

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etude  
Pour l'obtention du Diplôme Master 2 en ingénierie des matériaux  
et des surfaces

**Titre : Les composites à matrices métalliques**

Proposé et encadré par :  
**Chiker Nabil**

Réalisé par :  
**Remati Hamza**  
**Ihamouine Noureddine**

Année universitaire 2019/2020

## Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Département de Mécanique de l'Université Saad Dahlab de Blida.

Selon la tradition, et à travers cette page de remerciements, nous tenons à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail.

Nous remercions Monsieur **Temmar Mustapha** et Monsieur **Chiker Nabil** pour avoir accepté de diriger cette thèse, et dont l'aide précieuse nous été indispensable sur le plan scientifique et humain.

Nous voudrions remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Nos très cordiaux remerciements vont aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre formation.

## **Dédicaces**

Je dédie ce travail tout particulièrement aux personnes qui me sont les plus chères au monde ; Mes très chers parents pour leur patience, soutien et confiance,

Ma mère n'a pas cessé de prier pour moi, m'encourager et me soutenir et qui a su m'entourer de tout son amour et son affection,

Mon père qui s'est sacrifié afin que rien n'entrave le déroulement de mes études,

Je dédie ce travail également à mes frères et à tous les membres de ma famille,

Bien sur à mes amis et collègues de la promotion sortante,

## Résumé

Dans le but d'étudier Les composites à matrice métallique, un travail a été mené consistant à examiner les caractéristiques générales des méthodes de traitements des composés à matrice minérale ainsi que l'effet des particules céramiques sur leurs propriétés.

Des informations et des résultats ont été recueillis à partir d'articles et de revues académiques publiés sur Internet.

La synthèse de ce qui a été recueillie indique une excellente résistance à l'usure ainsi que des fortes liaisons atomiques de la matrice métallique.

L'étude nous a amené à conclure qu'une excellente connexion peut être formée entre le composé à matrice métallique et la céramique.

**Mots Clés: CMMp, Renforts, Matrice, Infiltration, frittage, propriétés mécaniques.**

## Table des matières

List des figures

List des tableaux

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les composites à matrice métallique CMMp.....</b>	<b>3</b>
1. Historique .....	4
2 .Définition .....	6
3. Types de composites à matrice métallique.....	7
4 .Constituant des matériaux composite.....	9
Matrice .....	9
Resines thermodurcissables.....	9
Resines thermoplastiques .....	9
Additifs.....	10
Renforts.....	10
Fibres de verre .....	11
Fibres de carbone .....	11
Fibre aramides .....	11
Fibre céramique.....	11
Caracteristiques mecanique des Fibre .....	12
<b>Chapitre II : Technique d'Elaboration des CMMp.....</b>	<b>13</b>
1. Fonderie.....	14
Procédé de fonderie.....	14

Agitation/fonderie par gravité .....	14
Fonderie centrifuge .....	15
Fonderie par pression .....	16
Fonderie sous vide sous pression .....	16
2. Infiltration.....	18
Introduction.....	18
Processus d'infiltration .....	18
Infiltration spontanée.....	19
Faire fondre l'infiltration.....	20
Infiltration sous pression .....	21
Infiltration sous pression de gaz.....	22
Infiltration sous pression sous vide .....	23
Infiltration de vapeur .....	23
Infiltration centrifuge à haute pression.....	24
Avantages limites et application de l'infiltration.....	25
3. La métallurgie des poudres.....	27
Elaboration de la poudre .....	28
Les différentes voies d'élaboration .....	28
Les éléments d'addition .....	29
Mélange.....	30
Procédés de mise en forme à partir des poudres .....	31
Compression uniaxiale .....	31
Compression isostatique à froid .....	32

Compression isostatique à chaud .....	33
Le frittage .....	35
Paramètres de frittage .....	36
Atmosphère de frittage .....	36
Température et durée du frittage .....	36
Différents types de frittage .....	37
Frittage en phase solide .....	38
Frittage en phase liquide.....	38
<b>Chapitre III : l'impact des particules de céramique sur Les propriété des CMMp .....</b>	<b>39</b>
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>43</b>

## List des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Armatures types utilisés dans les composites à matrice métallique .....	8
<b>Tableau I.2:</b> Caractéristiques mécaniques des fibres .....	12
<b>Tableau II.1:</b> Mérites et démérites de la métallurgie des poudres .....	28
<b>Tableau II.2:</b> Comparaison des méthodes d'ajout des éléments d'alliage (Höganäs AB 2013a, Puente & François 2011) .....	30
<b>Tableau II.3:</b> Mérites et démérites du pressage isostatique à chaud (CIC). est couramment utilisé pour éliminer les défauts et pour la céramique de synthèse de haute densité .....	34

## List des Figures

<b>Figure I.1:</b> Différents types de composites à matrice métallique.....	7
<b>Figure I.2:</b> Types de matrice .....	9
<b>Figure I.3:</b> Types de renfort .....	10
<b>Figure 1.4:</b> Différents types de renforts .....	12
<b>Figure II.1:</b> fonderie par gravité.....	14
<b>Figure II.2:</b> fonderie centrifuge.....	15
<b>Figure II.3:</b> Fonderie par pression.....	16
<b>Figure II.4:</b> Fonderie sous vide .....	17
<b>Figure II.5:</b> Illustration schématique du processus d'infiltration.....	18
<b>Figure II.6 :</b> Infiltration spontanée.....	20
<b>Figure II.7:</b> Infiltration de fonte.....	21
<b>Figure II.8:</b> Infiltration sous pression .....	22
<b>Figure II.9:</b> Infiltration sous pression de gaz .....	22
<b>Figure II.10:</b> Infiltration sous vide.....	23
<b>Figure II.11:</b> Infiltration de vapeur .....	24
<b>Figure II.12:</b> Infiltration centrifuge haute pression.....	25

<b>Figure II.13:</b> Micrographies optiques de composites d'aluminium 7075 renforcés sélectivement avec des fibres de carbone multifilament (a) et du papier mica (b) .....	26
<b>Figure II.14:</b> Étapes du procédé de métallurgie des poudres .....	27
<b>Figure II.15:</b> Procédé d'atomisation (Puente & François 2011) .....	28
<b>Figure II.16:</b> Les différentes phases d'obtention du comprimé .....	32
<b>Figure II.17:</b> Schéma du pressage isostatique à froid (CIP) .....	33
<b>Figure II.18:</b> Schéma du pressage isostatique à chaud (CIC) .....	34
<b>Figure II.19:</b> Évolution de la densité relative au cours des étapes de densification .....	36
<b>Figure II.20:</b> Les différents types de frittage .....	37
<b>Figure II.21:</b> Représentation schématique des trois grandes étapes du frittage en phase liquide .....	38
<b>Figure III.1:</b> Micrographie OM montrant la microstructure sur la section transversale de vue d'ensemble du revêtement TiC/(NiAl–Ni <sub>3</sub> Al) revêtu de laser .....	40
<b>Figure III.2:</b> Trace d'usure du composite Al/Ni <sub>3</sub> Al testé à (a) 89 N and (b) 134 .....	41
<b>Figure III.3:</b> Profil de micro-dureté des CMM Ni/TiC préparé par DLF .....	42
<b>Figure III.4:</b> Profil de perte de poids des CMM Ni/TiC préparé par la DLF .....	42

## Introduction générale

La croissance technologique et industrielle actuelle dans le monde est très rapide, chaque jour qui passe, de nouveaux progrès sont accomplis, avec une rude concurrence entre les pays et parfois entre des organismes du même pays.

Pour que Les industriels puissent survivre sur le marché ils sont condamnés à améliorer continuellement leurs produits en coût et en qualité. Pour le faire un des principaux points à dominer est le choix des matériaux utilisés. Ainsi des organismes dédiés exclusivement à la recherche ont été mis en place par les états et les organismes industriels.

Les chercheurs ont abouti à des matériaux dont les caractéristiques étaient inimaginables il y a à peine quelques décennies, entre autre Les composites à matrice métallique.

Les composites sont constitués de deux ou plusieurs matériaux physiquement et/ou chimiquement distincts. Il y en a trois composants d'un composite : matrice, renforcement, et l'interface entre la matrice et renforcement. Une matrice est une phase continue de composites et sert à maintenir les renforts dans une orientation prédéterminée. Un renfort est un matériau plus fort distribué dans la matrice. La matrice et les renforts sont chimiquement liés ou mécaniquement verrouillés ensemble. La matrice, les armatures et l'interface déterminent les caractéristiques d'un composite. Alors que les caractéristiques d'un matériau de matrice sont modifiées dans le processus de fabrication composite, ceux des matériaux de renfort restent les mêmes sauf dans de rares cas de traitement à très haute température.

Le but de notre travail est d'élaborer des composites à matrice métallique (CMMp), et étudier l'impact des particules de céramique sur les propriétés des CMMp.

Ce mémoire est organisé selon 3 chapitres:

Le premier chapitre présente en premier partie définitions générales sur composites à matrice métallique et leurs types et en deuxième partie les Constituant des matériaux composites.

Le deuxième chapitre présente les différentes techniques pour les élaborer. : Fonderie et Infiltration et frittage.

Le troisième chapitre a pour objectif de présenter les résultats expérimentaux antérieurs (bibliographie) concernant l'impact des particules de céramique sur les propriétés des CMMp.

# **Chapitre I: généralités sur les composites à matrice métallique CMMp**

## **1. Historique des composites à matrice métallique :**

L'évolution des matériaux composites (y compris les matrices de polymère, de céramique et de métal) peut être divisée en quatre générations différentes

- Première génération (années 1940) : polymères renforcés de fibres de verre (PRFI).
- Deuxième génération (années 1960) : Composites haute performance à l'ère post-Sputnik.
- Troisième génération : la recherche de nouveaux marchés et la synergie des propriétés (années 1970 et 1980).
- Quatrième génération (années 1990) : hybrides et nano composites. Il ressort de la classification elle-même que la matrice métallique n'a pas été considérablement développée au cours de la première génération de développement de composites.

### **Deuxième génération (1960): Composites haute performance à l'ère post-Sputnik:**

Le lancement du satellite soviétique Spoutnik en 1957 a été un événement majeur dans l'histoire des CMM. Cela a provoqué le début de la « course à l'espace » entre les superpuissances. Le vaisseau spatial devait être construit avec des matériaux plus légers que les métaux monolithiques et plus résistants que les composites et aussi résister aux températures élevées jusqu'à 1500 °C qui se développent pendant la rentrée de l'engin spatial. Cincinnati Développemental Laboratories a combiné de l'amiante et de la résine phénolique pour une utilisation dans un matériau nosecone de rentrée possible. C'est au cours de cette période que les scientifiques ont commencé à examiner les composites à matrice métallique pour trouver une solution. Avant ce développement, peu de travaux ont été réalisés dans ce domaine, à moins d'un effort pour renforcer le cuivre avec des fils d'armature en acier. La course à l'espace a inspiré les scientifiques et les innovateurs à développer des fibres de carbone et de bore.

**Renforts carbone et bore :** Les fibres de graphite (carbone) ont été développées à partir de rayonne et les fibres de bore à haute résistance et rigidité ont été développées par Texaco. La fibre de carbone menait la course en raison de ses capacités de traitement plus faciles et de son coût inférieur. Les fibres de graphite ont été utilisées pour renforcer les composites à matrice polymère en raison de la réactivité du carbone avec le magnésium et l'aluminium.

Cependant, le développement de revêtement stable à l'air a empêché la réaction entre le carbone et le métal qui a abouti au développement de composites Graphite-Magnésium et Graphite Aluminium. L'application principale du Bore était dans les systèmes militaires où l'accent était mis sur le rendement et le coût moindre d'un problème. Mais il y avait trois problèmes. (i) Le bore a dû être déposé sur un fil de tungstène qui a été utilisé comme substrat (ii) Coût élevé (iii) Rayon serré ne pouvait pas être plié par le filament. En 1969, des gouvernails bore-époxy ont été installés dans des avions F-14 fabriqués par General Dynamics. Le bore a réagi avec la matrice métallique au-dessus de 600 °C. Il a donc fallu mettre au point un revêtement avant que les métaux renforcés de bore ne deviennent une réalité pratique.

### **Troisième génération (années 1970 et 1980) :**

La recherche de nouveaux marchés et la synergie des propriétés Une fois la course à la lune terminée, les scientifiques ont commencé à penser à réutiliser le vaisseau spatial comme MIR de l'U.S.S.R, Skylab et la navette spatiale. Un engin spatial réutilisable est soumis à des variations de température répétées. Cela a forcé les scientifiques à rechercher des matériaux qui ont la combinaison de propriétés comme une rigidité et une résistance élevée, une résistance à haute température et une faible co-efficacité de la dilatation thermique (C.T.E) afin que le matériau ne se contracte pas et ne se développe pas beaucoup pendant les périodes de cycle thermique. De nouvelles fibres ont été développées au milieu des années 1970 et des revêtements pour les fibres de carbone et de bore les ont rendues possible pour les matrices métalliques. Si les particules de SiC sont combinées avec une matrice métallique comme l'aluminium, cela réduit le C.T.E du mélange. De cette façon, le C.T.E du composite peut être contrôlé en modifiant la fraction volumique de l'armature. Même une expansion thermique nulle peut être produite en combinant des matrices et des renforts qui ont une expansion thermique mutuellement compensatrice. Cette propriété peut être faite dans des applications qui nécessitent une grande stabilité dimensionnelle, par exemple des applications spatiales. Les fibres continues de SiC, de bore ou de carbone augmentent considérablement le module du composant. Si on ajoute 30% de fibre de carbone continu à l'aluminium, le module du métal peut doubler.

Le principal obstacle pour les composites à matrice métallique qui empêche l'entrée sur les marchés de consommation en rapide évolution (PGC) est le coût. Une exception qui peut être citée est le domaine des équipements sportifs, où Duralcan (Al renforcé avec 10% de

particules  $Al_2O_3$ ) et Al renforcé avec 20% de particules SiC sont utilisés dans les cadres de vélo pour un faible poids et une grande résistance. Ils sont coûteux et utilisés dans les vélos de montagne haute performance

### **Quatrième génération (1990) :**

Hybrides et nanocomposites : Les matériaux hybrides combinent des composants organiques et inorganiques à l'échelle moléculaire. Historiquement, l'étude de la bio-minéralisation a attiré l'attention des scientifiques sur les possibilités des structures hybrides. Cela a mené à un nouveau domaine scientifique appelé biomimétisme. Des métaux comme l'aluminium sont combinés avec des nano-particules de SiC résultant en des propriétés mécaniques améliorées. Les scientifiques utilisent le concept des os pour s'inspirer, un cas évident de biomimétisme [1].

## **2. Définition des composites à matrice métallique**

Si nous considérons le terme composite avec sa signification la plus large, alors un morceau commun de métal (polycristallin) est un composite de nombreux grains. Par conséquent, il est nécessaire de restreindre la définition du terme composite et nous utiliserons les critères suivants pour désigner un composite

- Il doit s'agir d'une combinaison d'au moins deux matériaux chimiquement distincts. avec une interface distincte séparant les constituants.
- Les matériaux distincts formant le composite doivent être combinés de façon tridimensionnelle. (Les stratifiés comme les métaux plaqués ou les sandwichs en nid d'abeille ne sont pas considérés comme des matériaux composites de base si le même métal est utilisé. partout.)
- Il devrait être créé pour obtenir des propriétés qui ne seraient pas autrement. atteint par l'un des constituants individuels.

Les composites à matrice métallique, en général, se composent d'au moins deux composants : un est évidemment la matrice métallique (dans la plupart des cas, un alliage est la matrice métallique), et le second composant est un renfort (en général, un composé intermétallique, un oxyde, un carbure ou un nitrure). Dans la production du composite, la matrice et le renfort sont mélangés. C'est pour distinguer un composite. à partir d'un alliage à deux phases ou plus, lorsque la deuxième phase se forme sous forme de particules, de réactions eutectiques ou eutectoïdes, etc. En d'autres termes, un composite commence

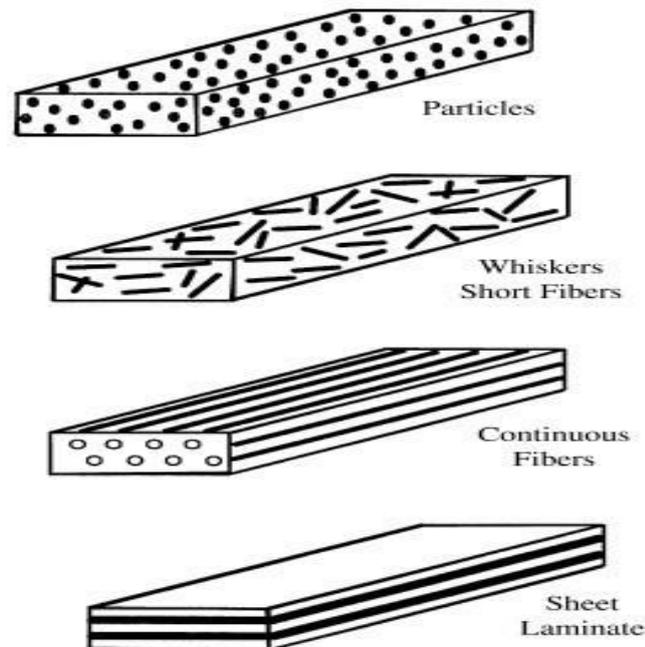
initialement comme des composants distincts, c'est-à-dire la matrice métallique et le renforcement. Dans tous les cas, la matrice est définie comme un métal, mais un métal pur est rarement utilisé comme matrice ; il s'agit généralement d'un alliage [2].

### 3. Types de composites à matrice métallique

Tous les CMM ont un métal ou un alliage métallique comme matrice. Le renfort peut être métallique ou céramique. Dans un cas inhabituel, le renfort se présente sous la forme d'un PMC renforcé de fibres (une feuille d'époxy renforcé de fibres de verre ou d'époxy renforcé de fibres d'aramide). Il existe quatre types de CMM :

- CMM renforcés de particules
- CMM à fibres courtes ou à moustaches renforcées
- CMM continus renforcés de fibres ou de feuilles
- CMM stratifiés ou stratifiés

La figure I.1 illustre schématiquement ces différents types de CMM. Le lecteur peut facilement visualiser que les composites continus renforcés de fibres seront les plus anisotropiques de tous. Le tableau I.1 présente des exemples de certains renforts importants utilisés dans les CMM, ainsi que leurs diamètres.



**Figure I.1:** Différents types de composites à matrice métallique

Type	Diamètre	Exemples
Particle	1-25 $\mu\text{m}$	SiC ,Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , BN, B <sub>4</sub> C, WC
Short fiber or whisker	1-5 $\mu\text{m}$	C, SiC ,Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub>
Continuous fiber	3-150 $\mu\text{m}$	SiC ,Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,C,B,W, Nb-Ti,Nb <sub>3</sub> Sn
Nanoparticle	<100 nm	C , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiC
Nanotube	<100 nm	C

**Tableau 1.1:** Types d'armatures utilisées dans les composites à matrice métallique

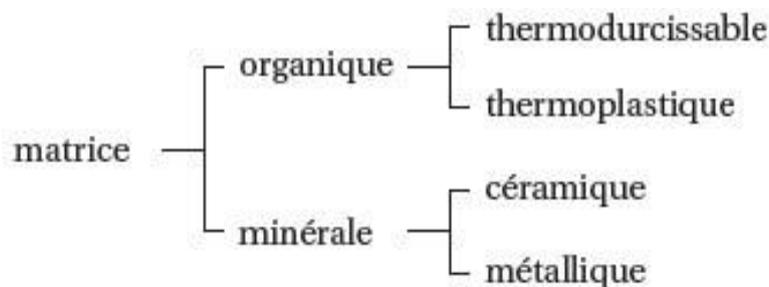
Les CMM renforcés de façon discontinue ou discontinue (on utilise le terme CMM renforcés de façon discontinue pour indiquer que les CMM ayant des renforts sous forme de fibres courtes, de moustaches ou de particules) ont pris une importance particulière pour les raisons suivantes :

- Les composites renforcées de particules sont peu coûteuses par rapport aux composites renforcées de fibres continues. Le coût est un élément important et essentiel pour un grand volume d'utilisation.
- Le traitement par coulée ou par métallurgie des poudres, suivi du traitement secondaire conventionnel par laminage, forgeage et extrusion, peut être utilisé.
- Des températures d'utilisation plus élevées sont possibles qu'avec le métal non renforcé
- Module et résistance améliorés.
- Stabilité thermique accrue.
- Meilleure résistance à l'usure.
- Propriétés relativement isotropes par rapport à celles des composites renforcés de fibres. Dans la vaste catégorie des composites renforcés discontinuement, les CMM fabriqués par coulée de métal liquide sont moins chers à produire que les composites de métallurgie des poudres. [3]

## 4. Constituant des matériaux composites

### Matrice

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure I.2.



**Figure I.2:** Types de matrice

### Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556. Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible.

### Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle

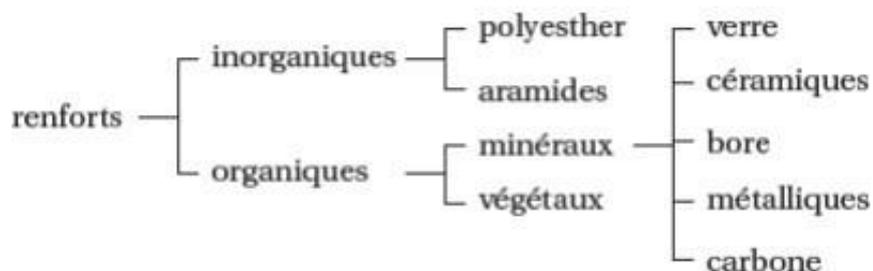
(PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible.

## Additifs

Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques (charges renforçantes, ex : charges sphériques creuses 5 à 150µm). Des charges non renforçantes peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices en résine. Des 3 additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites.

## Renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus). La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure I.3.



**Figure I.3:** Types de renfort

## **Fibres de verre**

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance–prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.

## **Fibres de carbone**

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres précurseurs utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone. Quelques exemples de fibres de carbone classiquement rencontrées : T300, T800, MR40, TR50, IM6, IM7, GY, M55J.

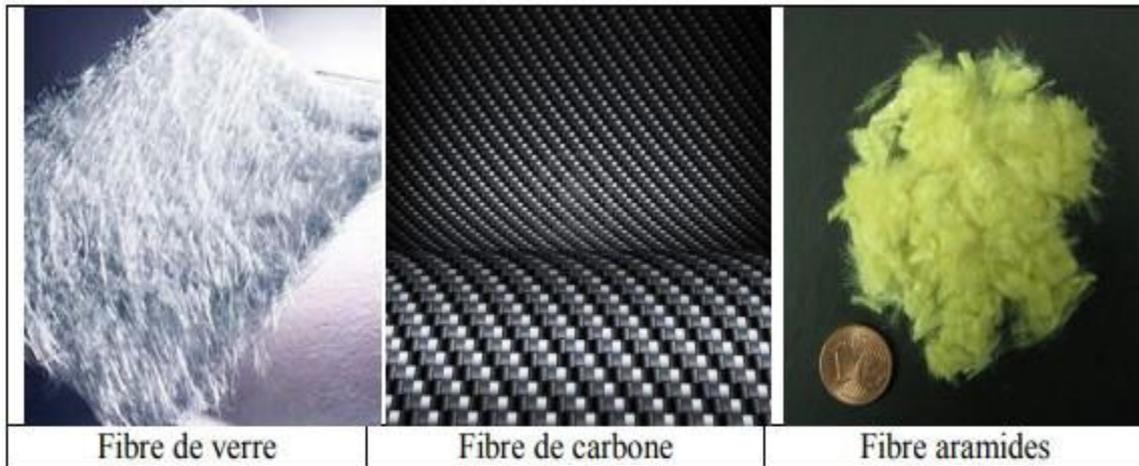
## **Fibre aramides**

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbonés mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymages des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre–kevlar ou carbone–kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis). Quelques exemples de fibres aramides : KEVLAR (Dupont de Nemours, USA), TWARON (Akzo, Allemagne-Hollande), TECHNORA (Teijin, Japon).

## **Fibre céramique**

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- fibres de Carbure de Silicium
- fibres de Bore
- fibres de Bore carbure de silicium



**Figure I.4:** Différents types de renforts

#### 4.2.5. Caractéristiques mécanique des Fibres

Il existe différents types de fibres. Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible et celles à forte résistance ont un module faible [4].

Renforts	$\rho(\text{Kg/m}^3)$	$\sigma_t(\text{MPa})$	$\sigma_c(\text{MPa})$	E(GPa)
AS4	1800		3599	235
T300	1700	1,2	3654	231
IM6		0,88	1460	
IM5	1800		5171	310
Kevlar	1440	2,5	3620	124
Verre E	2580	3,5	3450	69

**Tableau I.2:** Caractéristiques mécaniques des fibres

# **Chapitre II : Technique d'Elaboration des CMMp**

# 1. Fonderie

## Procédé de fonderie

La fonderie est l'un des processus de fabrication primaires et établis qui sont capables de produire des formes complexes dans une variété de matériaux économiquement. Dans le processus de fonderie, le métal fondu est versé dans un moule ou une cavité et permis de se solidifier pour former une forme prédéfinie forme. Les applications principales comprennent le lit de tour, la structure de la fraiseuse, composants du moteur IC, etc. Les composants coulés ont généralement une résistance à la compression élevée. Cette méthode est considérée comme le moins cher parmi tous les procédés de fabrication

## Agitation/fonderie par gravité

La fonderie par agitation est un processus de mélange de particules de céramique en phase dispersée ou de fibres courtes avec un métal matriciel fondu à l'aide d'un agitateur mécanique.

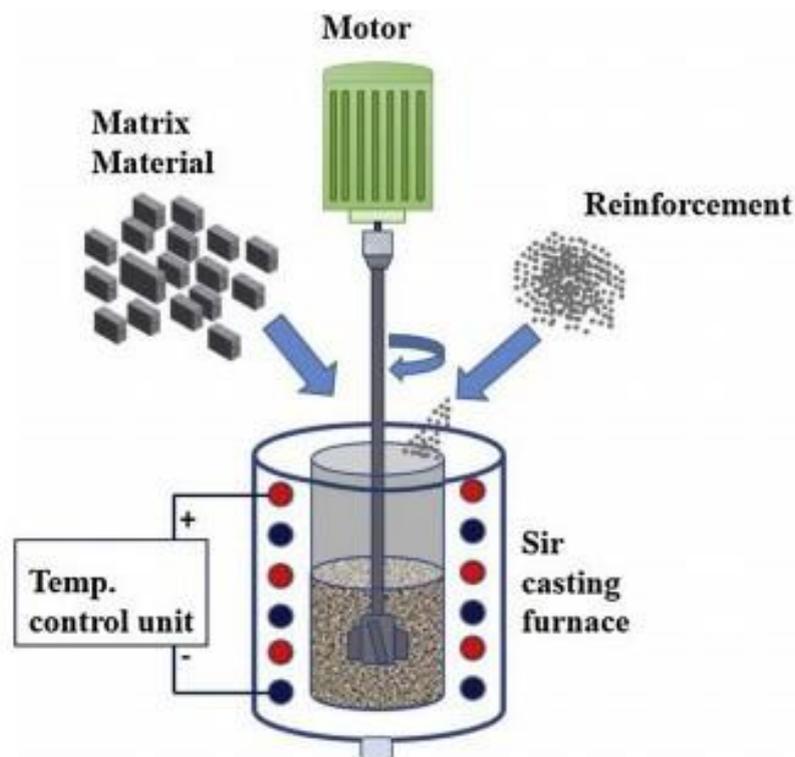


Figure II.1: fonderie par gravité

Ravikumar et al ont fabriqué un composite A6063/TiC en utilisant la méthode de fonderie par gravité en agitant, comme le montre la figure II.1, et ont indiqué que l'ajout de renfort dans la matrice améliorerait les propriétés mécaniques comme la dureté et la résistance à la traction. Rohatgi et coll ont tenté d'ajouter des cendres volantes dans l'alliage A356 en utilisant un four à agitation à fusion et ont signalé que l'ajout de cendres volantes pourrait rendre les pièces d'automobile plus légères et moins chères.

## Fonderie centrifuge

La fonderie centrifuge est une méthode de production du matériau coulé en entraînant le métal fondu dans un moule à rotation rapide. La fonderie centrifuge est un procédé relativement économique dans lequel le métal est projeté vers la surface du moule par force centrifuge sous une pression importante. Il est principalement classé en fonderie centrifuge à axe horizontal et vertical. Figure II.2 montre une machine de fonderie centrifuge horizontale typique. Adelakin et Suárez ont étudié l'effet des paramètres de fonderie sur les composites Al-B-Mg fabriqués en utilisant la méthode de fonderie centrifuge. Dans cette méthode, la roulette centrifuge consistait en un bras libre articulé reliant une pelle préchauffée qui tourne autour d'un essieu vertical entraîné par un moteur électrique. La fonderie centrifuge a donné lieu à un bon remplissage des moules combiné à un bon contrôle de la microstructure et à des propriétés mécaniques brillantes. Wang et al ont étudié le comportement de transfert dans la fonderie centrifuge de composites SiC/Al sous force centrifuge. Le résultat de la microstructure montre que la plupart des particules de SiC ont dérivé vers la région périphérique des pièces fonderies sous l'action centrifuge, ce qui entraîne une distribution de particules non homogène. Le piston fabriqué à partir de fonderie centrifuge avec des paramètres de processus optimaux présente le meilleur comportement de résistance à l'usure

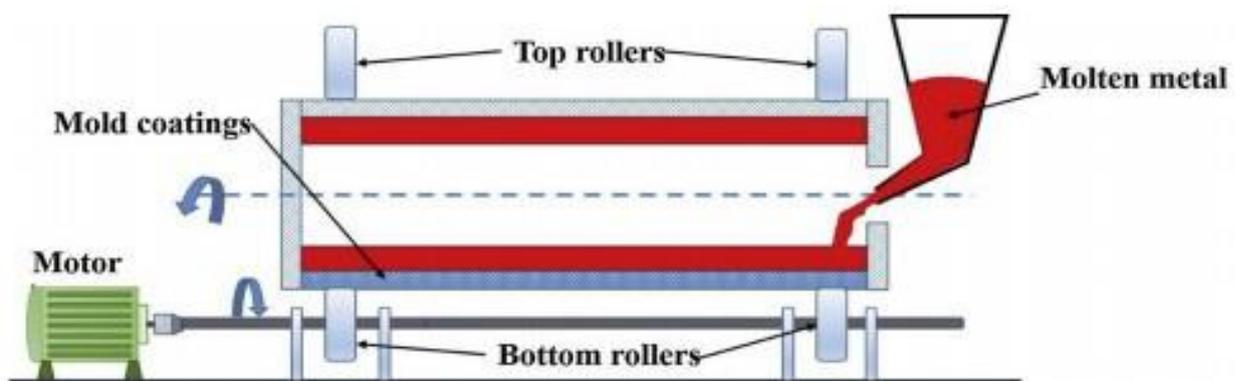


Figure II.2: fonderie centrifuge.

## Fonderie par pression

La fonderie sous pression est une combinaison de fonderie et de forgeage hydraulique, comme le montre schématiquement la figure II.3. Dans ce processus, le métal liquide est versé dans la matrice et immédiatement forgé à l'aide de la presse hydraulique à haute pression. La piste est reliée entre le coulage du fond et le moule pour transférer le métal fondu du four à la filière. Venkatesan et Anthony Xavier ont fabriqué un alliage d'aluminium AA7050 renforcé avec des nanoparticules de graphène en utilisant des techniques de fonderie par agitation et compression. 0,3% des particules de graphène avec matrice d'aluminium ont montré une distribution uniforme des particules. La résistance maximale à la traction de 255 MPa a été obtenue à 0,3 % en poids des particules de graphène.

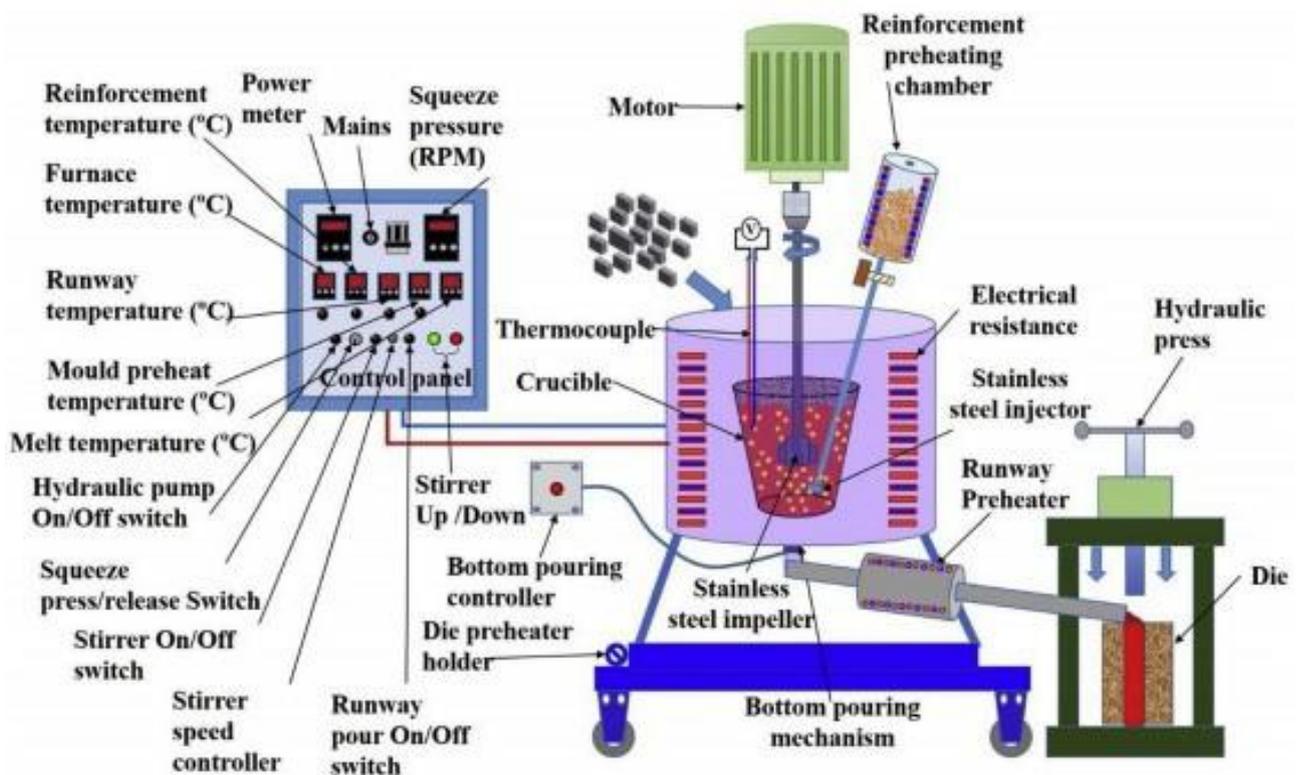
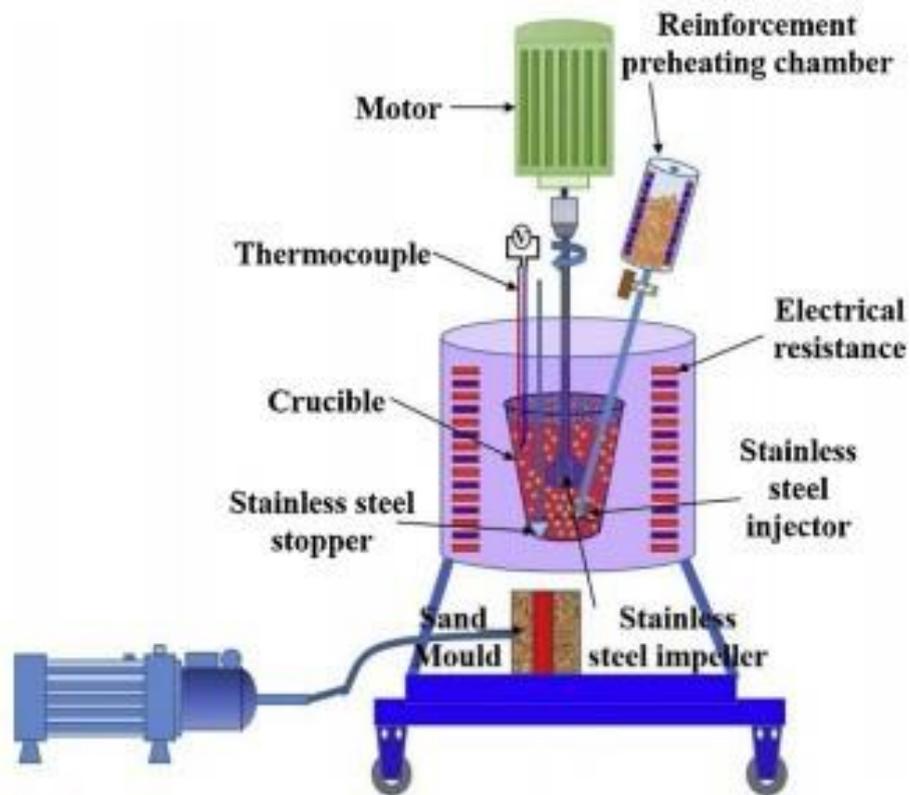


Figure II.3: Fonderie par pression

## Fonderie sous vide sous pression

Dans la fonderie sous vide, la filière est maintenue sous vide pour éliminer les gaz de la fonte. Le schéma de ce procédé est illustré à la figure II.4. Les principaux avantages de cette méthode sont de réduire la porosité dans la fonderie en réduisant les gaz dans la fonte.

La force et la densité de fonderie sont augmentées par ce processus. Yu Li et al ont fabriqué du AA6061-31% B4C à grande échelle grâce à un circuit de coulée sous vide à agitation sophistiqué. Le MEB a révélé que les particules B4C sont uniformément réparties et bien dispersées dans le matériau de la matrice. Le composite avait une résistance à la traction de 340 MPa, qui est améliorée de 112,5 % par rapport à AA1100-31 % B4C[5].

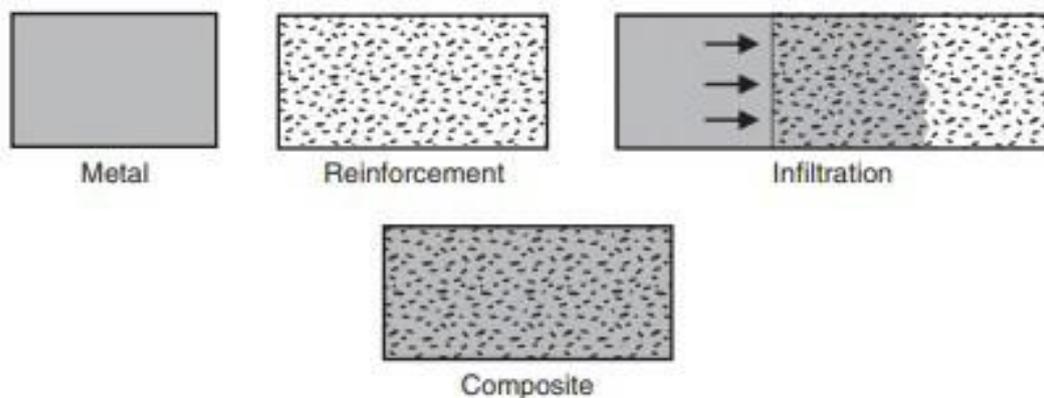


**Figure II.4:** Fonderie sous vide

## 2 Infiltration

### Introduction

L'infiltration est un processus qui implique généralement l'écoulement d'un fluide dans l'espace vide d'une structure poreuse. Dans la production de composites à matrice métallique, le processus d'infiltration implique l'écoulement du métal dans une préforme poreuse contenant le matériau d'armature. Le métal est habituellement sous forme liquide, mais dans certains cas, il se présente sous forme de vapeur ou de lisier. La figure II.5 montre un schéma du processus d'infiltration. Le procédé d'infiltration a été utilisé pour produire plusieurs composants composites commerciaux de matrice métallique utilisés dans plusieurs industries depuis plusieurs années. C'est l'un des principaux procédés de fabrication des composites à matrice métallique. Cet article passe en revue et discute divers processus d'infiltration, types de renforcement, pression seuil pour l'infiltration, cinétique d'infiltration, transfert de chaleur et de soluté, solidification du métal de matrice, et les avantages, les limites, et les applications de l'infiltration.



**Figure II.5:** Illustration schématique du processus d'infiltration.

### Processus d'infiltration

Diverses méthodes peuvent être appliquées pour produire des composites à matrice métallique par infiltration; toutefois, quatre grands procédés sont largement utilisés, à savoir l'infiltration spontanée, la fonderie sous pression, l'infiltration sous pression de gaz et l'infiltration centrifuge. D'autres techniques d'infiltration utilisées pour produire des composites à matrice métallique existent également, y compris l'infiltration de force Lorenz,

l'infiltration par ultrasons et l'infiltration réactive. Cette section fournit une brève description de ces techniques et une discussion de leurs avantages et inconvénients.

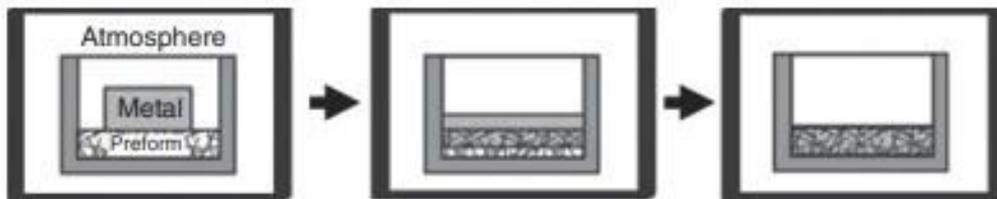
### **Infiltration spontanée**

Lorsque l'on obtient un bon mouillage entre un métal fondu et un matériau de renforcement, c'est-à-dire que l'angle de contact est  $< 90$ , le métal fondu s'infiltré spontanément dans la préforme poreuse sans avoir besoin de pressions externes. Les conditions pour un bon mouillage peuvent être obtenues lorsque la fonte et les compositions préformées, les températures et les atmosphères gazeuses sont contrôlées. Une description schématique typique de l'infiltration spontanée est fournie à la figure II.6. Au cours de ce processus, une préforme et un métal fondu sont positionnés pour être en contact les uns avec les autres à l'intérieur d'un four à atmosphère contrôlée. La fonte s'infiltré ensuite dans la préforme poreuse produisant un composite. Dans certains cas, le taux d'infiltration est augmenté en raison de l'application de vide dans la chambre de pression. Plusieurs systèmes d'infiltration spontanée ont été étudiés, notamment :

- infiltration d'un alliage d'aluminium et de magnésium dans une préforme céramique dans une atmosphère d'azote
- l'infiltration d'alliages d'aluminium dans les préformes de différents renforts par application de revêtements tels que le nickel et le  $K_2ZrF_6$  sur les renforts pour améliorer l'humidification
- infiltration de l'aluminium dans des préformes de carbure de bore, de carbure de silicium ou de nitride d'aluminium à des températures très élevées
- infiltration de l'aluminium dans les préformes d'oxyde par addition de lithium à l'aluminium
- infiltration d'alliages de cuivre dans le SiC sous vide à des températures élevées

Par rapport à d'autres processus, l'infiltration spontanée est relativement simple et attrayante. Il n'y a pas besoin de haute résistance et de moules complexes; par conséquent, ce processus a des coûts d'outillage relativement faibles. Cependant, il possède également plusieurs inconvénients. Les taux d'infiltration sont souvent lents. Par exemple, le taux d'infiltration d'un alliage Al-Si-Mg dans une préforme de SiC particulière d'une taille moyenne d'environ 40  $\mu\text{m}$  dans une atmosphère azotée n'atteint que 4,0 mm/h. Les taux peuvent être très lents lorsque les renforts sont petits. Une certaine porosité peut également être présente dans le composite en raison d'un mouillage insuffisant et d'une alimentation incomplète du retrait de

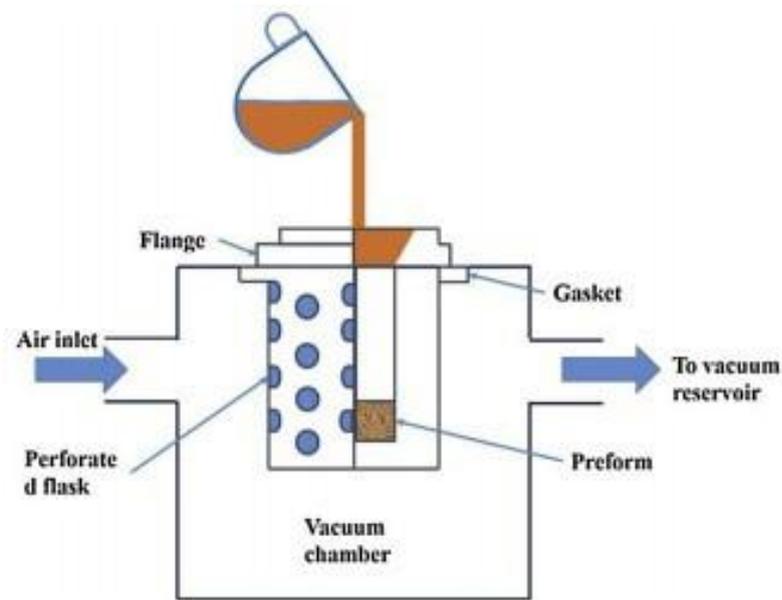
solidification du métal. Les réactions chimiques du renforcement et de la formation de la deuxième phase dans la matrice peuvent entraîner une réduction des propriétés mécaniques. En outre, une exigence de bon mouillage entre l'armature et le métal fondu limite le choix du système de matériaux à seulement certaines combinaisons, ce qui limite les propriétés du composite.[6]



**Figure II.6 :** Infiltration spontanée

### **Faire fondre l'infiltration.**

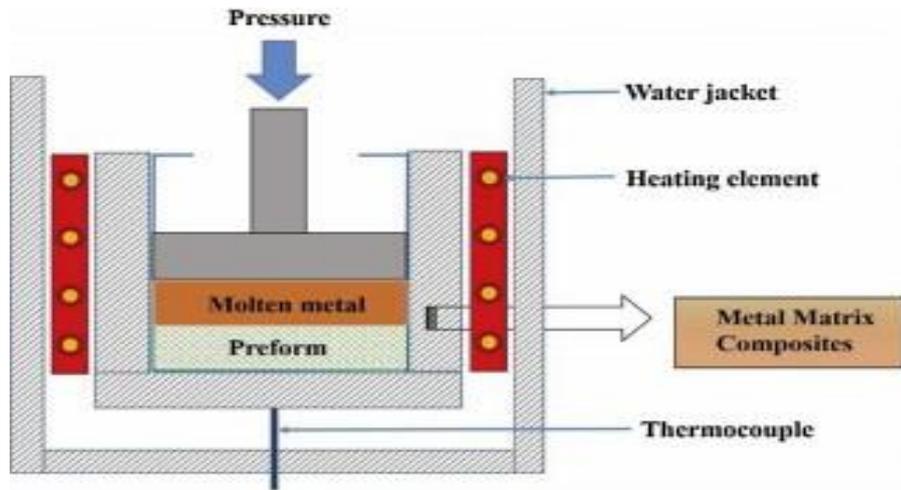
Zhou et al ont réussi à fabriquer des composites Al 6061- Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> en adoptant une méthode d'infiltration sans pression à basse température avec des rubans en alliage Al fondus. La réaction de phase des renforts dans le matériau matriciel a été effectuée à 950 °C. La dureté maximale et la résistance à la compression ont été de 751 HV et 932 MPa respectivement. Figure II.7 montre une configuration typique utilisée pour l'infiltration de fonte. Gecu et al.ont étudié 304 puces SS qui ont été ajoutées à l'alliage A356 fondu par la méthode d'infiltration par fusion effectuée à 730 °C. On a déterminé que la température de préchauffage suffisante améliorerait les propriétés tribologiques du composé.



**Figure II.7:** Infiltration de fonte

### **Infiltration sous pression.**

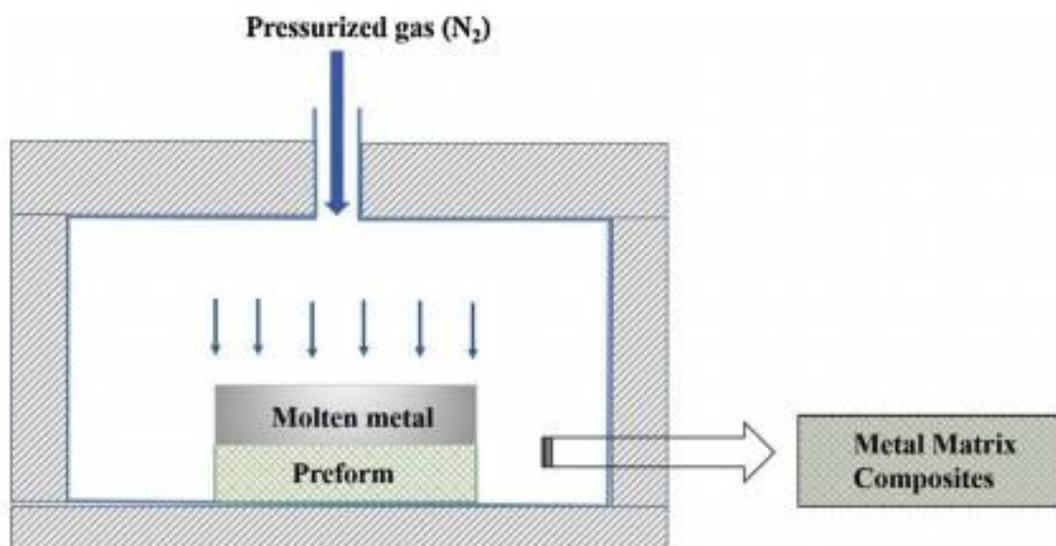
Le procédé d'infiltration sous pression est utilisé pour produire une teneur élevée en renfort dans lequel le métal fondu ou l'alliage est solidifié dans un moule rempli d'un matériau de renfort. Ce processus est illustré à la Figure II.8. Yang et al. ont étudié des nanoplaques de graphène renforcées par des composites Al purs par la méthode d'infiltration sous pression. Le travail a institué que la méthode d'infiltration sous pression peut être utilisée pour produire des composites Al/GNP avec d'excellentes propriétés mécaniques telles qu'une augmentation du rendement et de la résistance à la traction sans formation de carbure d'aluminium. Blucher a déterminé que la méthode d'infiltration sous pression permet de produire des pièces composites de façon économique. Par rapport aux autres techniques de production, la méthode d'infiltration sous pression offre une qualité exceptionnelle puisque la coulée ne dépend pas de l'humidification matricielle de l'armature. Guo et al. ont révélé que la méthode d'infiltration sous pression montre une meilleure conductivité thermique grâce à l'amélioration de la liaison d'interface entre les composites diamantés / Al-12.2Si. Narciso et al. ont fabriqué des composites Al-12Si/graphite et ont obtenu de bonnes propriétés mécaniques et thermiques qui conviennent à la production de moteurs à pistons.



**Figure II.8:** Infiltration sous pression

### **Infiltration sous pression de gaz.**

L'infiltration sous pression de gaz est une méthode d'infiltration forcée de la fabrication en phase liquide des CMM, utilisant un gaz sous pression pour appliquer la pression sur le métal fondu et le forger pour pénétrer une phase dispersée préformée. Ce procédé est illustré à la Figure II.9. Li et al. ont préparé avec succès des composites Al/diamond par infiltration sous pression de gaz dans une atmosphère d'azote, ce qui a permis d'éviter la formation de carbure d'aluminium et d'améliorer la conductivité thermique.



**Figure II.9:** Infiltration sous pression de gaz.

## Infiltration sous pression sous vide.

Le processus d'infiltration sous pression sous vide est effectué en utilisant une pression de gaz accrue. La préforme de renfort est placée dans un moule constitué d'un cylindre métallique. Une pompe à vide est reliée entre le moule et le bain métallique. Lorsque la pompe à vide est mise sous tension, le métal fondu est aspiré dans la préforme. Ce processus est illustré à la Figure II.10. Ma et al ont fabriqué efficacement un composite d'aluminium renforcé de fibre de carbone 2 D (Cf/Al) en appliquant la technique d'infiltration sous pression sous vide. La résistance ultime à la traction dépend fortement de la pression spécifique appropriée appliquée. Le niveau de porosité est considérablement réduit dans cette technique.

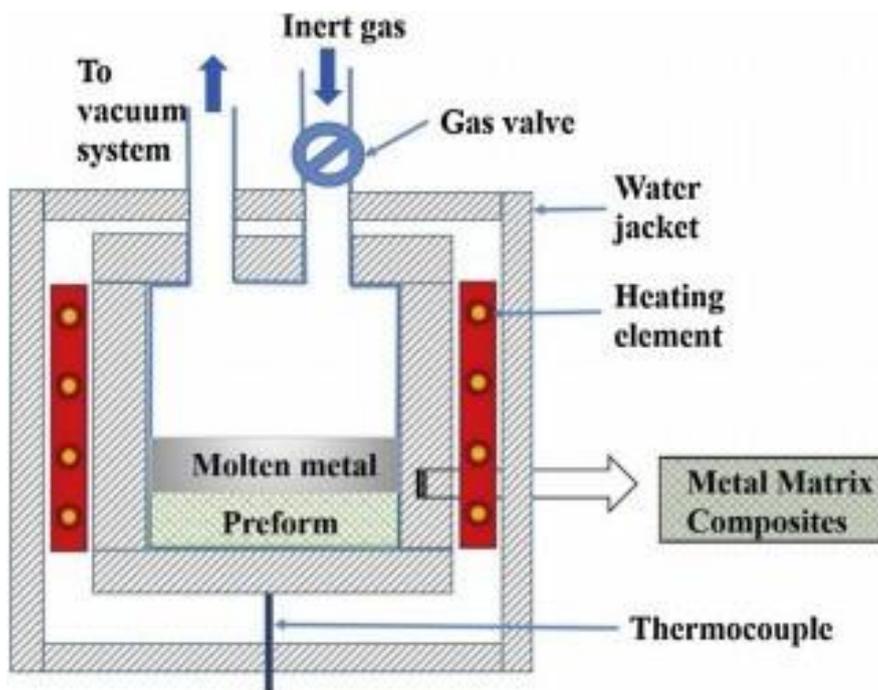
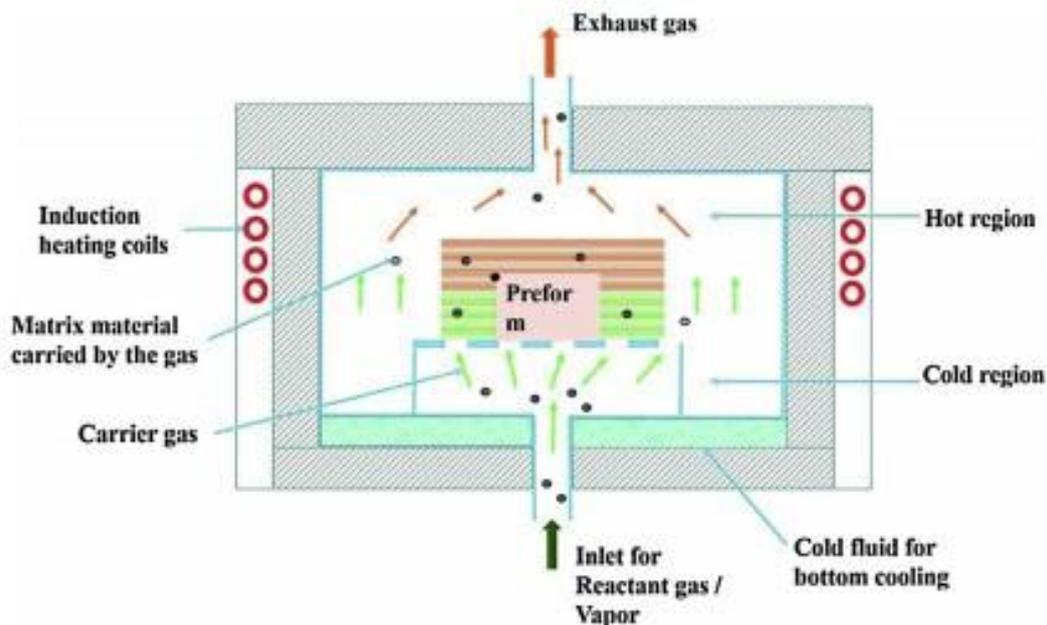


Figure II.10: Infiltration sous vide

## Infiltration de vapeur

L'infiltration de vapeur est un processus dans lequel le matériau de matrice est infiltré dans des préformes fibreuses à l'aide de gaz réactifs à température élevée pour former un composite renforcé. Le dépôt de vapeur est particulièrement utile pour les substrats poreux, où les matériaux solides tels que le carbone, le SiC et d'autres matériaux poreux sont infiltrés par

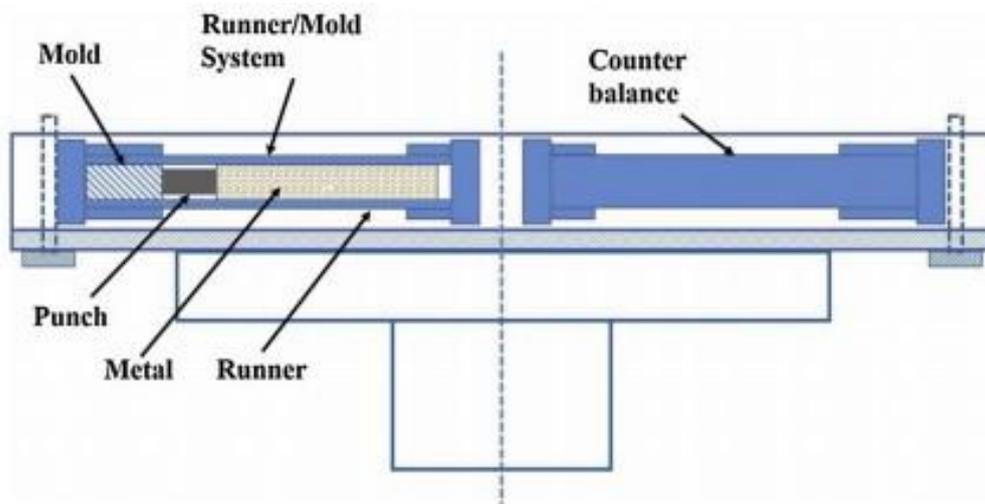
un matériau matriciel à partir d'un mélange de CH<sub>4</sub> dans un gaz porteur de H<sub>2</sub> à la température élevée illustrée à la Figure II.11. Han et al ont préparé des composites poreux de nanofil de carbure de silicium/carbure de silicium (SiCnw/SiC) par infiltration chimique par la vapeur, ce qui a donné d'excellentes propriétés mécaniques et de mauvaises propriétés d'absorption par micro-ondes. Mu et al ont fabriqué des composites SiCf/BN/SiC qui ont donné lieu à une grande résistance à la flexion.



**Figure II.11:** Infiltration de vapeur

### **Infiltration centrifuge à haute pression.**

L'infiltration centrifuge à haute pression est un procédé dans lequel un moule contenant une préforme en céramique emballée située à l'extrémité d'un canal allongé est tourné. En contrôlant le niveau de métal au-dessus de la préforme dans le coureur pour être plus élevé et constant tout au long du processus d'infiltration, des pressions significativement plus élevées sont obtenues. Pour fabriquer des CMM, l'infiltration peut également être réalisée en utilisant une force centrifuge à haute pression. Wannasin et Flemings ont conçu et construit l'équipement d'infiltration centrifuge haute pression pour la fabrication de MMC, comme le montre la Figure II.12. Les résultats primaires ont prouvé que le nouvel équipement conçu et fabriqué à cette fin pouvait devenir un futur procédé de fabrication pour la production de CMM.



**Figure II.12:** Infiltration centrifuge haute pression

### **Avantages, limites et applications de l'infiltration**

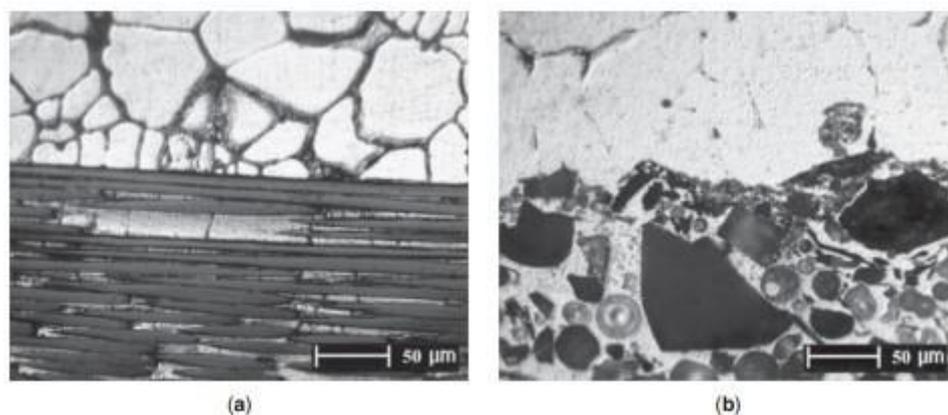
La production de composites à matrice métallique par infiltration offre plusieurs avantages. Le processus peut être mis en œuvre pour produire des taux de production rapides avec un processus d'infiltration sous pression. La pression appliquée peut également produire des composants avec une microstructure sonore et une forme quasi nette. De plus, ce procédé permet de renforcer sélectivement les composants. La Figure II.14 montre des microstructures de composites d'aluminium 7075 renforcés sélectivement par des fibres de carbone multifilamentaires (a) et du papier mica (b) [6]. Les composites ont été produits par un processus de moulage par compression. Toutefois, ce processus comporte également des limites. Étant donné que la production de composites a lieu lorsque le métal est en fusion, il y a une plus grande tendance à des réactions interfaciales entre le métal et l'armature qu'avec un processus de production de composites à matrice métallique à l'état solide. La nécessité pour la préforme de soutenir la pression appliquée place également une limite inférieure sur la fraction de volume de renfort. Par conséquent, les composites produits par infiltration contiennent normalement des fractions de volume relativement élevées. Sur le plan commercial, les applications des composites à matrice métallique produits par un procédé d'infiltration comprennent :

- Contacts électriques en cuivre renforcé de tungstène.
- Substrats électroniques en aluminium renforcé avec des poudres SiC.

- Pièces de moteur automobile, comme les chemises de cylindre de bloc moteur, les pistons de moteur diesel et les poulies de vilebrequin en aluminium renforcées de fibres courtes d'alumine.

Plusieurs activités de recherche utilisant un processus d'infiltration pour fabriquer des systèmes de renforcement métallique intéressants ont également été rapportées. Certains d'entre eux sont énumérés ci-dessous.

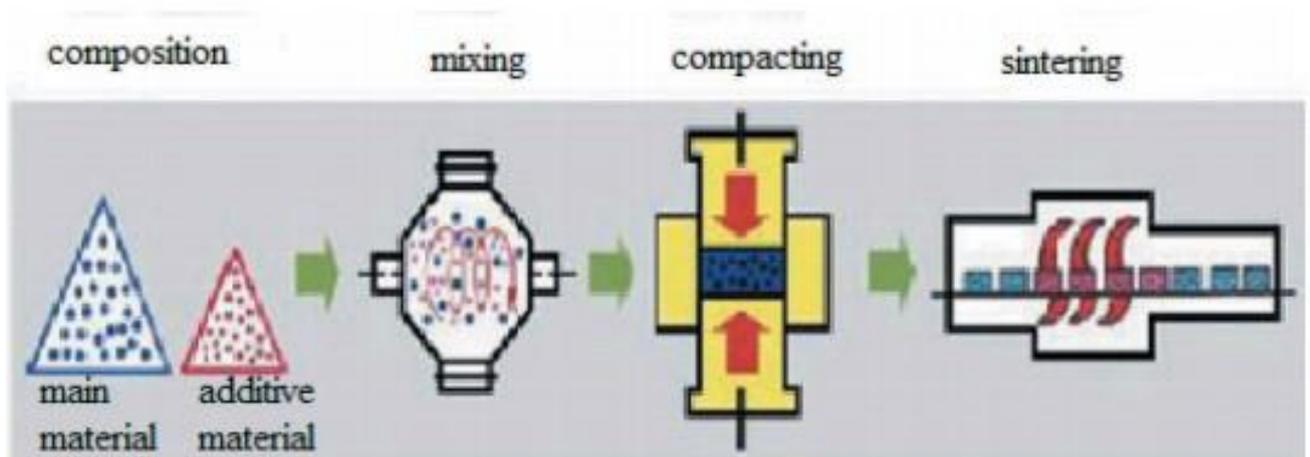
- Des composites supraconducteurs de Mg renforcés de MgB<sub>2</sub> ont été produits par infiltration sous pression de Mg dans les préformes de B et recuits subséquents pour former du MgB<sub>2</sub> par réaction entre B et Mg [7].
- Des composites à matrice métallique renforcée au diamant contenant les fractions volumiques du diamant de 55 à 60 % ont été produits par infiltration sous pression de gaz pour des applications de gestion thermique [8].
- Une mousse métallique amorphe a été produite par infiltration sous pression de gaz de l'alliage ZrNbCuNiAl dans des microsphères de carbone creuses emballées suivies d'une trempe rapide [9].



**Figure II.13:** Micrographies optiques de composites d'aluminium 7075 renforcés sélectivement avec des fibres de carbone multifilament (a) et du papier mica (b) [6].

### 3. La métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres (MP) est la méthode pour développer des CMM en aluminium ou en magnésium. Dans la MP, moins de température est nécessaire et est rentable. Beaucoup de pièces géométriques typiques sont facilement fabriqués par ce processus de PM et la production de masse peut être obtenue à moindre coût. La séquence des étapes de processus dans le processus de MP sont au mélange de la poudre, le compactage de cette poudre mélangée dans une matrice suivie par le processus de frittage dans un four pour la consolidation. Une opération secondaire peut être appliquée pour un comportement particulier ou une précision dimensionnelle. La Figure II .15 montre les processus complets utilisés dans le processus de MP. En raison des particules de renfort mélangées correctement dans la matrice, les propriétés mécaniques du matériau fabriqué sont améliorées. Une corrélation a été développée entre la quantité de renfort, la taille du renforcement nanoparticule, le type de renfort et le type de renfort de surface et les propriétés du composite produit par PM. En général, la fabrication des CMM à l'échelle nanométrique est compliquée, mais la propriété sera bonne à l'échelle nanométrique. Les avantages et les inconvénients du processus de MP sont donnés dans le tableau II.1 [10].



**Figure II.14:** Étapes du procédé de métallurgie des poudres

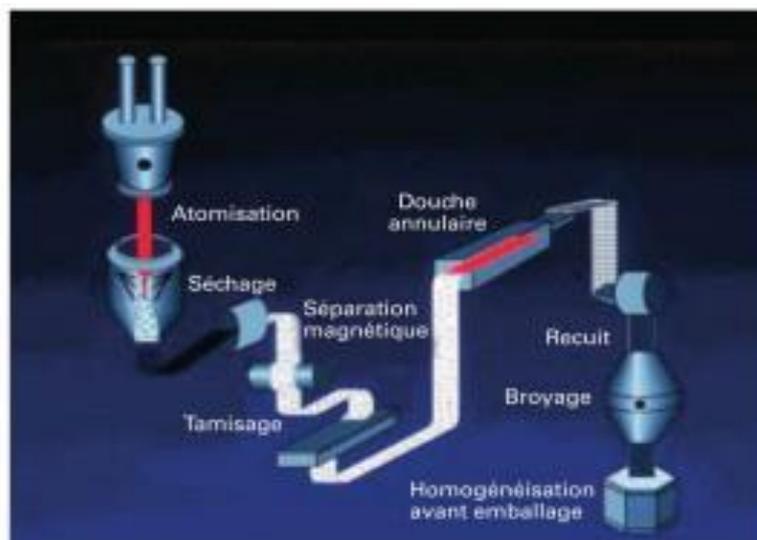
Mérites	Démérites
Les pièces ont une porosité contrôlée	L'outillage et l'équipement sont coûteux, de sorte que le processus est coûteux
D'excellentes propriétés mécaniques sont trouvées	Les pièces ont une faible ductilité et une faible résistance
Exactement les formes requises sont atteintes	Les matériaux en poudre sont très coûteux

**Tableau II.1:** Mérites et démérites de la métallurgie des poudres.

## Elaboration de la poudre

### Les différentes voies d'élaboration

Les poudres métallurgiques peuvent être élaborées par voie mécanique ou chimique. Le choix de la méthode dépend de la vitesse de production requise, de la pureté voulue et des applications finales de la pièce. La méthode la plus utilisée est l'atomisation (Figure II.16). Cette technique consiste à disperser un métal liquide sous l'effet d'un gaz, d'un liquide sous pression (généralement de l'eau) ou d'ultrasons. La fusion de matière recyclée (majoritairement du fer), choisie pour sa pureté, se fait généralement avec un four à arc électrique. L'étape d'atomisation est suivie d'opérations de finition telles que le séchage, la séparation magnétique des inclusions dues au laitier et aux réfractaires, le tamisage, un recuit sous atmosphère réductrice pour éliminer l'oxydation superficielle apparue lors de l'atomisation, le broyage et l'homogénéisation avant emballage final.



**Figure II.15:** Procédé d'atomisation (Puente & François 2011)

Les principaux avantages de l'atomisation sont sa haute vitesse de production (jusqu'à 30 tonnes par heure) et le fait que ce soit la seule technique permettant de préparer des poudres pré-alliées c'est-à-dire que les ajouts d'éléments tels que Ni, Mo, Mn et Cr se font à l'état liquide. La taille des poudres obtenues varie entre 10 et 1000  $\mu\text{m}$ . Afin d'obtenir des poudres plus fines l'élaboration des poudres doit se faire par d'autres voies de synthèse (chimique ou physique). La réduction est le procédé le plus ancien. Elle est surtout utilisée pour les coussinets « autolubrifiants » et certaines pièces d'amortisseurs comme les pistons. Un mélange de magnétite (minerai riche en fer) et d'un agent réducteur (coke) est porté à haute température (1200°C).

Du CaO est ajouté afin de piéger le soufre présent. Tout comme pour l'atomisation, d'autres opérations sont nécessaires après la réduction comme le broyage, le recuit et le tamisage. Les poudres obtenues sont dites «éponges» à cause de la porosité interne très importante provenant de la consommation de l'oxygène lors de la réduction

### **Les éléments d'addition**

Le fer pur est rarement utilisé comme tel. Afin d'améliorer ses propriétés mécaniques, des éléments tels que le carbone, le nickel, le cuivre, le chrome, etc. y sont ajoutés. L'une des particularités du procédé de frittage est la possibilité de produire tous les alliages possibles sans considération pour la miscibilité des éléments d'addition dans le fer ce qui n'est pas le cas pour les procédés métallurgiques usuels comme la coulée. Pour les poudres d'acier plusieurs méthodes d'addition des éléments d'alliage peuvent être distinguées :

- pré-alliage
- pré-diffusion
- pré-encollage
- ajout sous forme de poudres élémentaire [11]

Méthode d'addition	Diffusion de l'élément d'addition dans le fer	Avantages	Inconvénients
Pré-alliage	-Totale -Homogène	-Homogénéité - pas de ségrégation	- Diminution de la compressibilité (fonction de la nature et de la teneur l'ajout) -Difficulté d'ajuster la composition chimique
Pré-diffusion	-Superficielle -Localisé	-Haute compressibilité -peu de ségrégation	- composition fixe
Elémentaire	-Aucune	-Haute compressibilité - Choix de la composition	- Ségrégation possible

**Tableau II.2:** Comparaison des méthodes d'ajout des éléments d'alliage (Höganäs AB 2013a, Puente & François 2011).

## Mélange

L'objectif du processus de mélange est de créer un mélange homogène des poudres de renfort et de matrice nécessaires à la production du matériau composite. En raison de la relation directe entre la distribution du matériau d'armature dans le mélange de poudre et la distribution de l'armature dans le composite entièrement traité, l'efficacité du processus de mélange est d'une importance primordiale.

Un mélange de poudre est normalement composé de poudres matricielles pré alliées ou d'un mélange de poudres élémentaires mélangées avec des particules de renforcement. Dans le cas du traitement uniaxial à froid, une poudre de lubrifiant est également normalement incluse dans le mélange. Ce lubrifiant à poudre est ajouté pour réduire le frottement de la paroi pendant le compactage et l'éjection et n'est pas nécessaire dans le cas d'un pressage isostatique ou d'un mélange de poudre qui subira un traitement de déformation à chaud tel que l'extrusion à chaud..

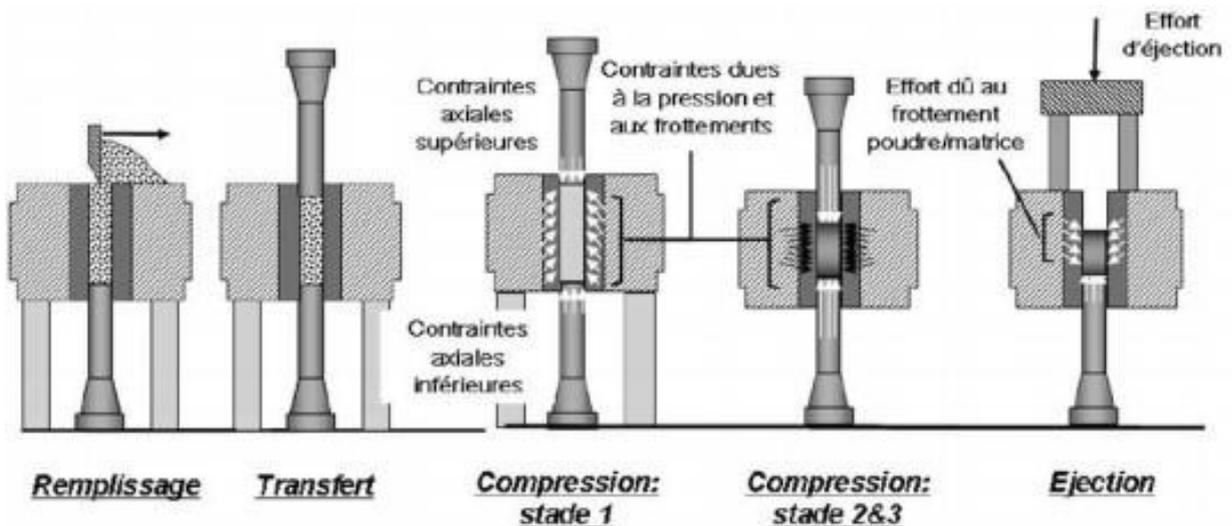
Le mélange est normalement effectué par rotation mécanique d'un récipient scellé de forme appropriée contenant une charge de poudre constituée de poudres matricielles, une quantité prédéterminée de renfort et, si nécessaire, de lubrifiant en poudre. Cette méthode de mélange mécanique est appelée mélange à sec et est effectuée régulièrement à l'aide d'un mélangeur TurbulaMC ou d'un mélangeur en forme de V , D'autres méthodes de mélange qui ont été utilisées comprennent le brassage par ultrasons d'un mélange de poudre dans un

solvant à base d'alcool suivi d'un séchage et aussi l'agitation d'un mélange de poudre dans un broyeur à haute énergie (attritor), Les mécanismes impliqués dans le processus de mélange sont complexes et peuvent être influencés par de nombreux facteurs , L'homogénéité finale du mélange dépend de la poudre de matrice au rapport de taille de renfort, taille absolue de poudre, densité de poudre, volume de charge au rapport de volume de mélange de récipient, vitesse, direction et durée du mélange et forme du récipient. En raison principalement de la complexité des processus de mélange, les paramètres du processus de mélange sont normalement fondés sur les résultats de modèles empiriques statistiquement fondés, 48 L'analyse de la distribution des mélanges de poudre est effectuée par des moyens statistiques. Les échantillons de poudre peuvent être extraits d'un lot, analysés chimiquement ou physiquement, et comparés à une distribution standard théorique. La distribution des particules de renforcement dans le matériau composite final dépend directement de l'efficacité du processus de mélange. L'analyse d'images de micrographies a été utilisée pour quantifier et comparer l'homogénéité des composites entièrement traités, mais cette forme d'analyse pourrait être trompeuse puisque les micrographies ne sont que des images bidimensionnelles d'un matériau tridimensionnel. Aucune méthode standard de distribution n'a été mise au point pour ces matériaux [12]

## **Procédés de mise en forme à partir des poudres**

### **Compression uniaxiale**

La phase de compression vise deux buts qui sont la densification par rapprochement et déformation des grains solides à l'aide d'une pression externe et l'obtention de comprimés ayant la forme et les dimensions désirées. La méthode de compression la plus utilisée est uniaxiale à froid. Le cycle de compaction est décrit par la Figure II.17.



**Figure II.16:** Les différentes phases d'obtention du comprimé.

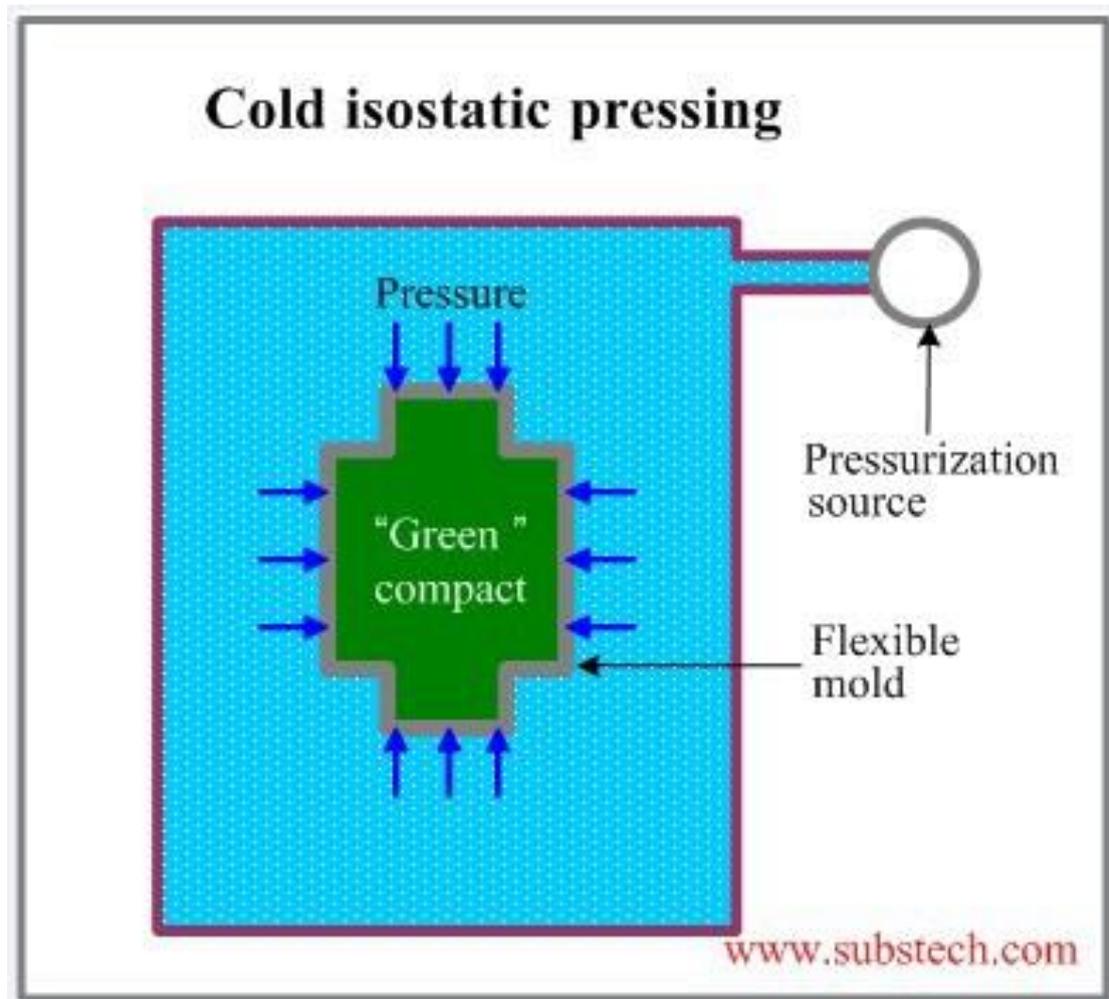
Après le remplissage et suite à la phase de transfert, intervient la phase de compression de la poudre avec le rapprochement des différents poinçons (Figure II.17).

Pendant la phase de compression, la poudre se densifie sous l'action de trois phénomènes qui permettent de scinder la phase de compression en trois stades ordonnés:

- Le réarrangement des grains se traduit par des déplacements des particules accompagnés d'éventuelles fracturations ou fragmentations.
- La déformation locale des grains se traduit par un écrasement en surface des grains suite à l'augmentation de la compacité. Cette déformation locale des grains est visible sur les zones de contact et entraîne l'apparition de surfaces planes sur les grains.
- La déformation plastique de grande amplitude de chaque grain qui intervient pour les hautes compacités atteintes par les poudres métalliques ductiles.

### **Compression isostatique à froid**

Le principe de ce procédé, consiste à immerger un conteneur souple rempli de poudre dans un liquide, habituellement de l'eau, qui est comprimé à une haute pression. La poudre ainsi compactée par une pression uniforme dans toutes les directions. Le schéma du procédé est illustré à la Figure II.18. Ce qui nous amène à une bonne uniformité de la densité. Le compactage à froid est toujours suivi d'un frittage afin de le consolider. Ce procédé se distingue par sa capacité à produire des pièces très élancées telles que les barres [13].



**Figure II.17:** Schéma du pressage isostatique à froid (CIP)

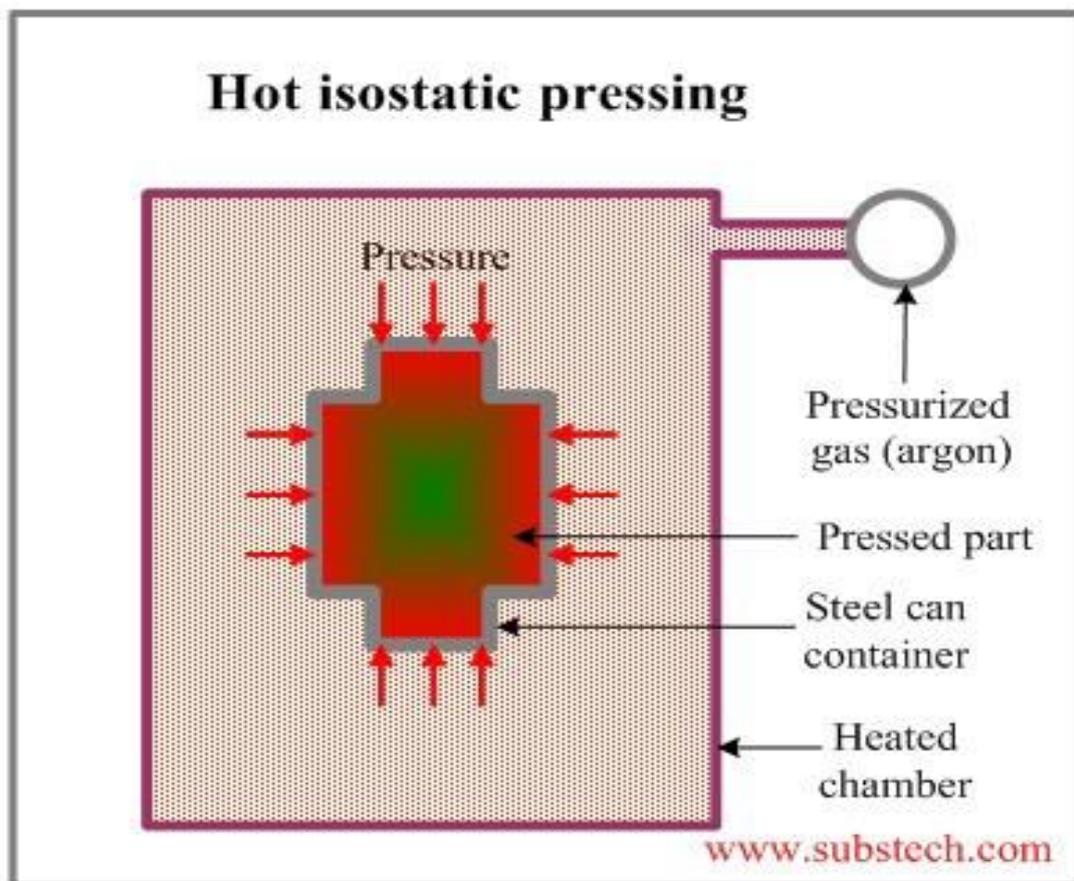
### **Compression isostatique à chaud (CIC):**

Dans la méthode CIC, les matériaux sont fabriqués au moyen de deux procédés, l'un étant le moulage et l'autre, le procédé de MP. Le fonctionnement mécanique de ces matériaux est fonction de la structure, de la dispersion et de la quantité de porosité qui altèrent le comportement mécanique, comme la résistance à la fatigue, la résistance à la traction et la résistance à la rupture. Dans ce processus, une température élevée et une pression uniforme appliquée au compact vert dans toutes les directions et le gaz d'argon pris comme fluide dans un récipient construit à la consolidation appropriée des matériaux. Le diagramme schématique du procédé est illustré à la Figure II.19. Parce que la pression et la température sont

appliquées en même temps et appelées ‘ liaison de pression de gaz’. CIC est couramment utilisé pour éliminer les défauts et pour la céramique de synthèse de haute densité Dans ce processus, les propriétés mécaniques telles que la résistance aux chocs, le fluage et la ductilité sont améliorées. Jusqu’à présent, CIC est considéré comme une meilleure technique pour améliorer les propriétés mécaniques d’un grand nombre de matériaux. Le tableau II.3 résume les mérites et les démérites de la technique CIC [10]

Mérites	Démérites
Densification composite élevée	Non utile pour les formes complexes
Application à température réduite	Partie de celui-ci nécessitent une opération secondaire
Les croissance des céréales est ralentie	Coûteux

**Tableau II.3:** Mérites et démérites du pressage isostatique à chaud (CIC). est couramment utilisé pour éliminer les défauts et pour la céramique de synthèse de haute densité

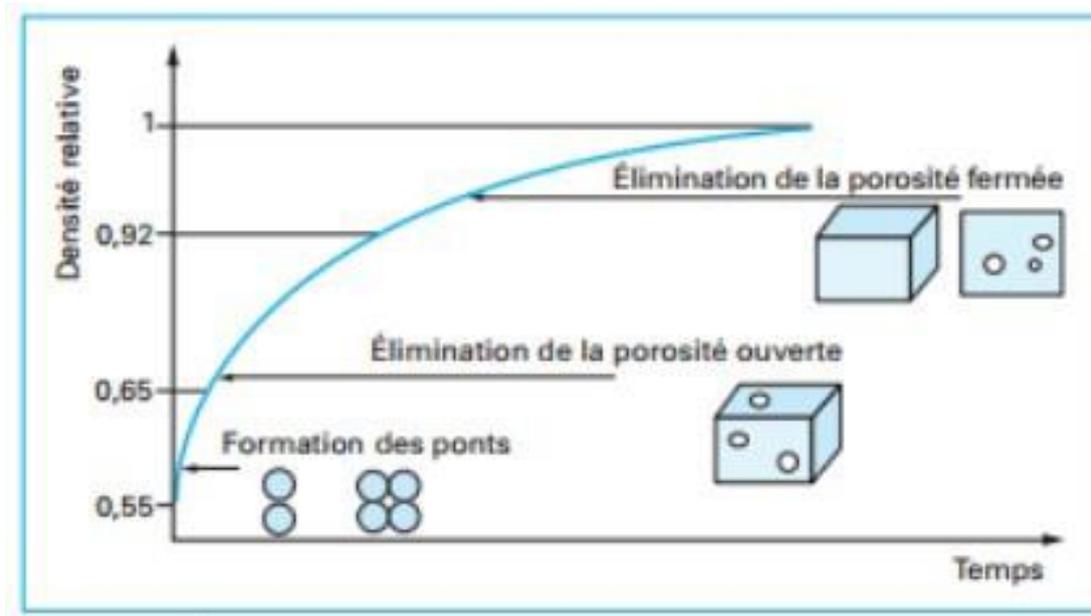


**Figure II.18:** Schéma du pressage isostatique à chaud (CIC)

## Le frittage

Le frittage est un processus physico-chimique qui consiste à consolider un matériau pulvérulent pour en faire un matériau dense sous l'effet de la chaleur, avec ou sans fusion d'un ou de plusieurs de ses constituants. L'origine physique du frittage est la réduction de l'énergie de surface du matériau. En effet, les atomes ou molécules en surface d'un matériau possèdent une tension superficielle supérieure à celle du même matériau massif de masse identique. Lorsque le matériau se réorganise de façon à présenter moins de surface, cela diminue la valeur de son énergie de surface et il sera donc plus stable thermodynamiquement. Or, en augmentant la température du matériau, on facilite le déplacement des atomes ce qui conduit au réarrangement du matériau. Le système va alors chercher à diminuer la surface du matériau ainsi que les interfaces solide-air. On distingue trois types de frittage : (i) le frittage en phase solide (tous les constituants restent solides), (ii) la vitrification (apparition d'une phase vitreuse) et (iii) le frittage en phase liquide (apparition d'une quantité de liquide suffisante pour permettre un réarrangement des particules). Les matériaux polycristallins se frittent par diffusion de matière depuis les régions de potentiel chimique élevé (régions sources de matières) vers les régions de bas potentiel chimique (régions puits de matière). Il existe plusieurs mécanismes de transport de masse : (i) la diffusion en surface (qui implique le déplacement des atomes entre les défauts de surface), (ii) la diffusion en volume (qui implique le déplacement de lacunes à travers la structure cristalline), (iii) la diffusion aux joints de grains et (iv) l'écoulement plastique (diffusion des dislocations). Quel que soit le type de frittage, il se déroule en trois étapes (Figure II.20) :

- Stade initial : la densité relative ( $\rho$ ) est comprise entre 0,5 et 0,65. Il y a d'abord formation rapide de ponts entre les particules par transport de matière, i.e. diffusion en surface, en volume, aux joints de grains ou en phase vapeur. On considère le stade initial terminé lorsque le rayon des ponts ou des cous atteint 40 à 50 % du rayon des particules.
- Stade intermédiaire : densité relative comprise entre 0,65 et 0,92. Au cours de cette étape, la porosité ouverte est éliminée et on observe une densification importante.
- Stade final : densité relative  $> 0,92$ . Ce stade conduit à l'élimination de la porosité fermée. La microstructure peut évoluer avec des phénomènes plus ou moins marqués de croissance granulaire. Si toute la porosité disparaît, on atteint la densité théorique du matériau [14].



**Figure II.19:** Évolution de la densité relative au cours des étapes de densification

## Paramètres de frittage

### Atmosphère de frittage

Le frittage peut être effectué sous différentes atmosphères et chacune d'elle influe sur la qualité du produit final. Les pièces frittées sous air sont exposées à l'oxygène et à la vapeur d'eau ce qui altère considérablement les propriétés physico-chimiques des produits frittés par l'inclusion des oxydes qui sont souvent fragiles et altèrent les propriétés mécaniques. Par contre une atmosphère neutre (ex : azote ou argon) protège la composition d'une corrosion à haute température durant le frittage mais les oxydes existant avant le frittage restent dans le fritté.

### Température et durée du frittage

La température fait augmenter rapidement la vitesse du frittage que l'on peut caractériser par la valeur du retrait. Cependant, les températures très élevées, par rapport à la température de fusion, ne sont pas toujours utilisées car elles provoquent des déformations des pièces par fluage. La durée de l'opération de frittage comprend la montée et le maintien en température ainsi que le refroidissement. La montée en température est assez lente pour permettre l'évacuation du lubrifiant puis un maintien à la température maximale tel que la

durée de parcours dans le four est de 2 à 4 h. La durée du processus de frittage représente le temps nécessaire pour atteindre une densification complète du matériau. Elle dépend de plusieurs paramètres, mais elle est dominée par la fraction volumique du liquide et de la température de frittage.

## Différents types de frittage

D'un point de vue technologique on distingue deux types de frittage : naturel qui effectué sans contrainte mécanique (chauffage sous air ou sous atmosphère contrôlée) et frittage sous charge effectué en appliquant une pression extérieure simultanément au chauffage. Ce dernier est particulièrement utilisé pour les matériaux difficiles à fritter ou pour obtenir des densités proches de la densité théorique. D'un point de vue physico-chimique, on distingue deux types de frittage : frittage en phase solide et frittage en phase liquide. Si le matériau après frittage à la même composition chimique que la poudre initiale, on parle de frittage non réactif. Dans certains cas, la poudre initiale peut être composée d'un mélange de deux (ou plusieurs) composés chimiques ; le traitement thermique permet de former un nouveau composé chimique et de densifier ce nouveau matériau ; on parle alors de frittage réactif. La Figure II.21 présente les différents types de frittage.

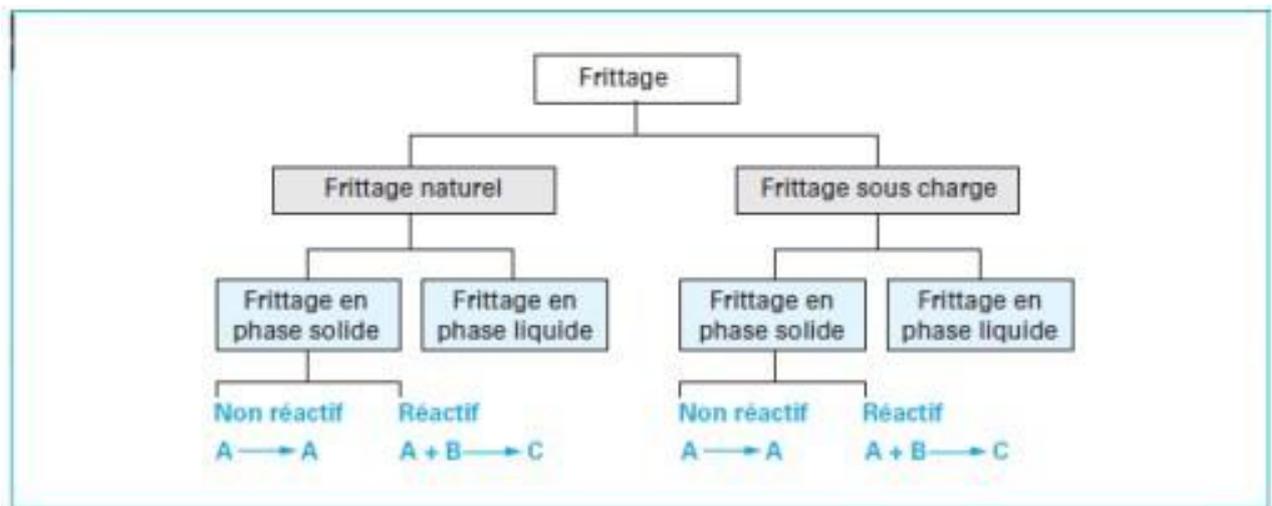


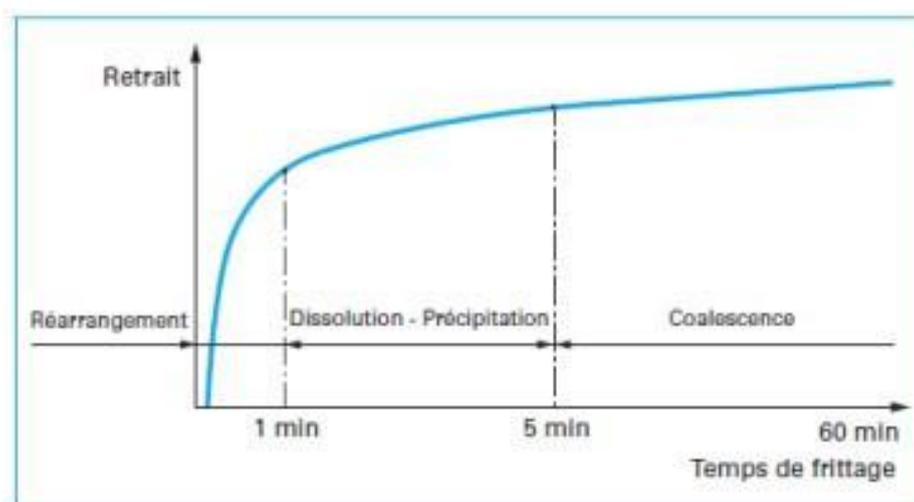
Figure II.20: Les différents types de frittage

## Frittage en phase solide

Au cours du frittage en phase solide tous les constituants restent solides. La densification est produite par la soudure et le changement de forme des grains. Ce frittage peut donc être monophasé à un constituant ou polyphasé. On peut, ajouter des additifs qui permettent, sans créer de phase liquide, d'accélérer la densification. Ce mode de frittage est particulièrement utilisé pour les céramiques techniques dont la pureté des joints de grains est importante pour les propriétés d'usage : thermomécaniques (outils de coupe, barrières thermiques, combustible nucléaire), électriques ou magnétiques (diélectriques, varistances, supraconducteurs), optiques, voire biologiques. Durant le frittage, trois étapes se succèdent : la formation des ponts, le grossissement des grains et l'élimination de la porosité.

## Frittage en phase liquide

Procédé d'élaboration des matériaux à partir d'une poudre ayant au moins deux constituants. La température de fusion de l'un des deux doit être inférieure à la température de frittage, dans le but de permettre l'apparition de la phase liquide qui densifiera le comprimé. Les mécanismes mis en jeu font intervenir des phénomènes de fusion, de mise en solution, de diffusion, d'écoulement liquide par capillarité, de réarrangement des particules solides et l'élimination de la porosité. Lors du frittage en présence d'une phase liquide, On distingue trois étapes principales, correspondant successivement au réarrangement, à la dissolution précipitation et à la coalescence des grains (Figure II.22) [13]

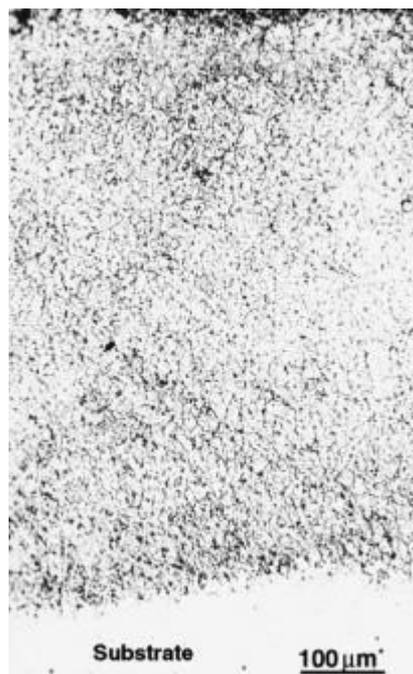


**Figure II.21:** Représentation schématique des trois grandes étapes du frittage en phase liquide

# **Chapitre III : l'impact des particules de céramique sur Les propriété des CMMp**

Les études récentes sont faites pour montrer l'importance de CMM en termes d'affaires scientifiques et de recherche, pour que ces matériaux soient adaptés à nos buts et usages, et nous les avons totalement maîtrisés selon nos besoins.

Un revêtement composite TiC/(NiAl–Ni<sub>3</sub>Al) résistant à l'usure a été déposé sur un substrat de nickel de taille 15 mm × 17 mm × 60 mm électrolyté par revêtement laser à l'aide de poudres en alliage Ni–Al–Ti–C [15]. Le revêtement au laser est métallurgiquement lié au substrat et possède une microstructure fine homogène composée de la dendrite TiCéquiaxe de type fleur et de la matrice en deux phases de NiAl et Ni<sub>3</sub>Al. Le revêtement composite à matrice intermétallique présente une excellente résistance à l'usure dans les conditions d'essai d'usure par glissement à température ambiante et à haute température en raison de la dureté élevée du TiC couplée aux fortes liaisons atomiques de la matrice intermétallique

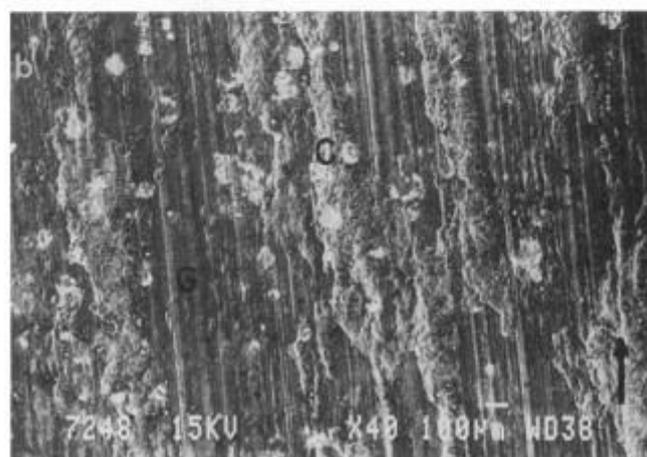
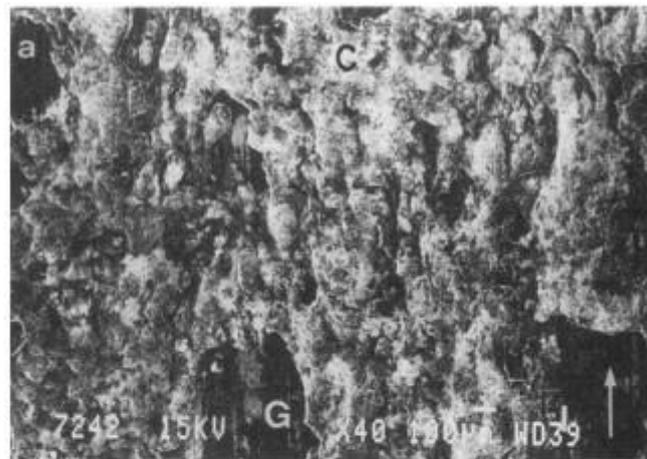


**Figure III.1:** Micrographie OM montrant la microstructure sur la section transversale de vue d'ensemble du revêtement TiC/(NiAl–Ni<sub>3</sub>Al) revêtu de laser

La stabilité structurelle du Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> dans le Cu et l'évolution de la microstructure des composites Cu – Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> préparés à différentes températures ont été étudiées par Zhou et al [16]. Une légère réaction entre Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> et Cu se sont produits à 850–950 C, et de fortes

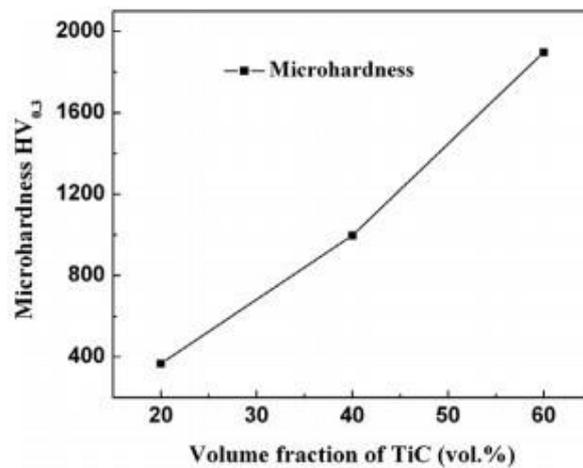
réactions se sont produites au-dessus de 950 C. La réaction a été identifiée comme la diffusion d'Al à partir de  $Ti_3AlC_2$  en Cu pour former une solution solide de Cu(Al).  $Ti_3AlC_2$  a conservé sa structure sous la perte partielle d'Al.

Diaz et al [17] ont étudié l'adéquation des intermétalliques  $Ni_3Al$  comme renfort pour les matériaux à base d'Al pour des applications tribologiques. À cet effet, un composite Al/ $Ni_3Al$  (5 %vol d' $Ni_3Al$ ) a été préparé par métallurgie des poudres et testé dans l'air contre (des billes) l'acier à une charge comprise entre 45 et 178 N. Les résultats mettent en évidence le rôle des particules  $Ni_3Al$  en tant qu'éléments porteurs en raison de leur excellente liaison à la matrice Al, leurs interfaces résistant aux contraintes d'usure même à la charge appliquée la plus élevée. De plus, les particules  $Ni_3Al$  limitaient l'incorporation de débris d'usure dans la matrice Al et réduisaient les dommages d'usure sur les faces de l'acier par rapport aux échantillons d'aluminium pur.

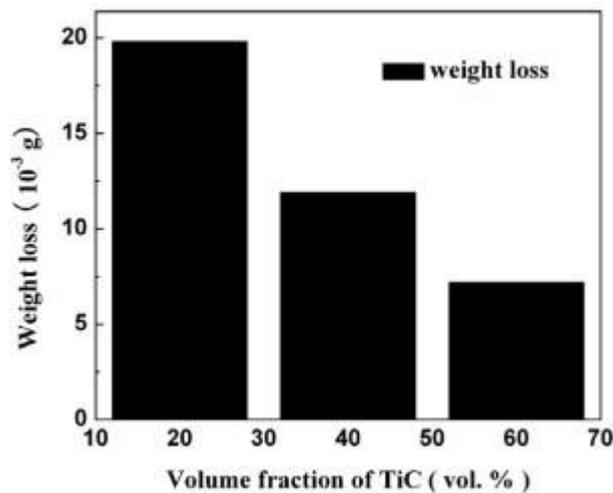


**Figure III.2:** Trace d'usure du composite Al/Ni3Al testé à (a) 89 N and (b) 134 N.

Ni/TiC composite à matrice métallique ont été produits avec succès par la fabrication laser directe (DLF) avec 20, 40 et 60 vol.% TiC, respectivement [18]. Les effets de la teneur en TiC sur la composition des phases, la microstructure, la microdureté et la résistance à l'usure des produits de réaction ont été étudiés. Les résultats ont montré que les composites étaient composés des phases TiC et Ni, ce qui indique que le TiC a été synthétisé par la réaction in situ. En outre, la taille des particules TiC a augmenté et la microdureté et la résistance à l'usure des composites ont été améliorées avec l'augmentation de la teneur en TiC.



**Figure III.3:** Profil de micro-dureté des CMM Ni/TiC préparé par DLF



**Figure III.4:** Profil de perte de poids des CMM Ni/TiC préparé par la DLF

## **Conclusion générale**

Un composite à matrice métallique est un composé à deux constituants, une matrice métallique et un renfort qui peut être métallique ou céramique.

Notre travail a accentué Les composite à matrice métallique.

L'étude des différentes techniques d'élaborations des CMMp nous a donné une large vision sur Les avantages de chaque technique mais aussi suffisamment d'informations sur l'applicabilité des composites.

L'étude de l'impact des particules de céramique sur Les propriétés des CMM indique une excellente résistance à l'usure ainsi que de fortes liaisons atomiques de la matrice métallique.

Grace aux recherches sur Les CMM, la fabrication de ces composites est désormais métrisée, elle est devenu courante est accessible. On doit juste assurer une cohésion optimale matrice/ renfort.

## Références bibliographiques

- [1] Ajith James Cyriac: ‘ Metal Matrix composites : history, status, factors and future’, cochin university of science and technologie cochin kerala, 2005.
- [2] MINORU TAYA, RICHARD J. ARSENAULT: ‘ Metal Matrix Composites: Thermomechanical Behavior’, University of Washington, Seattle, WA, USA, 23 Mar 2007.
- [3] Laurent Gornet: ‘ Generalites sur les materiaux composites’, Ecole Centrale de Nantes, September 2008.
- [4] Nikhilesh Chawla, Krishan K. Chawla: ‘ Metal Matrix Composites’, University of Alabama at Birmingham, AL, USA .
- [5] Ramanathan Arunachalama, Pradeep Kumar Krishnanb, Rajaraman Muraliraja : ‘ Journal of Manufacturing Processes’, National University of Science and Technology, Oman, 09 May 2019.
- [6] Jessada Wannasin: ‘ Metal matrix composites: Infiltration’, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand, 2012.
- [7] Dunand DC. Appl Phys Lett 2001;79:4186–4188.
- [8] Weidenmann KA, Tavangar R, Webber L. Mater Sci Eng 2009.
- [9] Brothers AH, Dunand DC. Appl Phys Lett 2004.
- [10] Lokesh Singh, Bharat Singh & Kuldeep K Saxena : ‘ Advances in Materials and Processing Technologies’, Department of Mechanical Engineering, Institute of Engineering and Technology, GLA University, Mathura, UP 281406, India, 11 February 2020.
- [11] Eric Hug : ‘ Endommagement des aciers frittés utilisés dans la conception automobile’, mémoire de doctorat Université de Caen Normandie, July 2016.

[12] Gareth O'Donnell, B.Sc : ' Process Optimisation and Numerical Modelling of Powder Metallurgical Aluminium Matrix Composites', Dublin City University School of Mechanical and Manufacturing Engineering, may .

[13] Meziani hakima: ' Elaboration d'un composite WC/C par infiltration', Mémoire de magister université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2012-2013

[14] Diaa Hereib : ' Fabrication et caractérisation des matériaux composites lamellaires à matrice Ti et TA6V', mémoire de doctorat, école doctorale des sciences chimiques et technologies, 27/02/2018.

[15] Y. Chen, H.M. Wang : ' Microstructure and wear resistance of a laser clad TiC reinforced nickel aluminides matrix composite coating', University of Aeronautics and Astronautics, 25 September 2003.

[16] J. Zhang a,b, J.Y. Wang a , Y.C. Zhou : ' Structure stability of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> in Cu and microstructure evolution of Cu–Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> composites', Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 1 June 2007.

[17] C. Diaz, J.L. Gonzalez-Carrasco, G. Caruana, and M. Lieblch : ' Ni<sub>3</sub>Al Intermetallic Particles As Wear-Resistant for Al-Base Composites Processed by Powder Reinforcement Metallurgy', Department, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC), Avda. Gregorio del Amo 8, 28040 Madrid, Spain. Manuscript submitted, August 21, 1995.

[18] Yuxin Li, Peikang Bai a, Yaomin Wang, Jiandong Hu, Zuoxing Guo : ' Effect of TiC content on Ni/TiC composites by direct laser fabrication ', College of Materials Science and Engineering, North University, 1 July 2008 .