons tenu à respecter les normes relatives à l'exécution des essais mécaniques. Cependant, certains essais mécaniques normalisés utilisés dans notre étude, ne sont pas significatifs pour les métaux durs.

Les caractéristiques obtenues serviront à comparer les différentes nuances de composite.

La caractérisation mécanique des échantillons élaborés est basée essentiellement sur des indentations localisées (ponctuelles) et des profils linéaires d'indentation de microdureté.

#### 4.4.1 Essai de traction :

Le type d'éprouvette choisi : Une éprouvette plate de longueur 250mm, une largeur de 25mm et une épaisseur de 2,1mm.



Figure 4-10: le moule en graphite.

Cet essai a été réalisé au sein du laboratoire des sciences et génie des matériaux (USTHB), à l'aide d'une machine de traction hydraulique d'une capacité de 1000KN et commandée par ordinateur, les essais fait avec une vitesse de déformation de 2mm/min à la température ambiante. Les éprouvettes ont été conçues à partir d'un moule pour obtenir des éprouvettes de traction plates normalisées selon la norme ASTM E 8-04 NF.

Les principales caractéristiques mesurées à partir de ces essais sont :

La limite élastique, la résistance à la traction, et l'allongement. Trois essais sont effectués pour chaque échantillon.

#### 4.4.2 Essai de flexion à trois points :

La flexion est une combinaison de sollicitations de traction de compression et parfois même de cisaillement. Le type d'éprouvette est une poutre ou barreau prismatique de section rectangulaire ou carrée reposant sur deux appuis et supportant une charge qui devrait donner une distribution linéaire. L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance des appuis. On impose à une éprouvette normalisée une déformation, ou flèche, à vitesse de déformation constante, et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.

Une machine de flexion est constituée d'un bâti rigide qui comprend une traverse fixe à laquelle est fixée la base du montage de flexion sur laquelle repose l'éprouvette. La panne du complément du montage qui va appuyer sur l'éprouvette est fixée à une traverse mobile.

Les observations expérimentales de l'essai de flexion comportent habituellement les charges et les flèches ou les déformations mesurées à l'aide d'un dispositif analogue, ou d'une façon plus commandée à l'aide d'un extensomètre qui permet de détecter les écarts sue linéarité de la relation moment-déformation et de donner une bonne indication de la limite de proportionnalité.

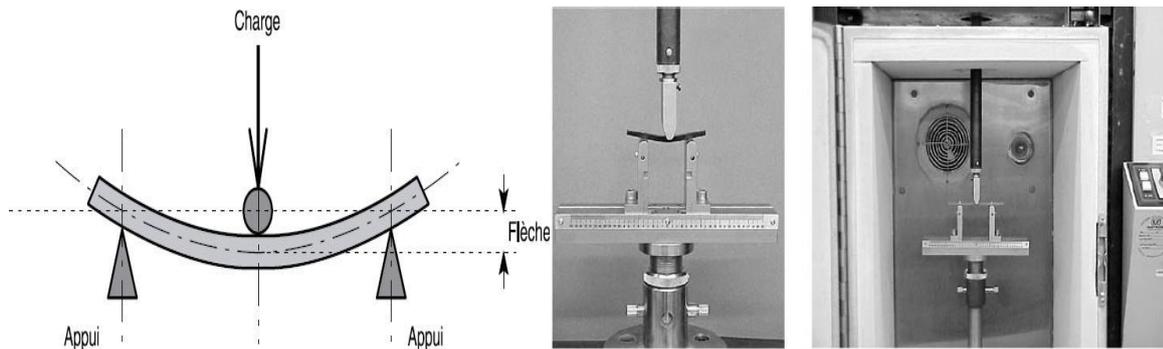


Figure 4-11: la machine de flexion à trois points.

#### 4.4.3 Microdureté :

La technique d'indentation consiste à exercer un effort par l'intermédiaire d'un poinçon sur la surface du matériau à étudier. Pour une force donnée, plus le poinçon s'enfonce dans le matériau, plus il est mou et plus sa limite d'élasticité est basse. La dureté correspond au rapport de la force appliquée et de l'aire projetée de l'indentation. Les deux tests les plus utilisés sont la détermination de la dureté Vickers (cône, sphère, pyramide) et de la dureté Brinell (indenteur sphérique).

La microdureté HV0.1 est effectuée à l'aide d'un microduromètre digital de type Shimizu HMV-2 (figure II.4) disponible au niveau du laboratoire LSGM de l'USTHB, avec une charge de 100g et un temps d'application de 10s.



Figure 4-12: Microduromètre digital Shimadzu HMV-2.

#### 4.5 Conclusions :

Dans ce qui précède, nous avons montré les étapes prévues à faire pour élaborer ainsi caractériser un nanocomposite. Cette caractérisation avait en plus comme but la validation d'un

programme de calcul qui détermine les propriétés d'un nanocomposite en fournissant les caractéristiques des matériaux de base.

Afin de sauver ce qui reste de notre recherche, nous avons opté à faire un programme de calcul d'une plaque FGM en se basant sur la théorie des stratifiés.

Contrairement aux matériaux nanocomposites qui ont pour but l'amélioration des propriétés d'une matrice en la renforçant, un matériau FGM sert à l'association des propriétés des deux matériaux, pour obtenir un matériau multifonctionnel, qui fournit deux propriétés contradictoires tel qu'avoir une conductivité et isolation thermique, profiter des propriétés de céramique (côté haute température) et des métaux (côté basse température).

Parmi les techniques d'élaboration d'un matériau FGM, compaction sèche des poudres, projections plasma, frittage et infiltration...

**Chapitre V :**  
**La modélisation d'une plaque FGM**

## 5 Chapitre V : la modélisation d'une plaque FGM

### 5.1 Introduction :

Un matériau FGM est un type de matériaux composites classé par sa microstructure variable dans l'espace, conçu pour optimiser l'exécution des éléments de la structure par la distribution des propriétés correspondantes.

Pour pouvoir étudier un comportement, que soit statique ou dynamique des structures ayant comme éléments structuraux des poutres, des plaques ou des coques en FGM dans le domaine élastique, il est nécessaire de bien choisir la théorie adéquate qui peut décrire correctement leurs comportements vis-à-vis des charges mécanique, thermique on pourra ainsi résoudre les différents problèmes de structures. En général, le comportement des matériaux fonctionnellement gradués (FGM) peut être prédit en utilisant l'une des théories d'élasticité tridimensionnelle (3-D) ou d'autres théories de plaques monocouches « Equivalent single layer theory (ESL) ». Ces théories d'ESL tiennent en compte à la fois du cisaillement et des effets de déformation normale selon le niveau d'hypothèses. (27)

### 5.2 Les lois régissant la variation des propriétés matérielles des plaques FGM :

Les matériaux à gradient fonctionnel « FGM » consistent en l'association de deux ou plusieurs matériaux aux propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux de manière à optimiser les performances de la structure qu'ils constituent. Les caractéristiques les plus distinctes des matériaux FGM sont leurs microstructures non uniformes avec des macro-propriétés graduées dans l'espace. (28)

Un des paramètres clé à déterminer lors de la fabrication de ces matériaux est la composition multiphase à travers l'épaisseur. La dépendance des propriétés de la position se traduit par la prise en compte de la loi des mélanges correspondant au modèle de Voigt.

$$P = \sum_{i=1}^n P_i V_i$$

$P_i$  et  $V_i$  sont respectivement la propriété mécanique et la fraction volumique du constituant  $i$ , avec :  $\sum_{i=1}^n V_i = 1$

Un FGM peut être définie par la variation des fractions de volume. La plupart des chercheurs emploient la fonction de puissance, la fonction exponentielle, ou la fonction sigmoïde pour décrire

les fractions de volume. Les liaisons entre les particules doivent être assez dures à l'intérieur pour résister à la rupture, et également assez dures à l'extérieur pour empêcher l'usure.

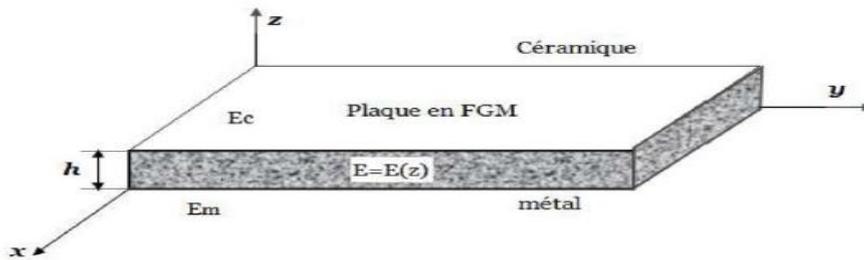


Figure 5-1: Géométrie d'une plaque FGM. (28)

Les coordonnées x et y définissent le plan de la plaque, tandis que l'axe z est perpendiculaire à la surface moyenne de la plaque et dans la direction de l'épaisseur. Les propriétés du matériau dont le module de Young et le coefficient de Poisson sur les faces supérieures et inférieures sont différentes. Ils varient de façon continue, suivant l'épaisseur (l'axe z) soit :  $E = E(z)$  et  $\nu = \nu(z)$

### 5.3 Propriétés matérielles de la plaque P-FGM :

La fraction volumique de la classe P-FGM obéit à une fonction en loi de puissance comme suit :

$$v(z) = \left(\frac{z+h/2}{h}\right)^k \text{ OÙ } k \text{ est un paramètre matériels et } h \text{ est l'épaisseur de la plaque.}$$

Une fois la fraction volumique locale  $V(z)$  a été définie, les propriétés matérielles d'une plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges :  $E_z = E_m + E_c - E_m(z)$  (29)

Où  $E_m$  et  $E_c$  sont respectivement les modules de Young de la surface inférieure ( $z = -h/2$ ) et de la surface supérieure ( $z = +h/2$ ) de la plaque FGM.

La variation du module de Young dans la direction d'épaisseur de la plaque P-FGM est représentée sur la figure. Il apparait clairement que la fraction volumique change rapidement près de surface inférieure pour  $k < 1$ , et augmenté rapidement près de la surface supérieure pour  $k > 1$ .

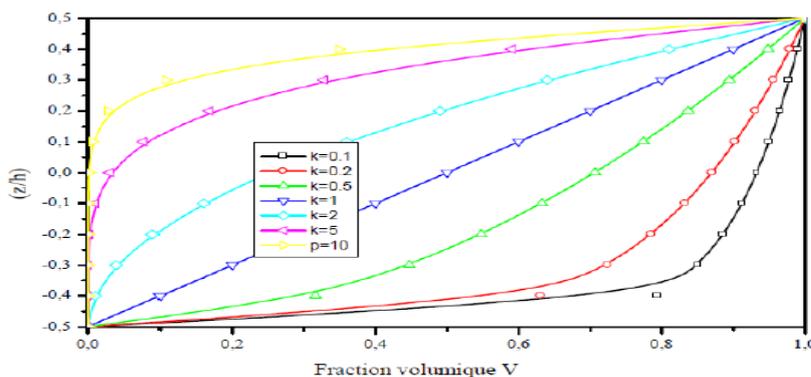


Figure 5-2 Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM. (29)

### 5.3.1 Propriétés matérielles de la plaque S-FGM :

Chung et chi ont défini la fraction de volume de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Les deux fonctions de loi de puissance sont définis par :

$$V_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{h+z}{\frac{h}{2}} \right)^k \quad \text{pour } -\frac{h}{2} \leq z \leq 0 \quad ; \quad V_2 = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{h+z}{\frac{h}{2}} \right)^k \quad \text{pour } 0 \leq z \leq +\frac{h}{2}$$

En utilisant la loi des mélanges, le module de Young de la plaque S-FGM peut être calculé par :

$$E(z) = V_1(z) E_1 + [1-V_1(z)] E_2 \quad \text{pour } -\frac{h}{2} \leq z \leq 0 \quad (a)$$

$$E(z) = V_2(z) E_1 + [1-V_2(z)] E_2 \quad \text{pour } 0 \leq z \leq +\frac{h}{2} \quad (b)$$

La figure montre que la variation de la fraction volumique définie par les équations (a) et

(b) représente les distributions sigmoïdes, et cette plaque FGM est appelée (Plaque S-FGM) (30).

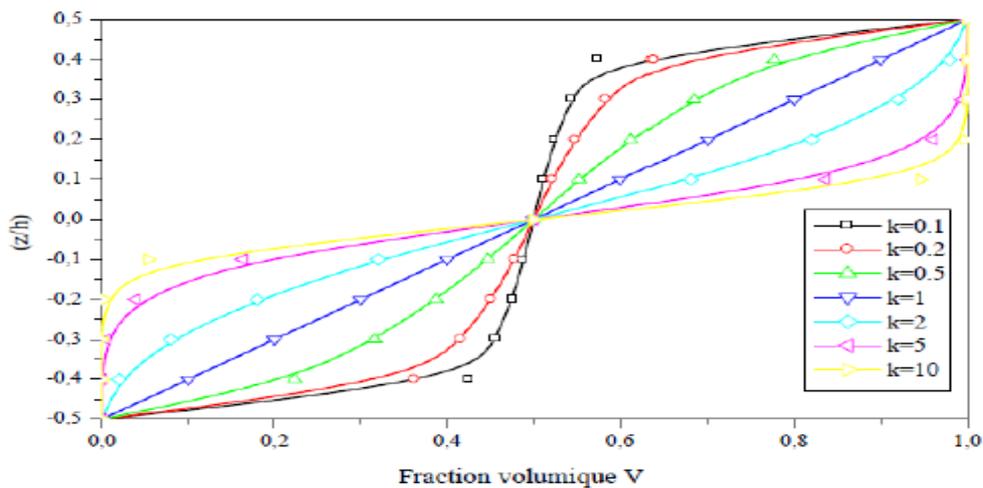


Figure 5-3 : Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM. (30)

### 5.3.2 Propriétés matérielles de la poutre E-FGM :

Pour décrire les propriétés matérielles des matériaux FGM, la plupart des chercheurs utilisent la fonction exponentielle qui s'écrit sous la forme : (31)

$$E(z) = E_2 e^{B(z+\frac{h}{2})} \quad (a) \quad ; \quad B = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \quad (b)$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la plaque E-FGM est représentée sur la figure :

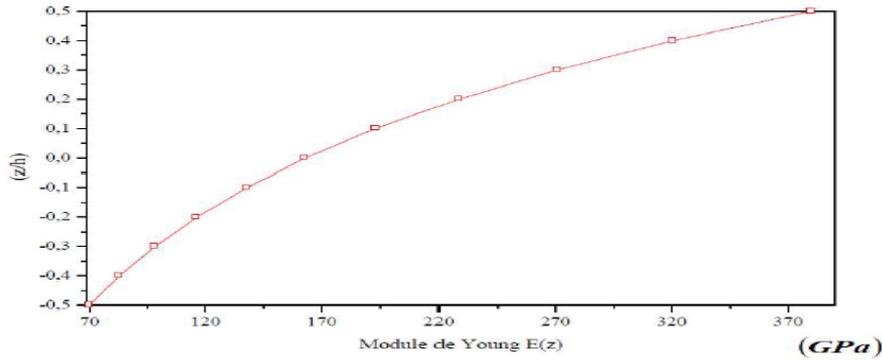


Figure 5-4: Variation de Module de Young de la plaque E-FG. (31)

### 5.3.3 D'autres propriétés matérielles des plaques FGMs :

Les lois de mélange P-FGM, S-FGM et E-FGM sont pratiques et simples à utiliser mais elles ne permettent pas de connaître la taille, la forme et la distribution des particules au niveau de la microstructure. Plusieurs autres modèles permettant d'évaluer les propriétés globales de la structure existent.

Le modèle le plus utilisé est basé sur le schéma de Mori et Tanaka [16], ce modèle tient compte de l'interaction des champs élastiques des inclusions voisines. Pour une distribution aléatoire de particules isotropes (indice 2) dans une matrice isotrope (indice 1) Les propriétés s'écrivent alors comme suit :

$$\frac{K - K_1}{K_2 - K_1} = \frac{V_2}{1 + V_1(K_2 - K_1)/(K_1 + \frac{4}{3}G_1)} \quad (1)$$

$$\frac{G - G_1}{G_2 - G_1} = \frac{V_2}{1 + V_1(G_2 - G_1)/(G_1 + f_1)} \quad (2)$$

$$f_1 = \frac{G_1(9K_1 + 8G_1)}{6(K_1 + 2G_1)} \quad (3)$$

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (4)$$

Avec :

K : Module de compressibilité ;

V : Fraction volumique ;

G : Module de cisaillement ;

E : Module de Young.

Il est bien connu que le modèle de Mori-Tanaka conduit à une estimation précise des propriétés mécaniques lorsque la continuité de la matrice et la discontinuité des inclusions sont bien définies.

#### 5.4 Théories de déformations des plaques FGM :

Afin de résoudre les problèmes des structures ayant comme éléments structuraux des poutres et des plaques FGM dans le domaine élastique, il est nécessaire de choisir la bonne théorie dérivant correctement le comportement statique et dynamique de la structure ainsi que la méthode de résolution à appliquer. C'est en 1888 que Love utilisa les hypothèses de Gustav Kirchhoff, elles-mêmes inspirées des hypothèses d'Euler-Bernoulli pour fonder une théorie des plaques minces (également appelée théorie classique ou théorie de Kirchhoff Love). La théorie des plaques semi-épaisses (théorie des déformations du premier ordre) a été consolidée par Mindlin à partir des travaux de Rayleigh (1877), Timoshenko (1921), Reissner (1945) et Uflyand (1948). Ensuite, des théories d'ordre supérieur sont venues améliorer les hypothèses des théories classiques et du premier ordre lorsque l'épaisseur de la plaque devient importante. Il existe aussi la théorie basée sur l'élasticité tridimensionnelle (théorie 3-D) qui ne fait aucune hypothèse restrictive sur les déplacements de la plaque. Les différentes théories existantes peuvent donc être classées en quatre principales catégories : théorie classique des plaques minces (appelée aussi théorie de Kirchhoff-Love), théorie des plaques semi-épaisses du premier ordre (appelée aussi théorie de Mindlin-Reissner), théories d'ordre supérieur applicables aux plaques épaisses (comme celle de Reddy) et la théorie sur l'élasticité tridimensionnelle (théorie 3-D).

##### 5.4.1 Théorie du premier ordre des plaques moyennement épaisses (FSDPT) :

Lorsque l'épaisseur de la plaque ne permet plus de vérifier les hypothèses de Kirchhoff quant à leur mouvement de flexion, une théorie plus complète basée sur celle des poutres de Timoshenko est nécessaire (Rayleigh). En 1877, Rayleigh a affirmé qu'il est important d'inclure les inerties de rotation dans toute analyse vibratoire des systèmes. Quarante ans plus tard, les travaux de Timoshenko, montrent que la prise en compte des effets de l'inertie de rotation et du cisaillement transverse affecte les fréquences propres de flexion des poutres. Ces deux effets tendent à diminuer les fréquences de résonance calculées, en raison de la croissance de l'inertie et de la flexibilité du système. Une extension à la théorie des plaques quant au cisaillement transverse est proposée par Reissner en 1945 dans le cas statique. Une première théorie pour le cas dynamique, incluant les effets du cisaillement et de l'inertie de rotation est proposée par Uflyand en 1948. C'est cependant l'article de Mindlin, publié trois ans plus tard qui fera date. Vers 1970, Whitney, Whitney et Sun, Pagano et Srinivas et Rao ont montré, grâce à leurs travaux respectifs, que les effets du cisaillement sont plus importants pour les plaques stratifiées que pour les plaques isotropes.

Contrairement à la théorie des plaques minces, la théorie de Mindlin suppose que les sections droites, initialement normales au plan neutre, restent planes et non nécessairement normales à celui-ci après déformation. D'autres variantes de la théorie supposent que ces sections ne restent ni droites, ni normales après déformation. Dans la littérature, trois approches d'approximation pour les plaques épaisses sont répertoriées (Mindlin, Reissner, Narasimhamurthy, Schmidt, Levinson, Ambartsumyan). L'approche de Reissner suppose un champ de déplacement mixte contenant les contraintes normales dans le plan et les contraintes de cisaillement. L'approche de Henchy-Mindlin suppose un champ de déplacement alors que l'approche d'Ambartsumyan suppose un champ de contraintes normales et de cisaillement. Etant donné que la théorie des plaques du premier ordre (FSDPT) ne satisfait pas les conditions aux limites au niveau des surfaces supérieure et inférieure de la plaque (contraintes de traction non nulles), un facteur de correction en cisaillement à travers l'épaisseur est nécessaire. La valeur de ce facteur de correction dépend de la géométrie de la plaque, de la variation du coefficient de poisson à travers l'épaisseur, du chargement appliqué et des conditions aux limites imposées.

La théorie des déformations du premier ordre des plaques moyennement épaisses (FSDT) décrite par Mindlin est une forme développée de la théorie classique de Kirchhoff, les deux théories représentent le même champ de déplacements linéaire en fonction de l'épaisseur, en plus, les deux théories nécessitent l'introduction d'un facteur de correction pour rectifier les déformations en cisaillement. Cependant, la différence réside dans les hypothèses de base. La théorie de Mindlin prend en considération les déformations en cisaillement transversal qui sont responsables des rotations autour des axes du plan, ce qui n'est pas le cas de la théorie de Kirchhoff. Par conséquent la théorie de Mindlin peut être utilisée pour les plaques moyennement épaisses et non pas celle de Kirchhoff. L'expression des déplacements suit une fonction linéaire qui dépend de l'épaisseur et s'exprime par les relations suivantes :

$$\bar{U}(x, y, z, t) = U(x, y, t) + z \cdot \psi_x(x, y, t)$$

$$\bar{V}(x, y, z, t) = V(x, y, t) + z \cdot \psi_y(x, y, t)$$

$$\bar{W}(x, y, z, t) = W(x, y, t)$$

- $U, V$  et  $W$  sont les déplacements dans les directions  $x, y$  et  $z$  ;
- $\omega_x$  et  $\omega_y$  sont des rotations des normales de la surface neutre par rapport à  $x, y$  ;
- $z$  est la cote (position le long de l'épaisseur de la plaque).

Les déplacements représentent les déplacements du plan moyen de la plaque et sont les rotations de la normale au plan moyen par rapport aux axes respectivement, représentent les déplacements à tout point de la plaque à un instant t. (32)

#### 5.4.1.1 Formulation théorique :

Considérons une plaque en FGM, ayant les dimensions représentées en figure (3.7), qui est composée de N couches élastiques orthotropes, de longueur « a », la largeur « b », et d'épaisseur uniforme totale « h ».

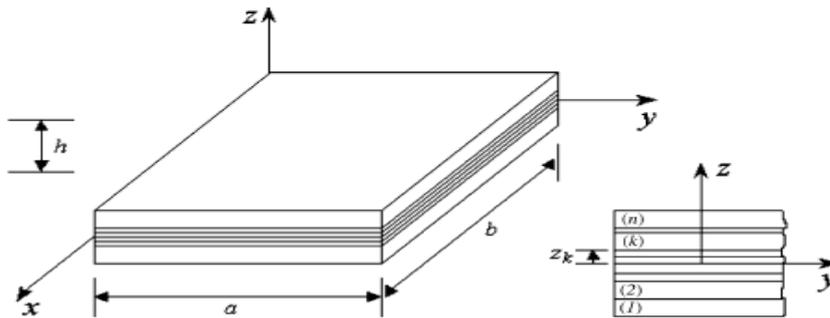


Figure 5-5: Description de la plaque FGM

Le système de coordonnées (x, y, z), est choisi et placé au milieu de la plaque.

#### 1. Détermination du champ des déformations :

La déformation est la variation relative de la longueur d'un solide lorsque ce dernier est soumis à une action extérieure. Dans le cas général, les relations déformations-déplacements (de Green Lagrange) sont données par (Reddy) :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{dU_i}{dx_j} + \frac{dU_j}{dx_i} + \frac{d^2U_k}{dx_i dx_j} \right) \quad (5)$$

Dans le cadre d'une théorie linéarisée (petites déformations), la relation se réduit (en négligeant les termes du 2<sup>ème</sup> degré) à :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

Et sous forme explicite, l'équation devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial x} + z \cdot \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial y} + z \cdot \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \gamma_{xz} = 2 \cdot \varepsilon_{xz} = \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} = \psi_x + \frac{\partial W}{\partial x} \\ \gamma_{yz} = 2 \cdot \varepsilon_{yz} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial y} = \psi_y + \frac{\partial W}{\partial y} \\ \gamma_{xy} = 2 \cdot \varepsilon_{xy} = \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} + z \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \right) \end{array} \right. \quad (7)$$

L'écriture des déformations sous forme condensée donne :

$$\{\varepsilon\} = \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_m \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} z \cdot \varepsilon_f \\ \varepsilon_c \end{array} \right\} \quad (8)$$

Avec :  $\varepsilon_m$  les déformations en membrane,  $\varepsilon_f$  les déformations en flexion et  $\varepsilon_c$  les déformations en cisaillement.

$$\{\varepsilon_m\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \\ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \end{array} \right\}, \{\varepsilon_f\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \end{array} \right\}, \{\varepsilon_c\} = \left\{ \begin{array}{l} \psi_x + \frac{\partial W}{\partial x} \\ \psi_y + \frac{\partial W}{\partial y} \end{array} \right\} \quad (9)$$

## 2. Détermination du champ des contraintes :

Les différentes contraintes agissant sur un point matériel sont représentées sur la figure (3.9) suivante :

$$\sigma_x = Q_{11} \cdot \varepsilon_x + Q_{12} \cdot \varepsilon_y ; \quad \sigma_y = Q_{12} \cdot \varepsilon_x + Q_{22} \cdot \varepsilon_y ; \quad \sigma_z = Q_{13} \cdot \varepsilon_x + Q_{23} \cdot \varepsilon_y$$

$$\sigma_{xz} = Q_{55} \cdot \gamma_{xz} ; \quad \sigma_{yz} = Q_{44} \cdot \gamma_{yz} ; \quad \sigma_{xy} = Q_{66} \cdot \gamma_{xy}$$

Où :  $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz})$ ,  $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz})$  sont les éléments de contraintes et de déformations, respectivement. En utilisant les propriétés matérielles définies dans les équations 2 et 3, les coefficients de rigidité  $Q_{ij}$  peuvent être écrits de la manière suivante :

$$Q_{11} = Q_{22} = \frac{E(z)}{1-\nu^2(z)} ; \quad Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu(z) \cdot E(z)}{1-\nu^2(z)} ; \quad Q_{44} = Q_{55} = Q_{66} = G(z) = \frac{E(z)}{2(1+\nu(z))} \quad (10)$$

Ces coefficients sont dépendants des propriétés telle que le module de Young, du module de cisaillement  $G(z)$ , du coefficient de poisson en un point  $(z)$  de la plaque.

En développant, on obtient :

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= Q_{11} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \right) + Q_{12} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + z \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \right) \\
 \sigma_y &= Q_{21} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \right) + Q_{22} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + z \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \right) \\
 \sigma_{yz} &= Q_{44} \left( \psi_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\
 \sigma_{xz} &= Q_{55} \left( \psi_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\
 \sigma_{xy} &= Q_{66} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + z \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{11}$$

Donc en fonction des déplacements et rotations, la forme matricielle que nous obtenons est

:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} & Q_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} + z \cdot \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} + z \cdot \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \\ z \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \right) \\ \psi_x + \frac{\partial W}{\partial x} \\ \psi_y + \frac{\partial W}{\partial y} \end{Bmatrix} \tag{13}$$

Mais en fonction des déformations, on peut obtenir celle-ci :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

## 5.5 Flexion et Flambage d'une plaque FGM en théorie du 1<sup>er</sup> ordre

Dans cette partie, nous allons poser les équations de mouvements d'une plaque FGM en théorie du 1<sup>er</sup> ordre appelée plaque de Mindlin. Pour les résoudre, nous allons utiliser la méthode analytique de Navier qui applicable au seul cas où la plaque est en appuis simples aux quatre extrémités.

### 5.5.1 Equations de mouvement d'une plaque FGM de Mindlin sous chargement $q$ , $P_x$ et $P_y$ :

$q$  est la charge transversale,  $P_x$  et  $P_y$  sont les charges axiales de compression.

$$\begin{aligned} (B12 + B66) \left( \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \psi y(x, y) \right) + (A12 + A66) \left( \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} v(x, y) \right) + \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, y) \right) A11 \\ + \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} u(x, y) \right) A66 + \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi x(x, y) \right) B11 + \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} \psi x(x, y) \right) B66 \end{aligned} = 0 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} (B12 + B66) \left( \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \psi x(x, y) \right) + (A12 + A66) \left( \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} u(x, y) \right) + \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} v(x, y) \right) A66 \\ + \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} v(x, y) \right) A22 + \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi y(x, y) \right) B66 + \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} \psi y(x, y) \right) B22 \end{aligned} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} (P_x + A55) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, y) \right) + (P_y + A44) \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} w(x, y) \right) + q \sin(\alpha x) \sin(\beta y) + \left( \frac{\partial}{\partial x} \psi x(x, y) \right) A55 \\ + \left( \frac{\partial}{\partial y} \psi y(x, y) \right) A44 \end{aligned} = 0 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} (D12 + D66) \left( \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \psi y(x, y) \right) + (B12 + B66) \left( \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} v(x, y) \right) + \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi x(x, y) \right) D11 \\ + \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} \psi x(x, y) \right) D66 + \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, y) \right) B11 + \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} u(x, y) \right) B66 - A55 \left( \psi x(x, y) \right) \\ + \left( \frac{\partial}{\partial x} w(x, y) \right) \end{aligned} = 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 & (D12 + D66) \left( \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \psi_x(x, y) \right) + (B12 + B66) \left( \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} u(x, y) \right) + \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi_y(x, y) \right) D66 \\
 & + \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} \psi_y(x, y) \right) D22 + \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} v(x, y) \right) B66 + \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} v(x, y) \right) B22 - A44 \left( \psi_y(x, y) \right. \\
 & \left. + \frac{\partial}{\partial y} w(x, y) \right) = 0 \quad (19)
 \end{aligned}$$

La méthode de Navier requiert que les déplacements et rotations s'écrivent en double séries de Fourier suivantes :

$$\begin{aligned}
 u(x, y) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \cos \alpha x \sin \beta y \\
 v(x, y) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{mn} \sin \alpha x \cos \beta y \\
 w(x, y) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{mn} \sin \alpha x \sin \beta y \quad (20) \\
 \psi_x(x, y) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N D_{mn} \cos \alpha x \sin \beta y \\
 \psi_y(x, y) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N E_{mn} \sin \alpha x \cos \beta y
 \end{aligned}$$

La charge transversale  $q$  doit aussi écrite en double série de Fourier :

$$q(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_0 \sin \alpha x \sin \beta y ; \text{ Avec : } \alpha = m\pi/a \text{ et } \beta = n\pi/b \quad (21)$$

En injectant ces déplacements et rotations dans les équations différentielles de mouvement, nous obtenons :

### 5.5.2 Cas d'une plaque en flexion : $q \neq 0$ et $P_x = P_y = 0$

$$(\alpha^2 A_{11} + \beta^2 A_{66}) A_{mn} + \alpha\beta (A_{12} + A_{66}) B_{mn} + (\alpha^2 B_{11} + \beta^2 B_{66}) D_{mn} + \alpha\beta (B_{12} + B_{66}) E_{mn} = 0 \quad (22)$$

$$\alpha\beta (A_{12} + A_{66}) A_{mn} + (\beta^2 A_{22} + \alpha^2 A_{66}) B_{mn} + \alpha\beta (B_{12} + B_{66}) D_{mn} + (\alpha^2 B_{66} + \beta^2 B_{22}) E_{mn} = 0 \quad (23)$$

$$(\alpha^2 A_{55} + \beta^2 A_{44}) C_{mn} + (\alpha A_{55}) D_{mn} + (\beta A_{44}) E_{mn} - q_0 = 0 \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
 & (\alpha^2 B_{11} + \beta^2 B_{66}) A_{mn} + \alpha\beta (B_{12} + B_{66}) B_{mn} + (\alpha A_{55}) C_{mn} + (\alpha^2 D_{11} + \beta^2 D_{66} + A_{55}) D_{mn} \\
 & + \alpha\beta (D_{12} + D_{66}) E_{mn} = 0 \quad (25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \alpha\beta (B_{12} + B_{66}) A_{mn} + (\alpha^2 B_{66} + \beta^2 B_{22}) B_{mn} + (\beta A_{44}) C_{mn} + \alpha\beta (D_{12} + D_{66}) D_{mn} \\
 & + (\alpha^2 D_{66} + \beta^2 D_{22} + A_{44}) E_{mn} = 0 \quad (26)
 \end{aligned}$$

En regroupant les termes devant les amplitudes  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$ ,  $C_{mn}$ ,  $D_{mn}$  et  $E_{mn}$ , nous obtenons les expressions des éléments de la matrice de rigidité du système :

$$\begin{aligned}
 k_{11} &= \alpha^2 A_{11} + \beta^2 A_{66}, & k_{21} &= k_{12}, & k_{31} &= 0, \\
 k_{12} &= \alpha\beta(A_{12} + A_{66}), & k_{22} &= \beta^2 A_{22} + \alpha^2 A_{66}, & k_{32} &= 0, \\
 k_{13} &= 0, & k_{23} &= 0, & k_{33} &= \alpha^2 A_{55} + \beta^2 A_{44}, \\
 k_{14} &= \alpha^2 B_{11} + \beta^2 B_{66}, & k_{24} &= \alpha\beta(B_{12} + B_{66}), & k_{34} &= \alpha A_{55}, \\
 k_{15} &= \alpha\beta(B_{12} + B_{66}); & k_{25} &= \alpha^2 B_{66} + \beta^2 B_{22} & k_{35} &= \beta A_{44}
 \end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
 k_{41} &= k_{14}, & k_{51} &= k_{15}, \\
 k_{42} &= k_{24}, & k_{52} &= k_{25}, \\
 k_{43} &= k_{34}, & k_{53} &= k_{35}, \\
 k_{44} &= \alpha^2 D_{11} + \beta^2 D_{66} + A_{55}, & k_{54} &= k_{45}, \\
 k_{45} &= \alpha\beta(D_{12} + D_{66}), & k_{55} &= \alpha^2 D_{66} + \beta^2 D_{22} + A_{44}
 \end{aligned}$$

Le système d'équations algébriques ainsi obtenu peut être mis sous la forme :

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{mn} \\ B_{mn} \\ C_{mn} \\ D_{mn} \\ E_{mn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ q_0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{28}$$

On résout ce système pour chaque couple  $(m, n)$  puisque les déplacements et rotations de Navier sont en double sommation (on tronque la série à  $M, N$  points et on peut prendre  $M = N = 10$ ). Pour chaque  $(m, n)$ , on obtient les 05 amplitudes de la série ( $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$ ,  $C_{mn}$ ,  $D_{mn}$  et  $E_{mn}$ ).

Les contraintes sont déterminées par :

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= Q_{11} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \right) + Q_{12} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + z \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \right) \\
 \sigma_y &= Q_{21} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \right) + Q_{22} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + z \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \right) \\
 \sigma_{yz} &= Q_{44} \left( \psi_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\
 \sigma_{xz} &= Q_{55} \left( \psi_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\
 \sigma_{xy} &= Q_{66} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + z \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{29}$$

Par exemple la contrainte axiale  $\sigma_x$  sera calculée par :

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= Q_{11} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \right) + Q_{12} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + z \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \right) = Q_{11} \frac{\partial}{\partial x} (u + z\psi_x) + Q_{12} \frac{\partial}{\partial y} (v + z\psi_y) \\
 \sigma_x &= Q_{11} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \cos \alpha x \sin \beta y + z \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N D_{mn} \cos \alpha x \sin \beta y \right] + \\
 & \quad Q_{12} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{mn} \sin \alpha x \cos \beta y + z \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N E_{mn} \sin \alpha x \cos \beta y \right] \\
 \sigma_x &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[ \begin{aligned} & Q_{11} \frac{\partial}{\partial x} (A_{mn} \cos \alpha x \sin \beta y + z D_{mn} \cos \alpha x \sin \beta y) + \\ & Q_{12} \frac{\partial}{\partial y} (B_{mn} \sin \alpha x \cos \beta y + z E_{mn} \sin \alpha x \cos \beta y) \end{aligned} \right]
 \end{aligned} \tag{30}$$

Finalement:

$$\sigma_x = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[ -Q_{11} \alpha (A_{mn} + z D_{mn}) - Q_{12} \beta (B_{mn} + z E_{mn}) \right] (\sin \alpha x \sin \beta y) \tag{31}$$

On peut procéder de la même manière pour le reste des contraintes.

De même que, les déplacements peuvent être calculés à partir du champ de déplacement en injectant les séries doubles de navier:

$$\begin{aligned}
 \bar{u}(x, y, z) &= u(x, y) + z\psi_x(x, y) \\
 \bar{v}(x, y, z) &= v(x, y) + z\psi_y(x, y)
 \end{aligned} \tag{32}$$

$$\bar{w}(x, y, z) = w(x, y)$$

Exemple, l'expression de  $\bar{u}$  sera:

$$\bar{u} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \cos(\alpha x) \sin(\beta y) + z D_{mn} \sin(\alpha x) \cos(\beta y) \tag{33}$$

5.5.3 Cas d'une plaque en flambage :  $q=0$  et  $P_x=\lambda_1 P_{cr}$  et  $P_y=\lambda_2 P_{cr}$ 

$\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont les paramètres de flambage :

- Flambage unidirectionnel (selon l'axe  $x$ ) :  $\lambda_1 \neq 0$  et  $\lambda_2 = 0$
- Flambage unidirectionnel (selon l'axe  $y$ ) :  $\lambda_1 = 0$  et  $\lambda_2 \neq 0$
- Flambage bidirectionnel (selon les axes  $x$  et  $y$ ) :  $\lambda_1 \neq 0$  et  $\lambda_2 \neq 0$

$$(\alpha^2 A_{11} + \beta^2 A_{66}) A_{mn} + \alpha\beta(A_{12} + A_{66}) B_{mn} + (\alpha^2 B_{11} + \beta^2 B_{66}) D_{mn} + \alpha\beta(B_{12} + B_{66}) E_{mn} = 0 \quad (34)$$

$$\alpha\beta(A_{12} + A_{66}) A_{mn} + (\beta^2 A_{22} + \alpha^2 A_{66}) B_{mn} + \alpha\beta(B_{12} + B_{66}) D_{mn} + (\alpha^2 B_{66} + \beta^2 B_{22}) E_{mn} = 0 \quad (35)$$

$$[\alpha^2 (A_{55} + \lambda_1 P_{cr}) + \beta^2 (A_{44} + \lambda_2 P_{cr})] C_{mn} + (\alpha A_{55}) D_{mn} + (\beta A_{44}) E_{mn} = 0 \quad (36)$$

$$(\alpha^2 B_{11} + \beta^2 B_{66}) A_{mn} + \alpha\beta(B_{12} + B_{66}) B_{mn} + (\alpha A_{55}) C_{mn} + (\alpha^2 D_{11} + \beta^2 D_{66} + A_{55}) D_{mn} + \alpha\beta(D_{12} + D_{66}) E_{mn} = 0 \quad (37)$$

$$\alpha\beta(B_{12} + B_{66}) A_{mn} + (\alpha^2 B_{66} + \beta^2 B_{22}) B_{mn} + (\beta A_{44}) C_{mn} + \alpha\beta(D_{12} + D_{66}) D_{mn} + (\alpha^2 D_{66} + \beta^2 D_{22} + A_{44}) E_{mn} = 0 \quad (38)$$

En regroupant les termes devant les amplitudes  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$ ,  $C_{mn}$ ,  $D_{mn}$  et  $E_{mn}$ , nous obtenons les expressions des éléments de la matrice de rigidité du système :

$$\begin{aligned} k_{11} &= \alpha^2 A_{11} + \beta^2 A_{66}, & k_{21} &= k_{12}, & k_{41} &= k_{14}, \\ k_{12} &= \alpha\beta(A_{12} + A_{66}), & k_{22} &= \beta^2 A_{22} + \alpha^2 A_{66}, & k_{42} &= k_{24}, \\ k_{13} &= 0, & k_{23} &= 0, & k_{43} &= k_{34}, \\ k_{14} &= \alpha^2 B_{11} + \beta^2 B_{66}, & k_{24} &= \alpha\beta(B_{12} + B_{66}), & k_{44} &= \alpha^2 D_{11} + \beta^2 D_{66} + A_{55}, \\ k_{15} &= \alpha\beta(B_{12} + B_{66}); & k_{25} &= \alpha^2 B_{66} + \beta^2 B_{22} & k_{45} &= \alpha\beta(D_{12} + D_{66}), \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} k_{31} &= 0, & k_{51} &= k_{15}, \\ k_{32} &= 0, & k_{52} &= k_{25}, \\ k_{33} &= \alpha^2 (A_{55} + \lambda_1 P_{cr}) + \beta^2 (A_{44} + \lambda_2 P_{cr}), & k_{53} &= k_{35}, \\ k_{34} &= \alpha A_{55}, & k_{54} &= k_{45}, \\ k_{35} &= \beta A_{44} & k_{55} &= \alpha^2 D_{66} + \beta^2 D_{22} + A_{44} \end{aligned}$$

Le système d'équations algébriques ainsi obtenu peut être mis sous la forme :

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 & k_{14} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & 0 & k_{24} & k_{25} \\ 0 & 0 & k_{33} + k & k_{34} & k_{35} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{mn} \\ B_{mn} \\ C_{mn} \\ D_{mn} \\ E_{mn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad \text{Avec : } k = \lambda P_{cr}, \quad \lambda = \lambda_1 \alpha^2 + \lambda_2 \beta^2 \quad (40)$$

Pour trouver la charge de flambage critique  $P_{cr}$  (la plus petite charge qui provoque le flambage), le système doit être écrit sous la forme canonique suivante (on divise l'équation 3 par  $(\lambda_1 \alpha^2 + \lambda_2 \beta^2)$ ) :

$$\left( \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 & k_{14} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & 0 & k_{24} & k_{25} \\ 0 & 0 & \bar{k}_{33} & \bar{k}_{34} & \bar{k}_{35} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} \end{bmatrix} - P_{cr} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} A_{mn} \\ B_{mn} \\ C_{mn} \\ D_{mn} \\ E_{mn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (41)$$

Avec :  $\bar{k}_{33} = k_{33} / \lambda$ ,  $\bar{k}_{34} = k_{34} / \lambda$ ,  $\bar{k}_{35} = k_{35} / \lambda$ ,

$P_{cr}$  peut être déterminée pour un couple  $(m, n)$  donné en cherchant les valeurs propres du système. Pour chaque  $(m, n)$  on obtient 5 valeurs de  $P_{cr}$  (car le système est de  $5 \times 5$ ). En balayant sur  $M \times N = 10 \times 10 = 100$  points, nous trions les 500 valeurs ( $5 \times 10 \times 10$ ). La plus petite valeur propre correspondra donc à la charge critique de flambage  $P_{cr}$ . c (32)

### Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation d'une plaque FGM de différentes propriétés a été faite avec des présentations graphiques de chaque modèle (le modèle de la plaque S-FGM, P-FGM, E-FGM et le modèle de Mori Tanaka). Nous avons donc constaté qu'il existe plusieurs fonctions de loi de mélange qui décrivent le gradient de distribution des deux matériaux constituants. Suite à cela, on a présenté la théorie du premier ordre des plaques moyennement épaisses. Ensuite, en se basant sur la théorie du premier ordre de Mindlin, nous avons présenté le champ de déformations et de contraintes, ainsi les efforts et moments appliqués à la plaque FGM. A la fin de chapitre, on a utilisé la méthode analytique de Navier pour la résolution du système de dimensions de la forme  $[K] \cdot \{d\} = \{q\}$  pour le cas de la flexion et la forme  $([k] - P_{cr}[C])\{d\} = \{0\}$  pour le cas de flambage.

**Chapitre VI :**  
**L'interprétation et la conclusion générale**

## 6 Chapitre VI : l'interprétation et la conclusion générale

### 6.1 Introduction :

Dans ce dernier chapitre nous allons présenter les méthodes utilisés pour la résolution du système d'équation de mouvement d'une plaque FGM de cas de flexion et l'ensemble des résultats obtenus suit à l'exécution du programme de calcul que nous avons élaboré. On va élaborer un programme de calcul en se servant de logiciel Maple. Maple est un logiciel mathématique associant le moteur mathématique le plus puissant au monde à une interface qui facilite l'analyse, l'exploration, la visualisation et la résolution des problèmes mathématiques et physiques.

Les résultats représentant les contraintes normales et transverses ainsi que les déplacements seront présentés et des graphes seront tracés pour montre l'influence des paramètres considérés (géométrique, épaisseur relative et l'index de la fraction volumique) dans cette étude.

### 6.2 Résultats et interprétations :

La plaque possède une surface inférieure en alliage d'aluminium 7075-T6 et la face supérieure une composition de 80Cr3C2– 20(80Ni20Cr). La variation des propriétés de la surface inférieure à la surface supérieur est pilotée par une loi de mélange  $V(z)$  et la détermination des propriétés macroscopique (module de Young  $E$ , module de cisaillement  $G$  et coefficient de poisson) est faite grâce à la Méthode d'homogénéisation de Mori-Tanaka. Cette méthode est applicable pour un mélange de nanoparticules. La force externe de flexion  $q(x, y)$  est de type sinusoïdale.

#### **Plaque Aluminium - nickel-chrome (NiCr +carbures de chrome : Cr3C2)**

Aluminium 7075-T6 (Métal) :  $E_b = 72 * 10^9 GPa$  ;  $\mu_b = 0.30$  ;  $\rho_b = 2810$

20%Ni-Cr - 80%Cr3C2 (poudre nickel-chrome : NiCr + carbures de chrome : Cr3C2) :

$E_t = 125 * 10^9 GPa$  ;  $\mu_t = 0.30$  ;  $\rho_t = 2300$

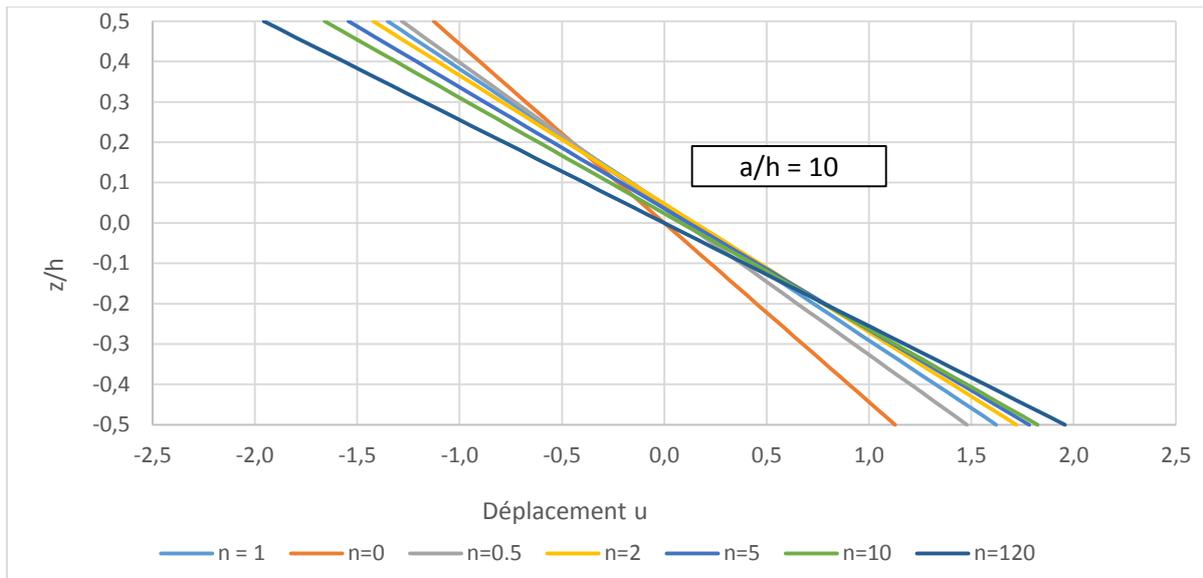


Figure 6-1 : Variation du déplacement adimensionnel  $u(0, b/2, z/h)$  dans l'épaisseur de la plaque PFGM Al7075/Cr3C2 – NiCr pour différents index de la fraction volumique ( $b/a = 0,5$  et  $1$  avec  $a/h = 10$ ).

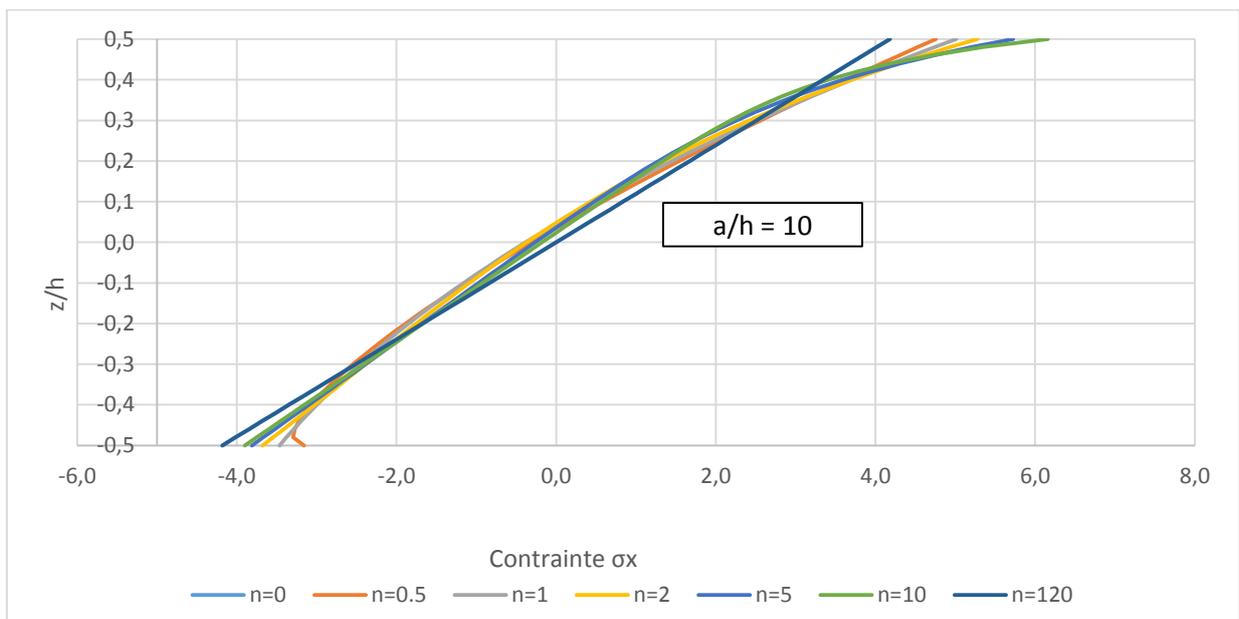


Figure 6-2: Variation de la contrainte adimensionnelle longitudinale  $\sigma_x(a/2, b/2, z/h)$  dans l'épaisseur de la plaque PFGM Al7075/Cr3C2 – NiCr pour différents index de la fraction volumique ( $b/a = 0,5$  et  $1$  avec  $a/h = 10$ ) sous chargement sinusoïdale

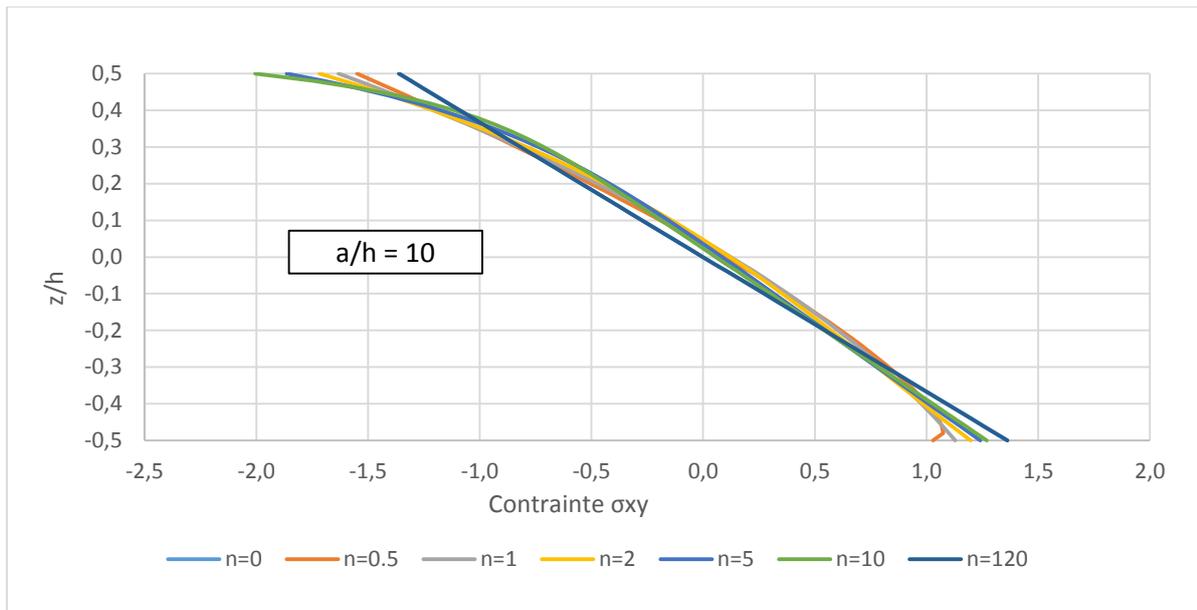


Figure 6-3: Variation de la contrainte adimensionnelle  $\sigma_{xy}(0, 0, z/h)$  dans l'épaisseur de la plaque PFGM Al7075/Cr3C2 – NiCr pour différents index de la fraction volumique ( $b/a = 0,5$  et  $1$  avec  $a/h = 10$ ) sous chargement sinusoïdale

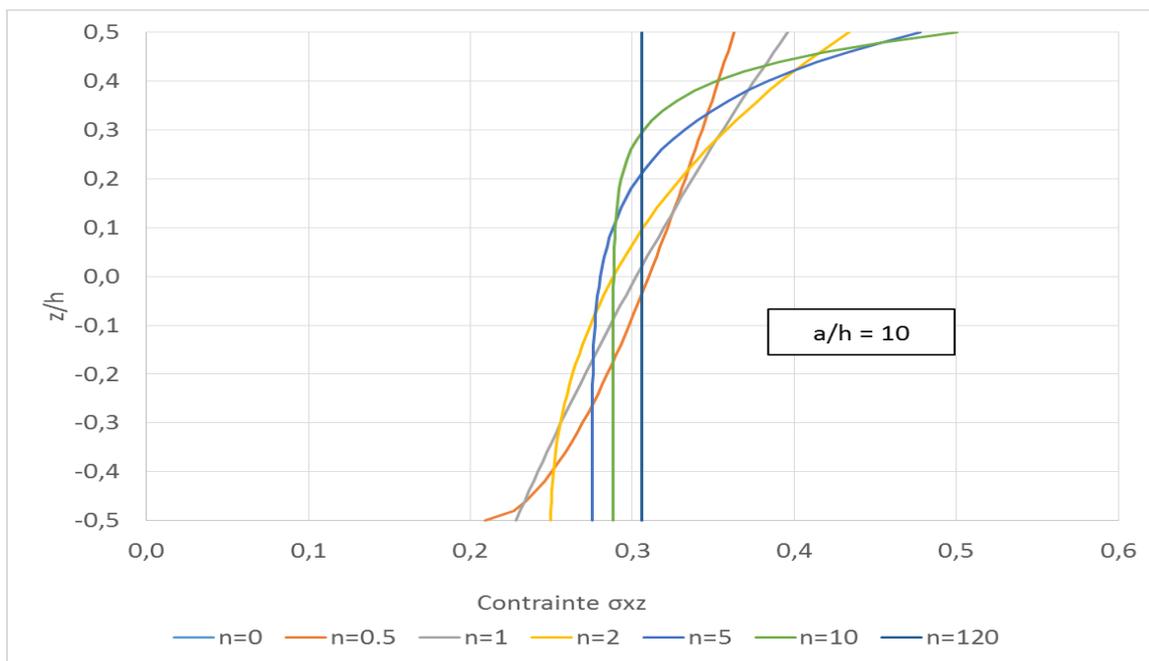


Figure 6-4: Variation de la contrainte adimensionnelle de cisaillement transverse  $\sigma_{xz}(0, b/2, z/h)$  dans l'épaisseur de la plaque FGM Al7075/Cr3C2 – NiCr pour différents index de la fraction volumique ( $b/a = 0,5$  avec  $a/h = 10$ ) sous chargement sinusoïdale.

A partir des graphes et les résultats qui nous avons, on peut pu tirer certaines conclusions :

- L'indice t correspond au " top" (face supérieure de la plaque) et l'indice b au "bottom", la face inférieure de la plaque,
- Lorsque  $n = 0$  ou  $n \geq 120$ , la plaque est homogène,
- Lorsque  $n = 0$ , le volume de la fraction volumique  $V(z/h) = 1$ . Dans ce cas  $E(\text{plaque}) = E_t$ , la plaque est presque totalement composée (homogène) du mélange Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr,
- Lorsque  $n \geq 120$  ( $n$  tend vers  $\infty$ ), le volume de la fraction volumique  $V(z/h) = 0$ . Dans ce cas,  $E(\text{plaque}) = E_b$ , la plaque est homogène (composée d'alliage d'aluminium 7075-T6),
- Le mélange Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr possède un module de Young bien plus important que celui de la poudre en alliage d'aluminium,
- Lorsque  $n$  augmente, le déplacement adimensionnel  $u$  augmente (en valeur absolue) mais le déplacement non adimensionnel, quant à lui, diminue. La valeur négative correspond à une compression des fibres et la valeur positive à une traction des fibres car la plaque est en flexion,
- Les valeurs nulles du déplacement correspondent au cas où la plaque est homogène ( $n=0$  ou  $n \geq 120$ ) et le plan moyen se situe bien au milieu de la plaque ( $z = 0$ ), ce qui est normal car les fibres situées sur le plan moyen ne sont ni en compression, ni en traction et le déplacement est nul,
- Lorsque  $n > 0$  et  $n < 120$ , la plaque n'est plus homogène et le plan moyen n'est pas situé au milieu de la plaque, mais se déplace soit vers le haut, soit vers le bas en fonction de la concentration des constituants pilotée par l'index de la fraction volumique  $n$ ,
- Plus  $n$  augmente, plus la plaque devient globalement rigide (moins souple) car la concentration en poudre Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr est plus importante. Dans ce cas, le déplacement longitudinal adimensionnel augmente (le déplacement non adimensionnel, quant à lui, diminue, ce qui est normal car la plaque est moins souple globalement). Ceci est aussi constaté lorsque la plaque n'est pas homogène ( $n > 0$  t  $n < 120$ ), En effet, le déplacement est plus important au niveau de la face inférieure car le mélange contient plus de poudre

d'alliage d'aluminium (donc zone moins rigide) que de poudre de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr dont le module de Young est plus important,

- Le même phénomène est constaté pour les contraintes adimensionnelles  $\sigma_x$  ( $\sigma_y = \sigma_x$  car la plaque est homogène sur le plan xy à chaque z) et  $\sigma_{xy}$ . En effet, les contraintes sont nulles au niveau du plan moyen situé à  $z = 0$  lorsque la plaque est homogène ( $n = 0$  ou  $n \geq 120$ ),
- Quelle que soit la valeur de l'index de la fraction volumique  $n$ , les contraintes augmentent lorsque  $z$  augmente. Elles sont maximales au niveau des surfaces supérieure et inférieure de la plaque et s'annulent sur le plan moyen qui est décalé de celui du milieu de la plaque (suivant  $z$ ) en fonction de la concentration des constituants (poudre d'alliage d'aluminium et du mélange Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr). Cependant, lorsque la plaque n'est pas homogène, les contraintes adimensionnelles sont plus grandes au niveau de la face supérieure ( $z/h = 0,5$ ). Les contraintes non adimensionnelles suivent la même variation. Ceci est expliqué par le fait que plus on avance vers la face supérieure et plus le mélange est dominé par la concentration en Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr qui possède un module de Young plus important donnant une région moins souple et donc plus rigide (la contrainte est proportionnelle au module de Young et à la déformation dans le domaine élastique),
- La contrainte de cisaillement  $\sigma_{xz}$  (et  $\sigma_{yz}$ ) augmente lorsque  $n$  augmente ( $n > 0$  et  $n < 120$ ) car la plaque devient globalement plus rigide du fait de l'augmentation de la concentration du mélange de poudre en Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr. Lorsque la plaque est homogène ( $n=0$  et  $n \geq 120$ ), la contrainte de cisaillement est constante le long de l'épaisseur, Ceci est le résultat de l'utilisation de la théorie en cisaillement du 1er ordre,
- La contrainte de cisaillement  $\sigma_{xz}$  est plus importante au niveau de la surface supérieure quel que soit  $n$  car la zone a plus de concentration en mélange de poudre Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> – NiCr dont le module de Young est plus important (174%) que celui de l'alliage de l'aluminium.

### 6.3 Conclusion générale :

Au cours de ce travail, nous nous sommes intéressées à l'élaboration d'un matériau nanostructuré et à l'étude de ses propriétés thermomécaniques.

Après la réalisation d'une étude prospective, nous avons opté pour le renforcement sélectif d'une matrice métallique par des nanoparticules d'un cermet. En raison de la propagation de l'épidémie de COVID-19, le travail n'a pas été réalisé.

A cet effet, nous avons utilisé une méthode analytique pour étudier un matériau à gradient des propriétés (FGM). Ces matériaux représentent un domaine de recherche très vaste et des applications immenses car il est possible de modifier à volonté leurs compositions et leurs architectures pour obtenir à partir de ces matériaux, les propriétés recherchées.

L'objectif de ce travail était, d'apporter une contribution à l'étude du comportement des plaques FGM à deux constitutions (100% céramique au niveau de la face supérieure et 100% métal à la face inférieure) en flexion.

Nous avons utilisé le logiciel Maple pour la résolution d'un système d'équations différentielles couplées. On a utilisé la méthode analytique de Navier. Cette étude montre que :

- L'indice de la fraction volumique et le rapport de l'épaisseur influent sur les comportements des plaques en FGM.
- Les deux types de matériaux à gradient fonctionnel traités dans ce travail montrent une grande influence de la variation de l'indice de la fraction volumique. Cette variation implique un changement des concentrations de métal et de céramique dans la constitution de la plaque d'où une variation de la rigidité globale.

En perspective, le travail présenté dans cette thèse peut être développé. Nous proposons de réaliser l'étude de flambage des plaques FGM soumises à des contraintes thermiques dans le cadre d'étude du comportement thermomécanique des plaques FGM. Il est également possible d'étendre l'analyse à des éléments structuraux à section variable et d'élargir l'étude aux coques qui sont des éléments très utilisées et très présentes dans les structures aérospatiales. On peut aussi résoudre les problèmes de vibration des structures reposant sur des fondations élastiques par la méthode des éléments finis et sous la combinaison des différents types de chargement (mécanique, vibratoire, hygrothermique, etc.) et sous diverses conditions aux limites.

## Bibliographie

1. s.l., **Jean P. Mercier-Gérald Zambelli-Wilfried Kurz**. *Traité Des Matériaux -Introduction à La Science Des Matériaux*. . s.l. : Presse Polytechnique Et Universitaire Romandes, Troisième Edition 2002.
2. **Abdelghani., MAY..** *Cours Science Des Matériaux*. s.l. : Ecole Militaire Polytechnique -Laboratoire Génie des Matériaux, EMP, 2017.
3. **Dupeux, Michel**. *AIDE-MÉMOIRE -SCIENCE DES MATÉRIAUX*. s.l. : Écoles d'Ingénieurs -Dunod, 2005.
4. **Colombié, Michel**. *MATÉRIAUX MÉTALLIQUES*. s.l. : L'USINENOUVELLE-Dunod, Deuxième Edition 2008.
5. **Murry., Guy**. *Aide-Mémoire Métallurgie- Métaux • Alliages • Propriétés*. s.l. : L'USINENOUVELLE-Dunod, Deuxième Edition 2010.
6. **Haudin, A-F. Gourgues-Lorenzon J-M**. *Matériaux pour l'ingénieur- Etude (broché)*. 2010.
7. **Bonnefont, Gilbert Fantozzi Jean-Claude Nièpce Guillaume**. *les Céramiques Industrielles Propriétés- mise en forme et applications*. . Dunod 2013.
8. **Karmaoui., Dr. Mohamed**. *Procédés de transformation et mise en forme des matériaux-POLYCOPE-*. s.l. : Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2019/2020.
9. **Dossier créé avec la collaboration de Marc Marzano - Action Composite Pascal Celle - GNFA**. *Les matériaux composites- DOSSIER PÉDAGOGIQUE*. . Edition 2014.
10. **Berthelot., Jean-Marie**. . *Mécanique des Matériaux et Structures Composites*. s.l. : Le Mans France : Institut Supérieur des Matériaux France et Mécaniques Avancés, Nouvelle Edition 2010.
11. **coll., Michel Wautelet et**. *Les Nanotechnologies-Dunod*. . Troisième Edition 2014.
12. **Dufresne., Claude Ostiguy Maximilien Debia Brigitte Roberge André**. . *Nanomatériaux Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques en milieu de travail- Études et recherches-RAPPORT R-840*. Deuxième Edition 2014.
13. **République Française , Comité de la prévention et de la précaution . .** *Nanotechnologie – Nanoparticules : Quels dangers, quels risques ?* . 2006.
14. **Miao L, Bhethanabolta V.R. et Joseph B**. *physical review*. 2005.
15. **Arbouet C, Voisin.D, Christofilos.P, Langot.N, Dell Fatti et F.Vallée**. *physical review lett*. 2003.
16. **Soucy, Catherine Woods et Brigitte**. *Les nanoparticules de synthèse Connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST*. s.l. : : IRSST/Université de Montréal,, 2e édition, 2010.
17. **BOUDINAR, Naouam**. *Élaboration et études structurales et microstructurales des poudres nanostructurées à base de fer*. s.l. : Thèse de Doctorat, Université ANNABA MOKHTAR BADJI UNIVERSITÉ, 2011.
18. **B. Kieback, A. Neubrand**. . *Processing techniques for functionally gradient materials*. 2003.

19. **Shiota, I. & Miyamoto, Y.** *Functionally graded materials*. . 1996,1997.
20. **Miyamoto, Y.**. *FUNCTIONALLY GRADED MATERIALS Design, Processing and Applications*. . 1999.
21. **D.K. Jha, T. Kant, R.K. Singh.** *Critical review of recent research on functionally graded plates, Compos. Struct.* 96. . 2013.
22. **Rasheedat Modupe Mahamood, Esther Titilayo Akinlabi.** *Functionally Graded Materials*. . 2017.
23. **NAVARRETE, Luis Rafael OLMOS.** *Etude du frittage de poudres par micro tomographie in situ et modélisation discrète. s.l. : thèse doctorat. Génie des procédés. s.l. : Institut National Polytechnique de Grenoble, , 2010.*
24. **McGeer, J. P.** . *light metals*. 1984.
25. **Abdelmoumen., HIDOURI.** *COURS DE CARACTERISATION DES MATERIAUX,*. s.l. : Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Gafsa Département de Génie Mécanique, , 2018,.
26. **TRUFFAULT, Laurianne.** *Synthèse et caractérisation de nanoparticules à base d'oxydes de cérium et de fer pour la filtration des UV dans les produits solaires. s.l. : Thèse de Doctorat, Université D'ORLÉANS, , 2010.*
27. . **Love, A.E.H., "**,. *On the small free vibrations and deformations of elastic shells"*. London: Philosophical trans. of the Royal Society, ., 1988.
28. **Jerzy J. Sobczak, Ludmil B. Drenchev.** . *Metal Based Functionally Graded Materials:Engineering and Modeling*. 2004.
29. : **L.Wang, G.Bao and.** *Multiple cracking in functionally graded ceramic-metal coating*. . 1995.
30. **Chi. Shyang-ho., Chung Yen-Ling.** *Cracking in coating-substrate composites of multi-layered and sigmoid FGM coatings"*. *Engineering Fracture Mechanics* . . 2003.
31. **Delale. F, Erdogan. F.** *The crack problem for a nonhomogeneous plane.* s.l. : ASME Journal of Applied Mechanics, , 1983.
32. **H, Ait Atmane.** « *analyse des vibrations libres des plaques FGM posée sur appuis élastique en utilisant une nouvelle fonction de cisaillement* ».
33. **Amale., MAHI.** « *analyse et études des plaques composites FGM en vibrations libres* » . s.l. : thèse de doctorat, université saad Dahlab Blida.
34. . **Y. Jinga, H. Wanga, X. Chena, X. Wanga, H. Weib, Z. Guob,.** *Applied Surface Science* . . 2014.
35. **HOUDA, TEBANI.** *thèse de Doctorat : Elaboration et étude des propriétés structurales et optiques de nanoparticules de PbS incorporées dans la zéolithe.* s.l. : Université CONSTANTINE 1, ., 2015.
36. **BSc, N.T. Nolan.** . *Thèse de Doctorat.* . s.l. : s.l. : Dublin Institute of Technology, , 2010.
37. . **A.J. Ruys, Y. Mai.** *Materials Science and Engineering* . . 1999.
38. ., **Afsset.** *Les nanomatériaux : effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement* . Juillet 2006.
39. **Soucy, Catherine Woods et Brigitte.** . *Les nanoparticules de synthèse Connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST.* s.l. : : IRSST/Université de Montréal, , 2e édition, 2010.

40. **Groupe français des zéolithes, Thibault-Starzyk.** *LES MATÉRIAUX MICRO ET MÉSOPOREUX - Caractérisation* . 2004,.

Les annexes :

## Annexe 1 :

Tableau : Désignation des états métallurgiques de base. (4)

Traitements généraux (processus de base)			Symbole
Traité thermiquement avec mise en solution séparée	Sans écrouissage complémentaire	{ • Mûri • Revenu • Sur-revenu	T4 T6 T7
	Avec écrouissage complémentaire	{ • Écroui puis mûri • Écroui puis revenu • Revenu puis écroui	T3 T8 T9
Traité thermiquement sans mise en solution séparée	Sans écrouissage complémentaire	{ • Mûri • Revenu	T1 T5
	Avec écrouissage complémentaire	{ • Écroui puis mûri • Écroui puis revenu	T2 T10
Traitements particuliers et complémentaires			Symbole
Revenu	Revenu « doux » Revenu « dur » Sur-revenu		T51 – T61 T56 – T66 T7
Relaxation	Par traction Par compression Par traction et compression		T×51 T×52 T×54

Source : norme AFNOR NF EN 515.

## Annexe 2 :

### Quelques applications des céramiques :

- Céramiques dans l'automobile :

Cette utilisation se réduit à des composants du moteur. Leurs buts sont d'améliorer l'isolation thermique, la résistance à l'usure par frottement, d'alléger les pièces en mouvement. Pour améliorer le rendement du turbocompresseur, certains fabricants ont envisagé la conception du conduit d'échappement ainsi que la turbine en céramique. On utilise pour ces applications des inserts en zircon ( $ZrO_2$ ) et de titanate d'aluminium ( $Al_2TiO_5$ ). La résistance à l'usure par frottement est une des propriétés remarquables des céramiques. Ainsi les culbuteurs, les guides et les sièges de soupapes sont en céramique (association de zircone et de nitrure de silicium ( $Si_3N_4$ )).

- Céramiques pour les outils de coupe :

Dans ce cas, on utilise principalement les propriétés de dureté et de tenue à haute température. Ainsi l'usinage des fontes, des aciers et des superalliages à base de nickel et de cobalt peuvent être exécutés avec des plaquettes en céramique. Pour les premiers, on utilisera l'alumine ( $Al_2O_3$ ), pour les seconds, le nitrure de silicium.

- Céramiques dans le nucléaire :

Dans le nucléaire, les céramiques sont utilisées comme combustible : céramiques à base d'uranium, produits remplaçant l'uranium métallique pour les réacteurs à haute puissance. On les utilise aussi comme barre de contrôle. Matériau très absorbant neutronique, il sert à contrôler la réaction de fission nucléaire. Les céramiques servent globalement à la protection thermique et neutronique. (2)

## Annexe 3 :

Tableau : Les critères de choix des composites par rapport aux métaux. (9)

CONTRAINTES	AVANTAGES
<p>Caractéristiques mécaniques plus faibles.</p> <p>Tenue au feu et résistance en température (plus faible que les métaux).</p> <p>Peinture type automobile plus difficile.</p> <p>Coût plus élevé :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- fluctuation des prix des matières premières,</li> <li>- nécessité de nouveaux investissements en production.</li> </ul> <p>Complexité et difficulté du recyclage des thermodurcissables.</p>	<p>Résistant à la corrosion.</p> <p>Gain de poids.</p> <p>Bilan énergétique, réduction des émissions.</p> <p>Réduction des émissions sonores.</p> <p>Optimisation des coûts de production.</p> <p>Complexité et diversité des formes possibles :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- souplesse d'utilisation,</li> <li>- meilleur rendu esthétique,</li> <li>- facilité de mise en forme favorisant l'amélioration de l'aérodynamisme.</li> </ul> <p>Nombreuses techniques de fabrication possible.</p> <p>Confort accru (insonorisation et anti-vibration).</p> <p>Isolation électrique.</p> <p>Faible coefficient de friction.</p> <p>Meilleure indentation aux petits chocs.</p> <p>Antigravillonnage.</p> <p>Absorption progressive d'énergie lors de gros chocs.</p>

## **Annexe 4 :**

### **LA STRUCTURE DES PIÈCES COMPOSITES**

#### **LES STRUCTURES MONOLITHIQUES**

Ces structures sont les plus courantes. La pièce est constituée d'un empilage de couches de renfort appelées strates. Il est possible de mixer différentes couches de renfort en fonction des propriétés mécaniques souhaitées. Ainsi, on peut alterner des couches de mats isotropes dans le plan avec des couches de tissus anisotropes afin de renforcer la résistance de la pièce en fonction des différentes sollicitations mécaniques.

L'orientation des fibres joue aussi un rôle très important dans la résistance de la pièce. Généralement les structures monolithiques sont réservées à des pièces de faibles épaisseurs (entre 3 et 5 mm) mais il est possible d'avoir des épaisseurs de pièces plus importantes en respectant certaines étapes intermédiaires de stratification afin de minimiser au maximum les phénomènes de retrait.

#### **LES STRUCTURES SANDWICH**

On appelle pièce à structure sandwich toute pièce stratifiée composée d'une âme comprise entre deux parements. Les structures sandwich ont la particularité de pouvoir à la fois rigidifier et alléger une structure tout en lui apportant de nouvelles propriétés comme par exemple une isolation phonique ou thermique selon le matériau d'âme choisi.

Les principaux avantages de ces structures sont :

- la légèreté (économie de poids à résistance égale),
- très grande rigidité,
- grande résistance en flexion,
- isolation thermique.

#### **LES STRUCTURES 3D**

Les structures 3D sont obtenues soit par tressage, soit par l'utilisation de renforts tissés en trois dimensions. Le tressage s'effectue sur des métiers à tisser spécifiques qui permettent de réaliser soit des gaines ou chaussettes qui sont utilisées à posteriori, soit directement une

préforme de la pièce qui sera ensuite injectée. Les structures ainsi obtenues possèdent des propriétés mécaniques élevées et restent légères. Très utilisé dans la fabrication des cadres de vélo de compétition, le tressage se retrouve dans la fabrication de pale d'hélice ou de pièce de révolution High Tech.

### MULTIMATÉRIAUX

Un exemple courant et typique de structure multimatériaux est celui des poutres ou panneaux sandwichs, où une âme centrale donne la forme générale, conférant un écartement suffisant à deux peaux, qui assurent la résistance à la flexion. L'âme, qui n'a qu'une fonction mécanique mineure, peut être en matériau très léger (mousse polymère, nid d'abeille, bois aggloméré...) remplissant si nécessaire une fonction d'isolation thermique ou phonique. L'ensemble permet un gain de poids très sensible par rapport à un matériau homogène, ainsi qu'une bonne absorption des chocs ou des vibrations.

### TRAITEMENTS DE SURFACE ET REVÊTEMENTS

L'objectif est de conférer à la surface d'une pièce ou d'un composant des propriétés différentes de celles de la masse, le plus souvent en termes de :

- résistance à l'usure ;
- résistance à la corrosion ;
- tenue en fatigue (résistance à l'amorçage des fissures) ;
- aspect extérieur, esthétique.

Ces traitements peuvent être localisés, et ne concerner qu'une partie de la surface de la pièce.

### **MATÉRIAUX CELLULAIRES**

De très nombreux matériaux peuvent être élaborés sous forme de mousses à cellules ouvertes ou fermées, sortes de « composites matière vide », qui peuvent s'avérer utiles grâce à leur faible masse volumique apparente, leur grande souplesse et leur grande capacité de déformation élastique et plastique (absorption d'énergie de déformation, isolation thermique et phonique). (9)

## **Annexe 5 :**

### **Procédés de synthèse des nanoparticules :**

#### **A. Les procédés physiques :**

##### **1. Méthode laser pulsé**

Le dépôt par laser pulsé (PLD) est un dépôt de film mince (plus précisément un dépôt en phase vapeur, PVD physique) technique où un faisceau laser pulsé de forte puissance est concentré dans une chambre à vide pour frapper une cible du matériau à déposer. Ce matériau est vaporisé à partir de la cible dans un panaché de plasma qui se dépose en couche mince sur un substrat (par exemple une tranche de silicium en face de la cible). Ce processus peut se produire dans le vide ultra élevé ou en présence d'un gaz ambiant, tel que l'oxygène qui est couramment utilisé au moment du dépôt des oxydes d'oxygéner entièrement les films déposés. Cette méthode a été utilisée pour déposer des nanoparticules d'argent sur des matrices d'hydroxyde de nickel (26).

##### **2. Ablation laser**

L'ablation laser est une technique de dépôt de couches minces. Elle complète la gamme des méthodes de dépôt physique de couches minces, telles l'évaporation, la pulvérisation cathodique ou le procédé sol-gel. La méthode consiste à focaliser un faisceau laser pulsé sur une cible constituée du matériau à déposer. L'interaction cible-faisceau entraîne l'arrachage de la matière constituant la cible, par pulvérisation, évaporation, voire fracturation mécanique, qui peut ainsi venir se déposer sur un substrat placé en vis-à-vis de la tâche laser. Les conditions d'interaction, fluence (énergie de l'impulsion par unité de surface), durée d'impulsion, longueur d'onde, permettent de contrôler la voie d'ablation de la matière (plasma, vapeur, etc.) en modifiant les conditions d'absorption de l'énergie laser par la cible. (26)

### 3. Implantation ionique

L'implantation ionique est largement utilisée pour élaborer des nanoparticules piégées dans une matrice. Elle consiste à bombarder un matériau avec des ions accélérés à une certaine énergie (10-100 kV). Ces ions sont projetés sur une cible dont la température peut être contrôlée. Une forte fluence d'implantation permet de provoquer la nucléation de particules dans une région proche de la surface. Plusieurs éléments ont été implantés dans une matrice de silice comme le cobalt. (27)

### 4. Pyrolyse laser

Le principe de cette méthode repose sur l'interaction en jet croisé entre l'émission d'un laser IR (CO<sub>2</sub>) et un flux de réactifs dans un réacteur sous atmosphère contrôlée. Le transfert d'énergie résonant provoque une élévation rapide de température dans la zone de réaction, les précurseurs sont dissociés et une flamme apparaît dans laquelle se forment les nanoparticules qui subissent ensuite un effet de trempe en sortie de flamme. (27)

## **B. Les procédés chimiques :**

### 1. Méthode sol-gel

Le terme sol-gel correspond à l'abréviation « solution-gélification ». Brièvement, un « sol » est une suspension colloïdale d'oligomères dont le diamètre est de quelques nanomètres seulement. Par la suite, on peut faire évoluer ce « sol », par le biais de réactions chimiques, en un réseau à viscosité infinie, appelé « gel ». Le procédé sol-gel permet de fabriquer un polymère inorganique par des réactions chimiques simples et à une température proche de la température ambiante (20 à 150 °C). La synthèse est effectuée à partir d'alcates de formule M(OR)<sub>n</sub> où M est un métal ou le silicium et R un groupement organique alkyle C<sub>n</sub>H<sub>2n+1</sub>. De nombreuses nanoparticules d'oxydes ont été préparées par la méthode sol-gel, comme ZnO/TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>.....(28), (29)

### 2. Synthèse par micelles

Une micelle est un agrégat sphéroïdal de molécules, possédant une tête polaire hydrophile dirigée vers le solvant et une chaîne hydrophobe dirigée vers l'intérieur. Les micelles inverses sont des gouttelettes d'eau dans l'huile stabilisées par un tensioactif. Elles sont formées dans les milieux non aqueux par les surfactants ioniques de chaînes alkyles doubles comme le diméthyle sulfosuccinate (DES) ou par mélange de surfactants ioniques et non ioniques avec de l'oxyéthylène dissous dans un solvant organique. Les groupes hydrophiles sont dirigés vers le cœur de la micelle et la chaîne hydrophobe vers le milieu extérieur (Figure a). Les micelles directes sont formées dans l'eau par des gouttelettes d'huile entourées par la chaîne hydro-carbonique du surfactant. La chaîne hydrophobe est orientée vers l'intérieur de la micelle et le groupe hydrophile reste en contact avec le milieu environnant (Figure b). (27)

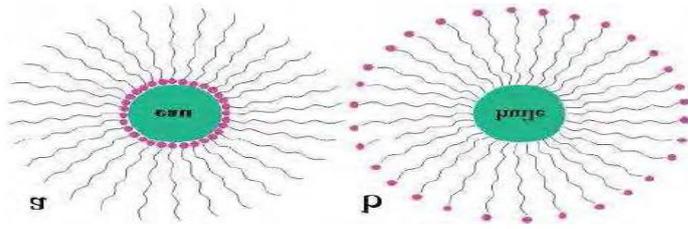


Figure : Structure de la micelle inverse (a) et directe (b).

### 3. Les réactions en phase vapeur CVD : (Chemical Vapor Deposition)

La méthode CVD est un procédé utilisé pour produire des matériaux solides de haute performance, et de grande pureté. Ce procédé est souvent utilisé dans l'industrie du semi-conducteur pour produire des couches minces. Dans un procédé CVD typique, le substrat est exposé à un ou plusieurs précurseurs en phase gazeuse, qui réagissent et/ou se décomposent à la surface du substrat pour générer le dépôt désiré. Fréquemment, des sous-produits de réactions, eux-mêmes en phase gazeuse, sont produits et évacués par le flux gazeux qui traverse en continu la chambre de réaction. (27)

#### C. Les procédés mécaniques :

##### 1. La consolidation et densification :

Lors d'un travail mécanique intense (métaux et intermétalliques uniquement), le processus qui permet de convertir un matériau pulvérulent en une pièce massive comporte deux étapes : une opération de compactage mécanique et une opération de frittage, libre ou sous charge.

- compactage à froid : Opération qui peut s'effectuer soit par pressage à sec, soit, dans les cas difficiles, par addition d'un lubrifiant ou par pressage humide. Le compactage humide est bien adapté aux céramiques et surtout aux oxydes. Avantage du compactage humide : gain considérable sur la température ou le temps de frittage.
- frittage : opération qui permet, par diffusion atomique à chaud, d'établir des ponts de matière entre les grains et ensuite de réduire la porosité.
- par Compression Isostatique à Chaud (CIC) : on réalise ainsi les deux opérations ci-dessus en une seule étape.
- croissance des grains pendant la densification : l'enjeu le plus important pour les procédés de frittage des nanomatériaux est d'éviter la croissance des grains pendant la densification. (30)

##### 2. La forte déformation :

La forte déformation d'un matériau cristallin (métal, céramique) provoque un raffinement de sa structure jusqu'à obtenir une taille de grains de quelques dizaines de nm. Différentes techniques peuvent être utilisées (par torsion, extrusion...). Ce raffinement permet généralement d'améliorer les propriétés de ténacité et de ductilité du matériau. (30)

#### **Annexe 6 :**

Le Tableau suivant présente, pour différents secteurs d'activité économique, quelques exemples de performances recherchées par l'utilisation de nanoparticule. (31)(31)

Transport terrestre, aéronautique et spatial	Accroissement de : performance des moteurs, résistance mécanique et thermique des
--	---

	matériaux, efficacité énergétique, sécurité, confort, matériaux autonettoyants ; réduction de : la corrosion et du poids des composantes, pollution, coûts, consommation de carburant ; développement de détecteurs de glace et de fissures des structures
Électronique et communication	Développement de : mémoires à haute densité, processeurs miniaturisés, écrans plats à éclairage brillant et à très haute définition, polymères et composites nanostructurés permet le développement de composants électroniques souples et de papier électronique
Industrie chimique et matériaux	Développement de : céramiques, pigments, poudres et catalyseurs multifonctionnels, fils plus légers et plus résistants, inhibiteurs de corrosion, couches fonctionnelles (isolation thermique, antiadhésif, antistatique), peintures, vitres et vêtements photoactifs et autonettoyants, membranes pour la séparation des matériaux (traitement d'eau, dialyse), catalyseurs structurés, recouvrements ultra résistants et outils de coupe extrêmement durs
Energie	Amélioration des performances des systèmes de production et d'utilisation de l'énergie ; stockage de l'hydrogène ; nouvelle génération de cellules photovoltaïques ; production de batteries et cellules de combustion ; optimisation de l'efficacité de l'énergie éolienne, fenêtres intelligentes, de barrières thermiques, matériaux isolants plus efficaces
Métallurgie	Amélioration des propriétés des métaux, diminution du frottement et de l'utilisation de lubrifiants lors de la fabrication des pièces ; outils de coupe plus durs et plus résistants à l'abrasion et à la corrosion, et amélioration des performances d'usinage

## **Annexe 7 :**

### **Les techniques d'élaborations des matériaux à gradient des propriétés**

#### **C. Coulage en bande (Tape Casting) :**

Le coulage en bande consiste à couler une barbotine de poudres fines en suspension aqueuse ou non-aqueuse sur un support plan en couches minces et régulières. Selon les cas, c'est soit la lame qui est animée d'un mouvement de translation, soit le support qui se déplace sous la lame (figure). Les produits obtenus sont des feuillets avec des épaisseurs contrôlées (25-1000µm). Après un raffermissement de la pâte, les feuillets sont démoulés et ensuite découpés. (23)

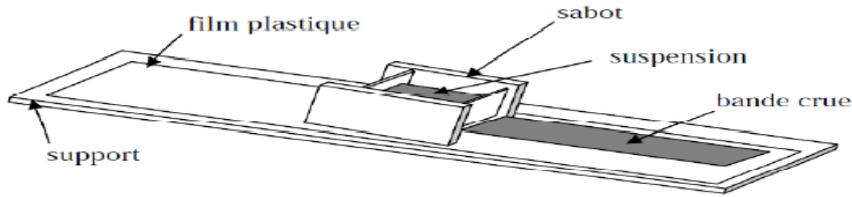


Figure : Principe de la méthode coulage en bande.

L'un des plus anciens travaux sur l'étude de cette technique a été publié par Howatt et al.1947, et depuis d'autres travaux ont été réalisés. Ce procédé est devenu une technique économique pour la production des substrats céramiques de type  $Al_2O_3$  et surtout pour les condensateurs à base de  $BaTiO_3$ . On peut d'ailleurs remarquer qu'il s'agit déjà de F.G.M puisqu'il faut empiler des couches conductrices (métaux rares) avec des couches diélectriques ( $BaTiO_3$  principalement).

#### **D. Coulage séquentiel en barbotine (Slip Casting) :**

Le coulage en barbotine (slip casting) consiste à couler une suspension dans un moule poreux qui va drainer le liquide grâce aux forces capillaires, laissant un tesson (couche de poudre compacte) sur la surface du moule. Après séchage, on obtient le corps en cru. Donc le coulage se décompose en deux étapes essentielles :

- formation du tesson ou "prise" ;
- consolidation du tesson ou "raffermissement".

La filtration, c'est à dire la formation du tesson lors du coulage, peut être considéré comme un processus d'élimination d'une partie de l'eau de la barbotine, Cette eau migre à travers la couche de tesson déjà formée, sous l'effet :

- Du pouvoir de succion du plâtre (coulage classique)
- Ou d'une pression appliquée sur la barbotine (coulage sous pression)

Dans le cas de la fabrication de multicouches, après la formation du premier tesson, le dépôt de la deuxième couche s'effectue de manière telle que la barbotine ne pénètre pas dans le tesson formé. Ce procédé est successivement reproduit pour les autres couches. (23)

#### **E. Projection plasma :**

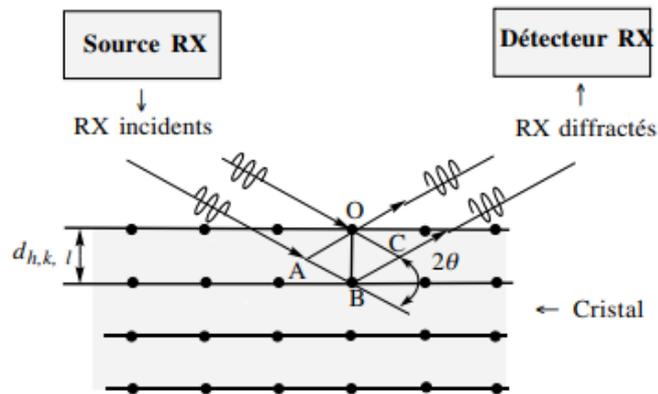
Un gaz soumis à une forte température (par exemple celle d'un arc électrique), se transforme en un état ionisé (plasma). Cette transformation est accompagnée d'un dégagement de chaleur important. Si une particule de céramique se trouve dans cet environnement, elle se fond totalement ou superficiellement, ce qui permet de la situer sur un substrat.

La projection plasma des particules des divers matériaux est devenue une méthode très utilisée pour fabriquer des FGM. L'équipement relativement simple, le rendement élevé du dépôt des particules sur des substrats à géométrie compliquée, les performances des surfaces en fonctionnement et la compatibilité des céramiques avec les métaux sont les avantages essentiels de cette technique . (23)

## **Annexe 8 :**

Loi de Bragg :

Lorsqu'un faisceau de rayons X monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  irradie la surface d'un cristal, il est diffracté selon la loi de Bragg. Sur chaque famille de plan cristallographique (hkl) de distance interréticulaire  $d_{hkl}$ , le faisceau est diffracté si l'angle d'incidence  $\theta$  est tel que (relation de Bragg) :

$$2d_{hkl} \sin\theta = \lambda \quad (4)$$


**Figure** Conditions de diffraction des rayons X (RX) sur les plans cristallins (loi de Bragg).

En principe, on devrait observer pour chaque série de plans (hkl) du cristal,  $n$  angles de réflexion bien déterminés. En pratique les réflexions d'ordre supérieur à l'unité ( $n > 1$ ) se confondent avec les réflexions engendrées par les plans réticulaires différents caractérisés par un espacement  $d_{hkl} = d_{h',k',l'} n$ .

Une structure cristalline contient un très grand nombre de plans réticulaires. Pour une structure cristalline déterminée, on peut a priori calculer  $d_{hkl}$  en fonction des paramètres de la maille et de la valeur des indices de Miller de la famille de plans considérés. Les valeurs de  $d_{hkl}$  sont reliées aux angles de diffraction par la loi de Bragg. (1)

Plusieurs sources de rayons X sont actuellement disponibles pour des expériences de diffraction : le tube à rayons X (la source la plus répandue dans les laboratoires), l'anode tournante et le rayonnement synchrotron. Ce dernier est produit à l'aide d'un accélérateur de particules et nécessite l'utilisation d'installations « grands instruments » demandant une très importante infrastructure. (37)

Remarque :

La distance interréticulaire, c'est-à-dire la distance entre deux plans (hkl), est aussi égale à la distance de l'origine au plan de plus bas indice, soit  $d$  dans les systèmes cubiques.

Pour déterminer la structure des solides cristallins à l'échelle de l'atome, il est indispensable d'utiliser des rayonnements qui ont une longueur d'onde voisine ou inférieure à la distance interatomique, c'est-à-dire des radiations comme les rayons X ( $\lambda \approx 0,1$  nm), les faisceaux d'électrons d'énergie élevée ( $\lambda \approx 0,005$  nm) ou encore les neutrons thermiques ( $\lambda \approx 0,1$  nm). (1)

## Résumé

La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine de plusieurs révolutions dans l'histoire des technologies. Les âges de la préhistoire sont d'ailleurs définis par les matériaux employés : Age de la pierre, Age du bronze où celui du fer. Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante augmentation. En effet, la science des matériaux permet d'étudier les matériaux adaptés à chaque nouvelle application.

Les matériaux ont une importance majeure dans le secteur d'aéronautique, ils doivent respecter différents critères : résistance mécanique, résistance à la fatigue, élasticité, densité, résistance à la corrosion et sans oublier des coûts compétitifs. Un bon indicateur de l'adéquation d'un matériau aéronautique est le rapport : propriétés mécaniques/densité dont les valeurs doivent être élevées.

Avec l'évolution des matériaux au sein de ce secteur, la recherche s'est concentrée sur deux points : l'augmentation de leurs résistances spécifiques et l'amélioration de leurs faisabilités de fabrication.

Les premiers modèles de l'histoire de l'aviation étaient en bois et tissu, bien que leurs densités soient faibles, certains bois sont assez résistants, cependant ce matériau réagit négativement à l'humidité. Le métal a été rapidement utilisé pour la structure de l'aéronef, plus particulièrement l'acier et l'aluminium. L'aluminium pur a des propriétés assez réduites par rapport au secteur d'aéronautique, c'est pour cette raison qu'on l'utilise dans des alliages. Les avancées dans le développement de ses alliages en ont fait le matériau idéal pour l'aéronautique. Sur certaines pièces, comme le réacteur il est nécessaire l'emploi des matériaux réfractaires, généralement des cermets mais leur majeure limitation est le comportement fragile des cermets.

Ces dernières années, les matériaux non métalliques ont pris de plus en plus d'importance, en particulier les matériaux composites. Ceux que l'on retrouve le plus dans l'aéronautique sont à fibres de carbone ou de verre. Il existe une branche de la recherche dans l'utilisation des nanomatériaux dans la construction d'aéronefs. Le but est l'obtention d'une amélioration structurelle et fonctionnelle, qui se complète par une réduction du poids.

Le titre de notre sujet était « Elaboration et caractérisation mécanique d'un composite élaboré à partir d'un mélange de poudres de nanoparticules Aluminium-Carbures de Chrome. »

Le choix de notre sujet était fait par rapport au grand développement des composites surtout dans le secteur aéronautique, l'emploi des composites devient de plus en plus indispensable, surtout sans le côté structural de l'avion.

Cependant les composites sont peu utilisés dans les réacteurs d'avion à cause de leur faible résistance aux hautes températures. Les matériaux utilisés sont du titane et les super alliages, qui coûtent très cher et sont relativement lourds par rapport aux composites.

De ce fait venait l'idée de notre thème, qui consiste à voir l'effet de renforcer un alliage d'aluminium, qui a des caractéristiques intéressantes, et une densité faible relativement par un renfort nano, le fait qu'il soit de cette taille diminue la fraction volumique à utiliser et fait intervenir aux caractéristiques plus intéressantes de la céramique. Afin d'étudier la possibilité d'intégrer des nanocomposites à base de alliages moins cher, de performances SUFFISANTES et de densité faible.

Dû à la crise mondiale associée au COVID-19, notre projet n'a pas pu être réalisé et on s'est contenté de modéliser une plaque FGM en se basant sur la théorie des stratifiés. Le titre de notre thème est devenu Caractérisation et analyse mécanique d'un composite à base de nanoparticules Aluminium-Carbures de Chrome.

Un matériau FGM est un composite, mais contrairement à l'autre composite, qui consiste à améliorer les performances thermique d'un alliage, un matériau FGM consiste à assembler les propriétés de deux matériaux distinctes en un seul matériau multifonctionnel.

Dans ce mémoire, nous avons également montré les étapes à poursuivre afin d'élaborer un nanocomposite et aussi le caractériser. Les matériaux de base sont pris sous forme de poudre il existe plusieurs méthodes d'élaboration, celle choisie est le frittage en phase liquide. Ce choix était basé sur ce qu'on dispose au niveau des laboratoires.

Après avoir mis la poudre de la céramique à l'échelle nano, la détermination de la microstructure des constituants est faite par l'utilisation de MEB et DRX. Le frittage en phase liquide se fait à une température supérieure à 700°C, après la mise en forme des poudres par compression. La coule de la masse fondue se fait dans un moule d'éprouvettes normalisées destinés aux essais mécaniques.

Après le refroidissement du matériau, un traitement post-traitement métallographique se fait pour préparer les échantillons, à l'observation métallographique, cette observation est suivie par des essais mécaniques et de caractérisation thermique.

Après la caractérisation de notre matériau, l'étude de l'influence de la fraction volumique sur les paramètres du matériau final.

Ses étapes n'ont pas vu le jour, une modélisation d'une plaque FGM était faite, en se basant sur les lois de Love-Kirchhoff et théorie des plaques du premier ordre.

Ce mémoire se divise en trois grandes parties. La première partie est une recherche bibliographique, qui donne les notions de bases nécessaires à la compréhension de ce travail. La deuxième partie est la partie expérimentale qui donne le parcours à suivre afin d'élaborer un matériau nanocomposite. Et enfin le dernier chapitre est la modélisation d'une plaque FGM en utilisant le programme de calcul Maple. En tout ce mémoire contient six chapitres comme suit :

- Chapitre 1 généralités sur la science des matériaux, l'aluminium, and les céramiques et ainsi les matériaux composites.
- Chapitre 2 généralités sur nanomonde et nanomatériaux.
- Chapitre 3 caractérisations microscopiques et macroscopiques des matériaux.
- Chapitre 4 élaboration et caractérisation d'un nanocomposite à base d'aluminium et carbure de Chrome.
- Chapitre 5 la modélisation d'une plaque FGM.
- Chapitre 6 interprétations des résultats et conclusion générale.

## Abstract

The mastery of new materials was originally from several revolutions in the history of technologies. The prehistory era are defined by the used materials : the Stone Age , the Bronze Age or the iron one . Nowadays, the amount of materials or the number of references is sizable and increasing constantly. Apparently , the science of materials allows to explore the adapted materials in each new application.

The materials have a major prominence in the sector of aeronautics. They ought to respect different criteria : mechanical resistance , sintering, elasticity, density , resistance to corrosion and competitive costs. a good indicator for adequacy of an aeronautical material is the proportion : mechanical properties/ density in which the values should be raised.

With the evolution of the materials inside this sector , the research focused on two points : the increase of their specific resistances and the improvement of their manufacturability.

The first models of the aviation history were made of wood and fabric. though their densities are weak , some woods are quite resistant . However , this material reacts negatively to moisture . The metal was quickly used for the structure of aircraft . More particularly steel and aluminum. The pure aluminum has a limited properties in proportion to the sector of aeronautics. For this reason we use it in the alloys . The progress in the development of its alloys have made the material ideal for aeronautics. In some pieces, the use of refractory materials is necessary in the reactor. Generally, the cermet but its major limitation is the constitutive of this brittle material.

These last years, non metallic materials have taken more and more importance. In particular composite materials. Those we find the most in aeronautics are carbon fiber or fiberglass. It exists a branch of research in the use of nanomaterials in the construction of aircrafts. The aim is the acquirement of the structural and functional improvement that completes weight reduction.

The title of our subject was « The mechanical elaboration and characterization of a designed composite from a mixture of nanoparticules powder, aluminum -carbures de chrome. »

The choice of our theme was done according to a great development of composite especially in the sector of aeronautics. The use of composite becomes increasingly indispensable. Mainly the structural side of the plane.

The composite are less used in the reactor because of their poor resistance of high temperature. The used materials are Titanium and Superalloys that are costly and relatively heavy compared to composite.

The idea came through this fact of our theme that consists to see the effect strengthen aluminum alloy which has interesting characteristics. In addition, a weak density comparatively by the nano reinforcements.

The fact that It is this size decreases the volumic fraction to use and intervene to the most interesting features of the ceramic. To study the possibility to integrate nanocomposite as a base of less expensive alloys, of sufficient performances and low density.

Due to worldwide crisis associated to Covid-19, our project could not be achieved and we contented to model an FMG plate and lean on the stratified theory. The title of our topic has become characterization and mechanical analysis of composite as a base of nanoparticles aluminum-carbures de chrome.

FGM material is also a composite unlike the other composite that consists to enhance the alloy's thermic performances. FGM material consists to assemble the properties of two distinct materials in once multifunctional material.

In this Research paper, we have showed steps to pursue in order to elaborate a nanocomposite and characterize it. The materials as a base are taken in the form of powder . It exists several methods of elaboration. The chosen one is the frittage of liquid phase. This choice was based on what we dispose on a par with laboratories.

After we put on the ceramic powder on the nano ladder, the determination of the microstructure constituents is made by the use of MEB and DRX. The frittage of liquid phase is made on a higher temperature at 700°C, after the adjustment of the powders by compression. The flood of the molten Mass is made in a normalized test-tube cast consigned to mechanical experiments.

After the cooling of the material, a metallographic post treatment is made in Order to prepare samples to metallographic observation. This observation is followed by mechanical experiments and thermic characterization. After the characterization of our material , the study of influence of the volumic fraction on the variables of the final material.

These steps haven't seen the day, the modeling of FGM plaque was made by focusing on the law of love-kirchhoff and the theory of plaques of the first order.

This research paper is divided in three major parts. The first part is the bibliographic research that provides necessary bases notions to the understanding of this work. The second part is the experimental portion which accord the course to follow so that to elaborate nanocomposite material. Finally, the last chapter is the modeling of FGM plaque by using "maple calculus program ". In all this research, paper contains six chapters as follow:

Chapter 1: generalities about the science of materials, aluminum, ceramics and composite materials.

Chapter 2: generalities about nanomaterials and nanomaterials.

Chapter 3: microscopic and macroscopic characterizations of the materials.

Chapter 4: elaboration and characterization of the nanocomposite as a base of aluminum and chromium carbide.

Chapter 5: the modeling of FGM coating.

Chapter 6: interpretation of the results and general conclusion.