

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction mécanique

Par:

Tabta Siham

Ghout Tinhinane

Thème

**Modélisation multi-échelle des propriétés élastiques d'un composite à matrice
métallique (CMM)**

Soutenu le 13 /07/2022 devant le jury composé de:

Mr. Amari Djamel

President

Mr. Mohamed Said Boutaani

Rapporteur

Mr. Abdelhamid Becheur

Examineur

Année Universitaire 2021-2022

Remerciements

En préambule à ce projet de fin d'étude nous remerciant ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à nos parentes et aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette exceptionnelle année universitaire.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la faculté de technologie département de génie mécanique, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenons à remercier sincèrement notre encadrant monsieur Mohamed Saïd Boutaani, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce projet, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui ce projet n'aurait jamais vu le jour.

Nous tenons à remercier monsieur Abdelhamid Becheur pour l'aide qu'il nous a apporté.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi.

A mon frère et sa femme que j'aime beaucoup

A ma chère sœur

A mes meilleurs amis

A ma binôme Siham et sa famille

A tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce travail.

Tinhinane

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents source de vie, d'amour et d'affection

A mon seul et cher frère que j'aime beaucoup

A mes chères sœurs qui m'ont toujours soutenu et leurs maries

A mes petites et précieuses nièces.

A la mémoire de toutes les personnes chères qui nous ont quittées, que je n'oublierai jamais. Dieu leurs pardonne et les accueille dans son vaste paradis.

A ma binôme Tinhinane et sa famille.

A tous ceux qui ont participé de prêt et de loin à la réalisation de ce projet.

Siham

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Table des matière	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nonmenclature	
Introduction Générale.....	1
I.Chapitre I :Généralités sur les marériaux composites	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition du matériau composite	3
I.3 Les propriétés des matériaux composites	4
I.4 Les constituants des matériaux composites	4
I.4.1 La matrice.....	5
I.4.1.1 Les matrices organiques	5
I.4.1.1.1 Les matrices thermdurcissables	5
I.4.1.1.2 Les matrices thermoplastiques.....	5
I.4.1.2 Les matrices minérales.....	6
I.4.1.2.1 Les matrices métalliques.....	6
I.4.1.2.2 Les matrices céramiques.....	7
I.4.2 Renfort	7
I.4.2.1 Les différents structures et géométrie des renforts	7
I.4.2.2 Les différentes natures de renforts	7
I.4.2.2.1 Fibre de verre	9
I.4.2.2.2 Fibre carbone.....	9
I.4.2.2.3 Fibre d'aramide.....	9
I.4.2.2.4 Fibre de bore.....	9
I.4.2.2.5 Fibre de silice	9
I.4.2.2.6 Fibre de polyéthylène	10
I.5 Classification des matériaux composites	10
I.5.1 Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants	10

I.5.2 Classification des matériaux composites suivants la nature des constituantes	10
I.6 La mise en œuvre des matériaux composite	10
I.6.1 Moulage au contact.....	11
I.6.2 Moulage par projection simultanée :	11
I.6.3 Injection thermodurcissable BMC: (Bulk Molding compound)	12
I.6.4 Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding compound).....	12
I.6.5 Enroulement filamentaire(ou bobinage).....	13
I.7 Matériaux composites à matrice métallique Al-SiC	14
I.7.1 Mise en œuvre des CMM	14
I.7.1.1 L'élaboration primaire	14
I.7.1.2 L'élaboration secondaire	14
I.8. Les matériaux utilisés	15
I.8.1 Le carbure de silicium	15
I.8.1.1 Définition.....	15
I.8.1.2 Les propriétés de carbure de silicium	15
I.8.1.3 Les domaines d'utilisation	15
I.8.2 L'aluminium.....	15
I.8.2.1 Définition.....	15
I.8.2.2 Les propriétés de l'aluminium	16
I.8.2.3 Domaines d'utilisation	17
I.9.Conclusion	17
II.Chapitre II : Le comportement élastique d'un matériau hétérogène	
II.1. Introduction	18
II.2 Généralité sur le comportement élastique du matériau:	18
II.2.1 Elasticité linéaire	18
II.2.2 Matériau anisotrope.....	19
II.2.3 Matériau monoclinique.....	20

II.2.4 Matériau orthotrope	20
II.2.5 Matériau orthotrope de révolution ou isotrope transverse	21
II.2.6 Matériau isotrope	22
II.3 Généralités sur les matériaux hétérogènes	22
II.3.1 Matériau poreux.....	23
II.4 Effet d'échelles dans les matériaux hétérogènes	24
II.5 Méthodologie de la modélisation par changement d'échelles :.....	25
II.5.1 Principe et représentation du milieu hétérogène.....	25
II.5.2 L'homogénéisation	25
II.5.2.1 Représentation	26
II.5.2.2 Localisation	26
II.5.2.3 Homogénéisation.....	27
I.6 La loi de mélange pour les composites stratifiés	28
II.7 Notion de VER dans un matériau hétérogène	29
II.8 Différentes approche d'homogénéisation des matériaux hétérogènes	30
II.9 Les techniques d'homogénéisation analytique et numérique.....	31
II.9.1 Homogénéisation analytique	31
II.11.1.1 Les bornes de Voigt et Reuss	31
II.11.1.2 Modèle de Mori et Tanaka.....	32
II.9.2 Homogénéisation numérique.....	32
II.10 Conclusion.....	33
III Chapitre III :Génération des microstructures 3D et maillage	
III.1 Introduction	34
III.2 Génération des microstructures 3D	34
III.3 Les méthodes de génération des microstructures 3D	34
III.3.1 La reconstitution à partir d'un Micro tomographe	34
III.3.2. Modèle d'addition séquentielle aléatoire (RSA)	35

III.3.3	Modèle de génération par la technique dynamique moléculaire	36
III.4	Génération des particules en 3D dans un volume cubique	37
III.5	Maillage 3D des microstructures :	39
III.6	Différentes méthodes de maillage.....	40
III.6.1	Maillage régulier	40
III.6.2	Maillage libre	40
III.7	Les conditions aux limites	40
III.8.	Conclusion	41
IV.	Chapitre IV :Comportement élastique d'un matériau hétérogène à trois phases	
IV.	Comportement élastique d'un matériau hétérogène à trois phases	42
IV.1	Introduction.....	42
IV.2	Matériaux et Méthodes.....	42
IV.2.1	Description de la microstructure	42
IV.2.2	Propriétés élastiques des phases	42
IV.2.3	Génération des modèles	43
IV.2.4	Maillage des modèles	44
IV.3	Allure de la contrainte	45
IV.4	Résultats et discussion	45
IV.4.1	Effet de nombre de particule d'inclusion sur les propriétés mécaniques	45
IV.4.2	Effet de nombre de particule de pores sur les propriétés mécaniques	47
IV.4.3	Effet de la fraction volumique de l'inclusion :	49
IV.4.4	Effet de la fraction des pores	51
IV.5	Comportement élastoplastique d'un composite à matrice métallique à trois phas.	52
IV.5.1	Effet de la fraction d'inclusion	52
IV.5.2	Effet de la fraction des pores	53
IV. 6	Conclusion	53
	Conclusion Générale	54

Références Bibliographiques 55
Résumé 57

Liste des figures

I.Chapitre I :Généralités sur les matériaux composites

Figure I.1 : Un matériau composite en général [4]	4
Figure I.2 : Les constituants des matériaux composites [6].....	4
Figure I.3 :Classification des matrices [7]	5
Figure I.4 : les structures géométriques des renforts [8].....	7
Figure I.5 :les types de renforts [9]	8
Figure I.6 :les différentes fibres, a) fibres de verre; b) fibres de carbone; c) fibres d'aramide; d) fibres de bores ; e) fibres de silice ; f) fibres de polyéthylènes.....	8
Figure I.7 : Moulage au contact [12].....	11
Figure I.8 : Moulage par projection simultanée [12].	12
Figure I.9 : Injection thermodurcissable BMC [12].....	12
Figure I.10 : Compression thermodurcissable SMC[12].	13
Figure I.11 : Enroulement filamentaire [12]	13
Figure I.12 : Aluminium	16
Figure I.13 : Structure d'aluminium.	16

II.Chapitre II : Le comportement élastique d'un matériau hétérogène

Figure II.1 : Plan de symétrie	20
Figure II.2 : Matériau orthotrope	20
Figure II.3 :plan d'isotropie	21
Figure II.4 : Exemple des matériaux hétérogènes multiphasique obtenus par la tomographie.	23
Figure II.5 :Matériaux hétérogène poreux :a)milieu poreux à l'échelle microscopique (CNRS Phototèque ISM),b)une mousse métallique réelle et c)une mousse simulée[22]	23
Figure II.6 :la taille et les constituants d'un matériau de construction dans les différentes échelles[24]	24
Figure II.7 : Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié[27].....	28
Figure II.8 : Modélisation par un système de ressorts des propriétés en flexion d'un composite stratifié[17].....	29
Figure II.9 : Exemple de VER d'une microstructure hétérogène.	30

III.Chapitre III :Génération des microstructures 3D et maillage

Figure III.1 : Shémas de la procédure de traitement d'un microstructure réelle pour la simulation	35
Figure III.2 : Microstructure générée à l'aide d'algorithme aléatoire séquentielle adsorption (RSA). Nombre de sphères = 30,fraction volumique = 30%	36
Figure III.3 :Parking d'ellipsoïdes aplatis générés en utilisant l'algorithme de dynamique moléculaire proposé par Donev et al.Nombre de l'ellipsoïdales = 1000 , fraction volumique = 70 %.....	37
Figure III.4 :Génération des particules sphériques dans un volume cubique	37
Figure III.5 :Propriétés géométriques de la cellule cubique.....	38
Figure III.6 : Définition de la géométrie et du paramétrage des particules.....	39

IV.Chapitre IV :Comportement élastique d'un matériau hétérogène à trois phases

Figure IV.1 : Exemple de volume représentatif pour différentes fraction volumique d'inclusion et des pores.	43
Figure IV.2 : Exemples de maillage de volumes représentatifs pour différentes fraction volumique d'inclusion et des pores	44
Figure IV.3 : Allure de la deformation du a la contrainte de tration(a)et à la contrainte de cisaillement (b).	45
Figure IV.4 : Courbes de module de Young(a) et de module de cisaillement (b) en fonction de nombre d'inclusion, pour le cas sans pores et avec pores (5% d'inclusion et1% de pores).	46
Figure IV.5 : Courbes de module de Young (c) et de module de cisaillement (d) en fonction de nombre d'inclusion, pour le cas sans pores et avec pores (10% d'inclusion et 3% de pores)	46
Figure IV.6 : Courbes de module de Young (e)et de module de cisaillement (f)en fonction de nombre d'inclusion, pour le cas sans pores et avec pores (15% d'inclusion et 5% de pores).	47
Figure IV.7 : Courbes de module de Young (a') et du module de cisaillement (b') en fonction de nombre pores, pour le cas sans pores et avec pores (20 particules 5% d'inclusion et 1% de pores.	48
Figure IV.8 Courbes de module de Young (c') et du module de cisaillement (d')en fonction de nombre de pores, pour le cas sans pores et avec pores (50 particules 15% d'inclusion et 1% de pores).	48
Figure IV.9 : Courbes de module de Young (e') et du module de cisaillement (f')en fonction de nombre de pores, pour le cas sans pores et avec pores (100 particules 10% d'inclusion et 3% de pores).	48
Figure IV.10 : courbes de module de Young(A) et du module de cisaillement (B)en fonction de la fraction volumique d'inclusion pour le modèle analytique et numérique (20 particule 5% pores).	49
Figure IV.11 : Courbes de module de Young (C) et du module de cisaillement(D) en fonction de la fraction volumique d'inclusion pour le modèle analytique et numérique (50 particule 5% pores).	50
Figure IV.12 : Courbes de module de Young (E) et du module de cisaillement (F) en fonction de la fraction volumique d'inclusion pour le modèle analytique et numérique (100 particule 5% pores).	50
Figure IV.13 : Courbes de module de Young (A') et du module de cisaillement (B') en fonction de la fraction volumique de pores pour le modèle analytique et numérique (20 particule 5%d'inclusion).	51
Figure IV.14 Courbes de module de Young(C') et du module de cisaillement (D') en fonction de la fraction volumique de pores pour le modèle analytique et numérique (50 particule 10%d'inclusion)	51
Figure IV.15 : courbes de module de Young(E') et du module de cisaillement (F') en fonction de la fraction volumique de pores pour le modèle analytique et numérique (100 particule 15%d'inclusion).	52
Figure IV.16 : Effet de la fraction volumique de l'inclusion sur le comportement élastoplastique de matériau.	52
Figure IV.17 : Effet de la fraction volumique des pores sur le comportement élastoplastique de matériau.	53

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principales différences entre les Matrices TP et TD [1]	6
Tableau I.2: Les propriétés physiques de l'aluminium dépendant du traitement thermique, du traitement mécanique et des éléments ajoutés. [18] [19]	17

Nomenclature

CMM : Composite à matrice métallique.

Sic : Carbure de silicium.

CMO : Composite à matrice organique.

CMC : Composite à matrice céramique.

Al : Aluminium

Fe : Fer.

CFC : Cubique à faces centrées.

TP : Thermoplastique.

TD : Thermodurcissable.

HR : Haute résistance.

HM : Haut module.

O : Oxygène.

B: Bore.

C: Carbone.

BMC: Bulk molding compound

SMC: Sheet molding compound

σ : Tenseur de contrainte de second ordre.

ε : Tenseur de déformation de second ordre.

C : Tenseur de rigidité symétrique de quatrième ordre (module d'élasticité)

$\llcorner\rangle$: Le double produit scalaire entre deux tenseurs.

S : Matrice de flexibilité ou de souplesse symétrique. (Module de complaisance).

λ, μ : Les coefficients de lamé.

I^v : La partie volumétrique d'un tenseur à quatre ordres.

I^d : La partie déviatorique d'un tenseur à quatre ordres.

$\underline{\underline{\sigma}}_{ph}$: Les contraintes locales de la phase 'ph'.

$\underline{\underline{\varepsilon}}_{ph}$: Les déformations locales de la phase 'ph'.

$\underline{\underline{C}}_{ph}$: Tenseur de rigidité de la phase 'ph'.

$\underline{\underline{S}}_{ph}$: Tenseur de souplesse de la phase 'ph'.

$\underline{\underline{E}}$: Déformation macroscopique.

$\underline{\underline{\Sigma}}$: Contrainte macroscopique.

$\langle . \rangle$: Opérateur moyen.

$\underline{\underline{A}}_{ph}$: Tenseur de localisation des déformations de la phase 'ph'.

$\underline{\underline{B}}_{ph}$: Tenseur de concentration de contrainte de la phase 'ph'.

$\underline{\underline{I}}$: Tenseur unité d'ordre quatre.

A : Tenseur de localisation en déformation identique d'ordre quatre.

B : Tenseur de concentration des contraintes identique d'ordre quatre.

Macro : Macroscopique.

Méso : Mésoscopique.

Micro : Microscopique.

D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

VER : Volume élémentaire représentatif.

VE : Volume élémentaire.

$\underline{\underline{I}}_4$: Le tenseur unité d'ordre 4.

f_m, \mathbf{V}_m : Fraction volumique de la matrice

, \mathbf{V}_i : Fraction volumique de l'inclusion

f_p, \mathbf{V}_p : Fraction volumique des pores.

Pi : Propriété de l'inclusion.

Pm : Propriété de la matrice.

Pp : Propriété des pores.

Ep, Ei, Em : Le module Young des pores, de l'inclusion et de la matrice.

Cp, Ci, Cm : Le module des pores, de l'inclusion et de la matrice

D : Diamètre de sphère.

L : Cote de la cellule

N_p, N_i : Nombre de particule d'inclusion et de pores.

S_p, S_i, S_m : L'aire des pores, d'inclusion et de la cellule.

EF : Eléments finis.

SUBC : Conditions aux limites statiques homogènes.

KUBC : Conditions aux limites cinématiques homogènes.

PBC : Conditions aux limites périodiques.

\underline{u} : Le déplacement.

\underline{v} : La fluctuation périodique.

ν : Coefficient de poisson.

μ : Le module de cisaillement.

Introduction Générale

Introduction Générale

Les composites à matrice métallique (CMM) ont connu une croissance rapide depuis leur création dans les années 1960, et leurs prix relativement élevés ont limité leur application essentiellement à l'aérospatiale. Il a fallu attendre les années 1980 pour que l'apparition de renforts commercialement intéressants et de meilleure qualité permette d'envisager d'autres domaines.

Aujourd'hui, les concepteurs des secteurs de l'automobile, de l'électronique et des loisirs s'intéressent beaucoup aux CMM en raison de leur capacité à répondre à des exigences mécaniques spécifiques.

Les composites à matrice métallique (CMM) comme leur nom l'indique sont des matériaux qui réunissent deux éléments : une matrice métallique par exemple en aluminium, magnésium-zinc..., et un renfort métallique ou bien céramique comme les particules de silicium, fibre de carbone, fibre de bore....etc.

Comme tous les matériaux, lors de la mise en œuvre des CMM, des petites cavités d'air peuvent apparaître dans la matrice du composite, et cela peut être dû à différentes raisons mécaniques, thermodynamiques..., qui peuvent intervenir séparément ou simultanément lors de la conception. Ces cavités ou bien pores peuvent prendre différentes formes et tailles.

Le but de notre travail est la détermination multi-échelle des propriétés effectives d'un composite à matrice métallique contenant trois phases, une matrice en aluminium, des particules sphériques de carbure de silicium (SiC) et des pores sphériques. Nous avons étudié plusieurs cas différents, en faisant varier les fractions volumiques et le nombre de particules de SiC et des pores. Ce travail se divise en quatre chapitres :

Le premier chapitre donne un aperçu général sur les matériaux composites, leurs constituants, leur classement suivant différents critères, et les méthodes de leur mise en œuvre. À la fin nous avons parlé des deux matériaux qui constituent le composite étudié dans notre cas qui sont l'aluminium et le carbure de silicium.

Le deuxième chapitre est une étude brève sur la micromécanique, et l'importance d'échelle d'étude utilisé et de l'homogénéisation pour la détermination de comportement et des propriétés mécanique effective d'un matériau hétérogène à partir de ces constituent.

Dans le troisième chapitre nous allons aborder la génération des microstructures 3D et leurs maillages qui sont des étapes primordiales dans notre étude.

Le quatrième chapitre sera consacré à la modélisation multi échelle pour déterminer les propriétés effectives d'un composite à matrice métallique avec pores. Nous y effectuerons des simulations numériques et des modélisations analytiques pour comprendre l'effet de l'inclusion et de la porosité sur ce matériau.

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites

I. Généralités sur les matériaux composites

I.1 Introduction

Du aux besoins croissants des utilisateurs (constructeurs, industriels), d'un matériau plus performant, plus économique et qui dure plus longtemps, l'utilisation des matériaux composites est devenue incontournable dans les industries et cela pour leurs avantages : grande résistance à la fatigue, faible vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur et enfin l'insensibilité aux produits chimiques et mécaniques.

Dans ce chapitre nous allons apporter des connaissances sur les matériaux composites en décrivant leurs compositions, leurs propriétés et leurs structures.

I.2 Définition du matériau composite

Un matériau composite est l'assemblage de deux matériaux différents ou plus, de nature différentes non miscibles, afin d'aboutir à un nouveau matériau dont les propriétés sont supérieures à celles des constituants pris séparément .Ils sont constitués de deux phases continue et discontinue, dont la phase discontinue est appelé renfort elle est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue qui est appelé matrice [1].

L'intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques et ses performances remarquables ce qui apporte de nombreux avantages fonctionnels, parmi ces caractéristiques [2] [3].

- La légèreté.
- Une grande résistance à la fatigue
- La liberté de formes
- Une maintenance réduite
- Un faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf au Carbone)
- l'insensibilité aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
- Une meilleure tenue aux chocs et au feu.
- Une meilleure isolation thermique.

- Une meilleure isolation électrique pour certains d'eux.

Leur faible taux d'utilisation vient de leur coût

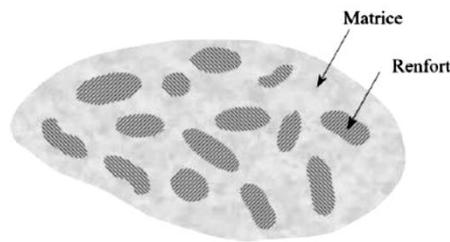


Figure I.1 : Un matériau composite en général [4]

I.3 Les propriétés des matériaux composites

Les propriétés supérieures obtenues dans les matériaux composites sont dues à plusieurs facteurs qui sont [1] :

- les propriétés, la nature, la quantité et la concentration des constituants,
- leur distribution et répartition géométrique,
- De leurs interactions, etc....

I.4 Les constituants des matériaux composites

Généralement les matériaux composites sont constitués d'une matrice dite « matrice » et de l'ossature appelée « renfort ». Dans certains cas des charges et des additifs peuvent être utilisés [3] [5].

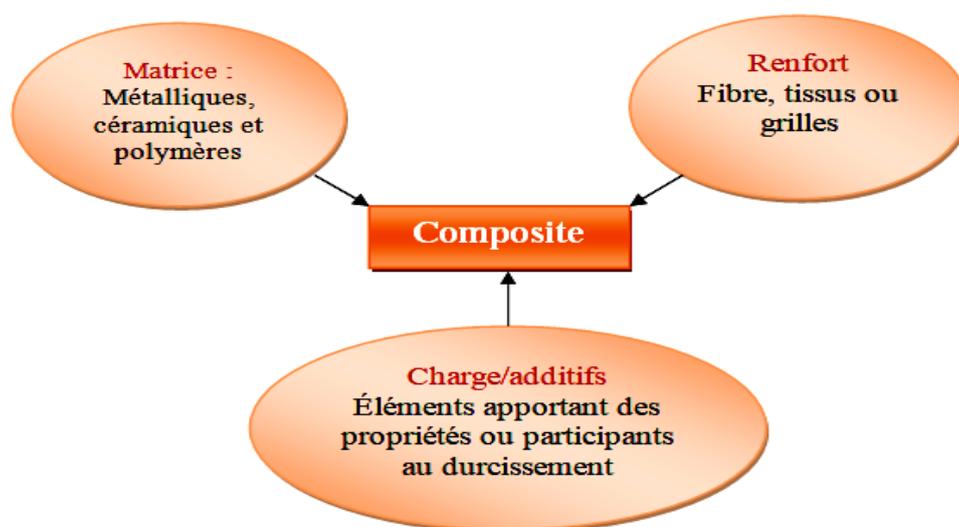


Figure I.2: Les constituants des matériaux composites [6]

I.4.1 La matrice

La matrice se compose d'une résine soit thermodurcissable ou thermoplastique, son rôle est d'assurer la répartition spatiale et homogène de renfort, lier les fibres de renfort et leur donner une adhérence suffisante pour garantir la transmission des efforts extérieurs vers eux, apporter une tenue chimique et donner une forme désirée au produit [1][5].

On distingue deux grandes familles de matrices :

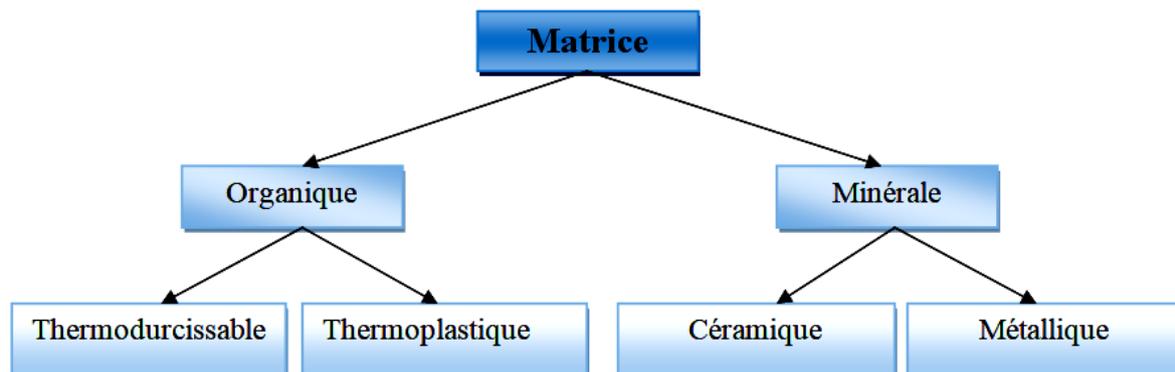


Figure I.3: Classification des matrices [7]

I.4.1.1 Les matrices organiques

Les matrices polymères synthétiques sont les plus couramment rencontrées dans les composites de grande diffusion. Associées à des fibres de verre, d'aramide ou de carbone.

Ils ont un faible module et une faible résistance à la traction, mais sont facilement utilisés pour imprégner les armatures pour la fabrication. Elles se divisent en deux familles de matrices [1] :

I.4.1.1.1 Les matrices thermodurcissables

Ces matrices ont des propriétés mécaniques élevées, elles sont mises en forme qu'une seule fois et se polymérisent selon la forme souhaitée, la transformation est donc irréversible. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Parmi ces matrices on trouve les résines polyester insaturées, résines de condensation et les résines époxy. [1]

I.4.1.1.2 Les matrices thermoplastiques

Les matrices thermoplastiques contrairement aux thermodurcissables ont des propriétés mécaniques faibles. Elles sont dures et solides ce qui nécessite une transformation à très haute température. Elles sont mises en forme par chauffage, durcissent au cours du

refroidissement. La transformation est réversible. Les polychlorures de vinyle, les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. [1]

Il existe certaines différences entre les matrices thermodurcissables et les matrices thermoplastiques qui sont citées dans le tableau ci-dessous :

Matrices	Thermoplastiques (TP)	Thermodurcissables (TD)
Etat de base Stockage	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
	Illimité	Réduit
Moulage Chauffage+ refroidissement	Chauffage+ refroidissement	Chauffage continu
	Court	long
	Réduite	bonne
	Assez bonne	limitée
	Recyclables	Perdus ou recyclés en charge
Mouillabilité renforts	Difficile	Aisée

Tableau I.1 : Principales différences entre les Matrices TP et TD [1]

I.4.1.2 Les matrices minérales

Qui se divisent en deux familles : [1]

I.4.1.2.1 Les matrices métalliques

L'imprégnation de renforts par un alliage liquide est une opération techniquement délicate, en pratique seuls les alliages d'aluminium sont utilisés dans ce type de technique, associés à des fibres ou particules de graphite ou de céramique. Le compromis obtenu entre la ténacité de la matrice métallique et la rigidité des renforts donne au composite des caractéristiques mécaniques intéressantes par rapport à l'alliage seul, surtout au-dessus de 200 °C [1].

I.4.1.2.2 Les matrices céramiques

Les composites à matrices céramiques peuvent être obtenus par imprégnation de préformés de fibres (métaux, verres, aramides, carbone, céramique) soit par des suspensions liquides, ensuite frittées en température sous haute pression, soit par des gaz réactifs permettant un dépôt entre les fibres (notamment pour les composites carbone-carbone) [1].

I.4.2 Renfort

Le renfort généralement est un matériau plus dur que la résine, il représente le squelette du matériau, il garantit sa tenue mécanique ce qui assure sa rigidité et sa résistance à la traction. Les renforts peuvent avoir diverses formes et origines. [5]

I.4.2.1 Les différents structures et géométrie des renforts

Suivant la forme et la géométrie des renforts on peut les classer en trois types [8] :

- Les fibres longues.
- Les fibres courtes
- Les particules, ou charges renforcées

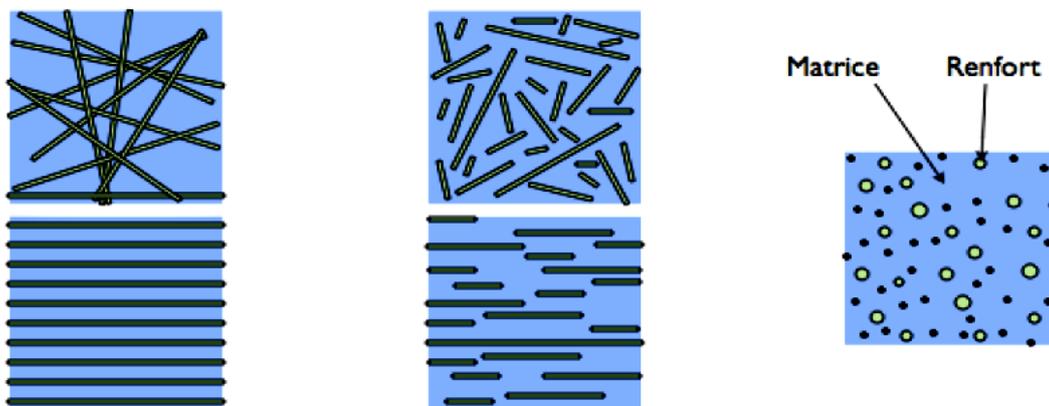


Figure I.4: les structures géométriques des renforts [8].

I.4.2.2 Les différentes natures de renforts

Les renforts sont généralement des fibres comme la fibre de verre, la fibre de carbone, la fibre d'aramide ou encore la fibre végétale qui est renouvelable... etc.

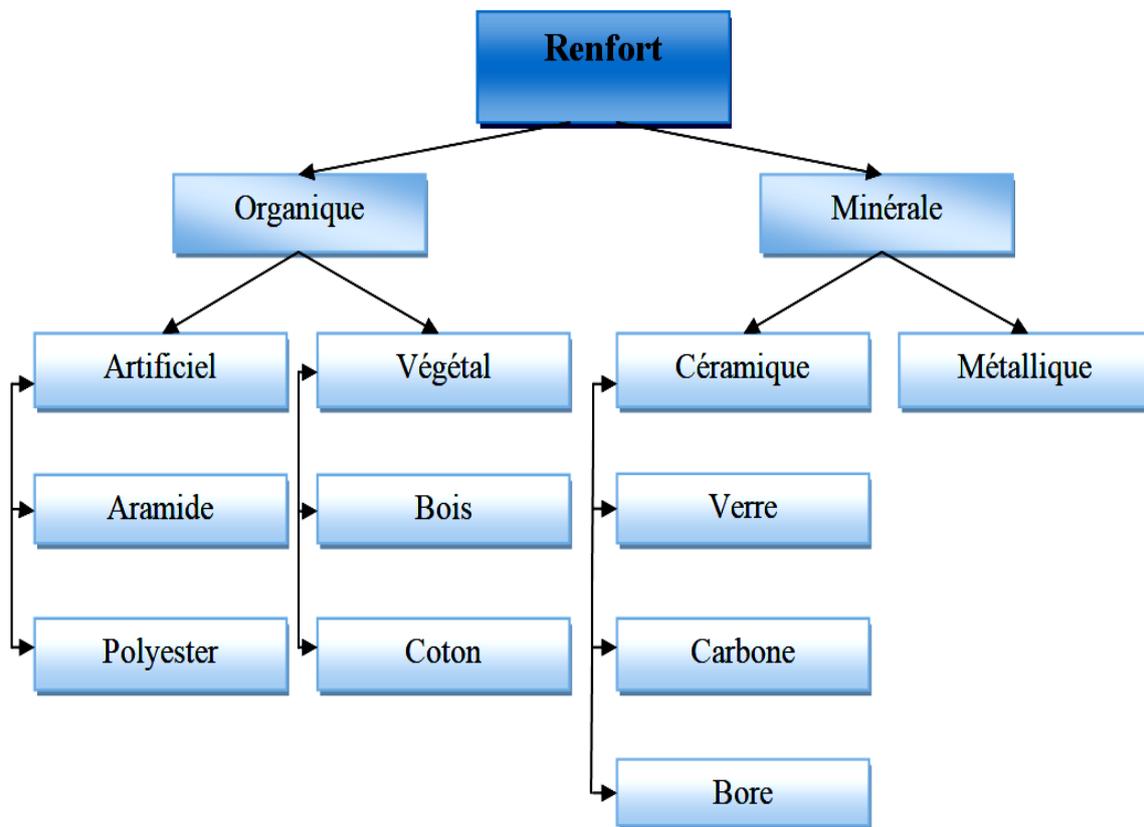


Figure I.5: les types de renforts [9]

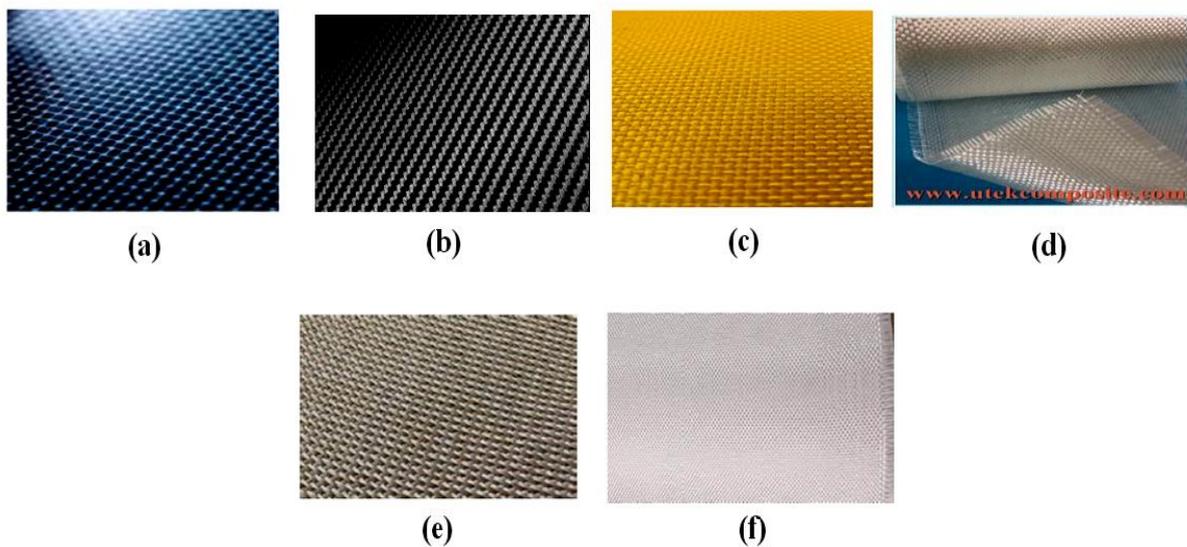


Figure I.6: les différentes fibres, a) fibres de verre; b) fibres de carbone; c) fibres d'aramide; d) fibres de bores ; e) fibres de silice ; f) fibres de polyéthylènes.

I.4.2.2.1 Fibre de verre

Qui est la fibre la plus répandue, la plus ancienne et la moins cher de toutes les fibres, et au même temps celle dont on réalise le plus fort tonnage. Elle constitue le renfort de base des composites à grande diffusion .elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux...etc.), on distingue trois types de fibre [10] :

- E : Pour les composites de grande diffusion et les applications courante
- R : Pour les composites hautes performances.
- D : Pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

I.4.2.1.2 Fibre carbone

La fibre la plus couramment utilisée dans les applications hautes performances, elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile).Il en existe deux types selon la température de combustion [10] :

- Fibres haute résistance(HR) : pour une combustion de 1000 à 1500°C.
- Fibres haut module (HM) : pour une température de 1800 à 2000°C

I.4.2.1.3 Fibre d'aramide

Communément appelées KEVLAR dérivées de la chimie des polyamides aromatique .deux types de fibre d'aramide de différentes rigidité peuvent être trouvées [10].

- La fibre basse module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles.
- La fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances

I.4.2.1.4 Fibre de bore

Une fibre de haut module, insensible à l'oxydation à haute température, elle est obtenue par dépôt de phase vapeur sur une matrice de tungstène [10].

I.4.2.1.5 Fibre de silice

Ou les fibres de quartz sont obtenues comme le verre par fusion, principalement utilisées pour une résistance élevée aux produits chimiques et à la chaleur dans les tuyères des moteurs de fusée [10].

I.4.2.1.6 Fibre de polyéthylène

Elles ont une très bonne résistance à la traction mais une faible mouillabilité. Pour des structures à faible contrainte on peut aussi utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester [10].

I.5 Classification des matériaux composites

Le classement des matériaux composite est fait suivant la forme et la nature des constituants [11].

I.5.1 Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants

- Composite à particules : le renfort se trouve sous forme de particules.
- Composite à fibre : le renfort se trouve sous forme de fibres, qui a leur tour se divisent en :
 - Composite à fibre longues.
 - Composite à fibre courte.
 - Composite à renfort tissu.

I.5.2 Classification des matériaux composites suivants la nature des constituantes

On distingue habituellement trois familles : [11]

- Les composites à matrice organique (CMO)
- Les composites à matrice céramique (CMC)
- Les composite à matrice métallique (CMM)

I.6 La mise en œuvre des matériaux composite

Généralement le choix d'un procédé de moulage se fait en fonction de certains paramètres à savoir [6]

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- Durcissement de système soit :

- Par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables.
- Par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques

Les procédés les plus importants sont :

- Moulage par contact.
- Moulage par projection simultanée.
- Injection thermodurcissable BMC.
- Compression thermodurcissable SMC.
- Enroulement filamenteux.

I.6.1 Moulage au contact

Ce procédé entièrement manuel permet la réalisation de pièces de toutes dimensions aux formes simples ou complexes. Les pièces sont fabriquées à température ambiante et sans pression. Le principe consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu), imprégnés manuellement d'une matrice thermodurcissable. Cette méthode permet de réaliser des pièces prototypes ou de simulation avec une cadence très faible [6].

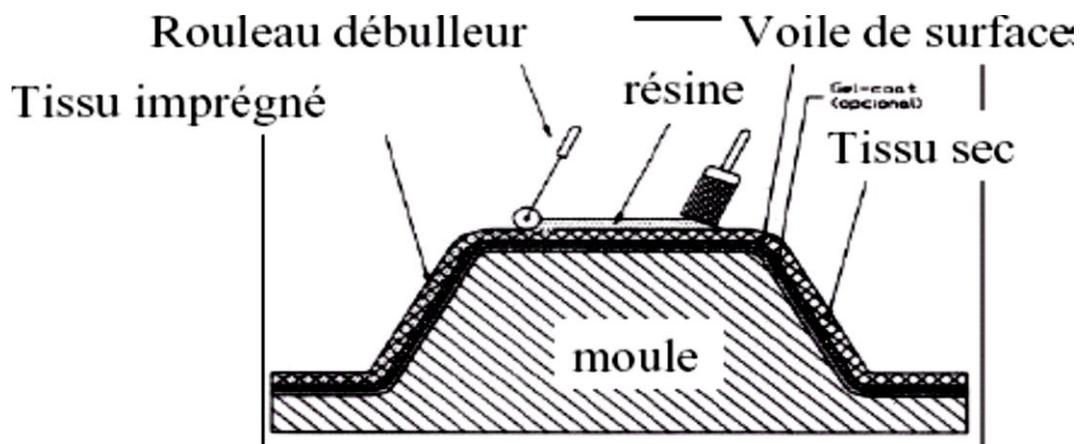


Figure I.7 : Moulage au contact [12].

I.6.2 Moulage par projection simultanée :

Est un procédé semi-mécanisé qui permet la réalisation de pièces de grandes dimensions aux formes simples ou complexes. Rapide et facile à mettre en œuvre, il nécessite l'utilisation d'une machine qui permet la projection simultanée de fibres coupées et résine sur le support. Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient [6].

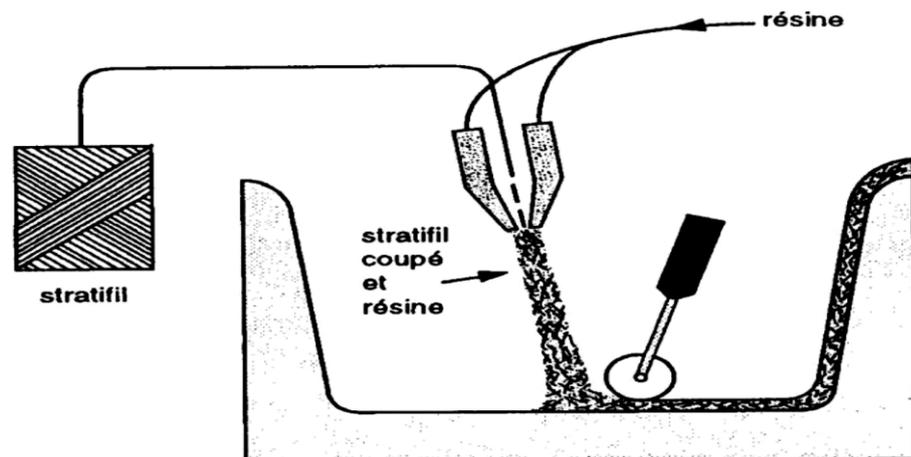


Figure I.8 : Moulage par projection simultanée [12].

I.6.3 Injection thermodurcissable BMC: (Bulk molding compound)

Le moulage du compound est réalisé entre moule et contre moule chauffé à température entre 140 à 170°C sous une pression de 50 à 100bars.

- Les avantages : réalisation de grandes séries, peu de finition.

(Le compound : c'est la résine, de la fibre coupée et de la charge)[6].

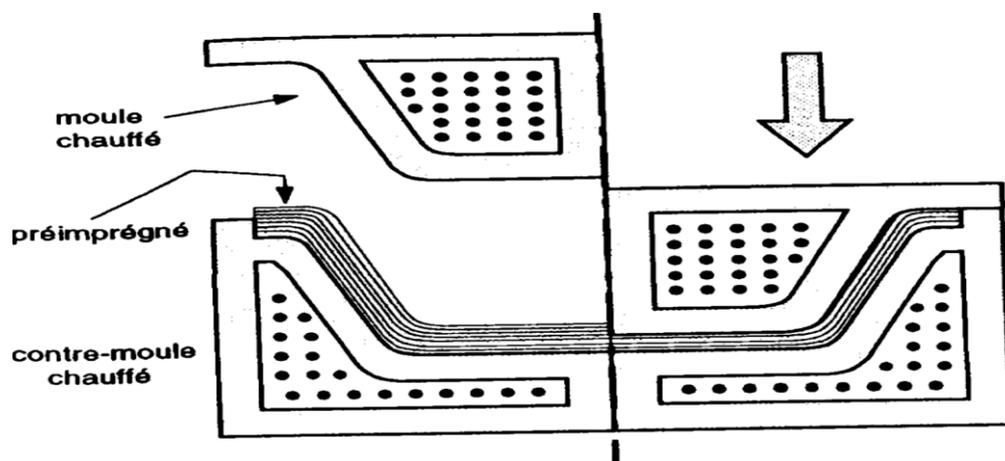


Figure I.9 : Injection thermodurcissable BMC [12].

I.6.4 Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding compound).

Le Principe consiste à déposer des feuilles de pré imprégnés dans un contre moule chauffé et de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation éjection de la pièce.

Les avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques. Le dimensionnement des presses et la finition [6].

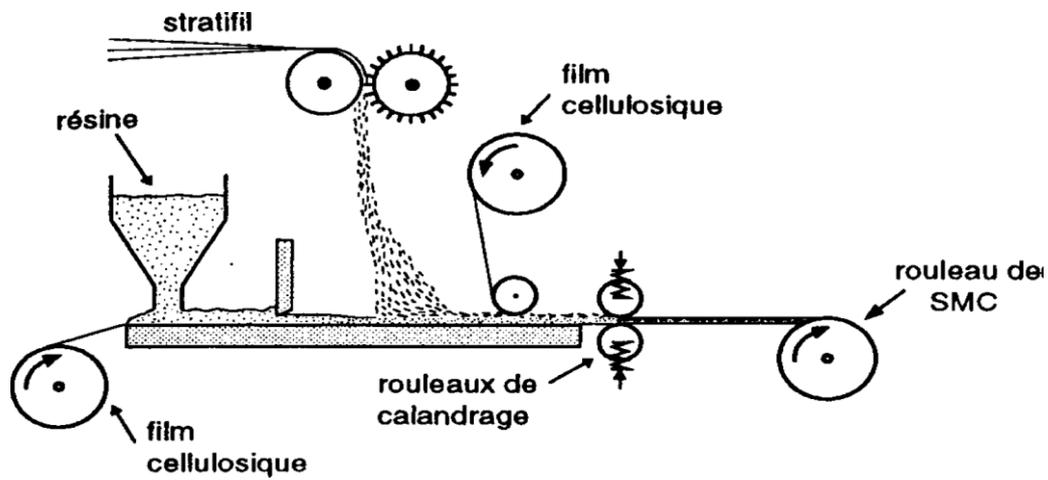


Figure I.10 : Compression thermosable SMC [12].

I.6.5 Enroulement filamentaire(ou bobinage)

Est un procédé qui permet l'obtention de corps creux en bobinant sur un moule appelé mandrin.

Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses [6].

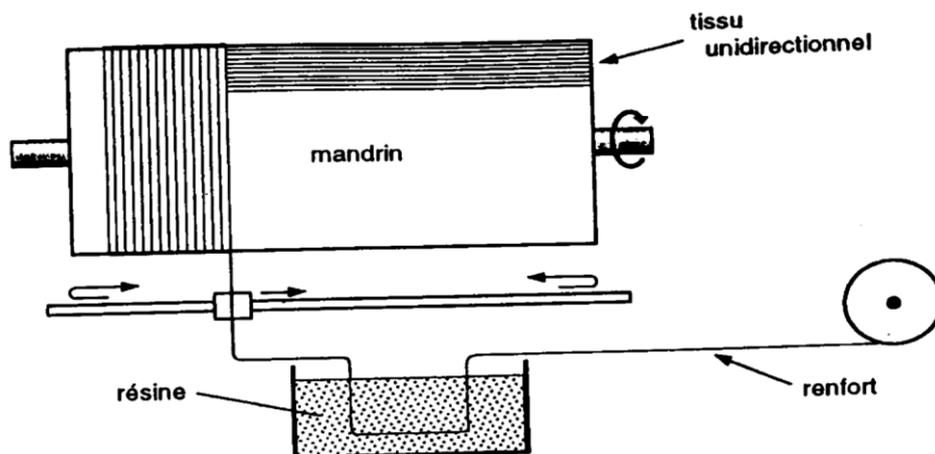


Figure I.11 : Enroulement filamentaire [12]

I.7. Matériaux composites à matrice métallique Al-SiC

Les composites à matrice métallique (CMM) sont des matériaux dans lesquels des particules ou des fibres de céramique (SiC, Al₂O₃, B₄C) sont insérées dans une matrice métallique (aluminium, fonte, titane, cuivreux) et leur confèrent des propriétés d'usage optimisées là où les contraintes tribologiques, mécaniques ou thermiques sont élevées. Les performances d'un CMM sont dues essentiellement à la nature de la matrice et celle du renfort (nature, taux d'introduction, taille des particules). [13].

I.7.1 Mise en œuvre des CMM

On distingue [13] :

I.7.1.1 L'élaboration primaire

Dont des billettes de CMM contenant des particules sont fabriquées, elle se fait par trois technologies :

- L'infiltration des particules par de métal liquide.
- La métallurgie des poudres.
- Le brassage.

I.7.1.2 L'élaboration secondaire

Des pièces peuvent être formées soit par le remplissage des moules par de CMM liquide (alliages ou billettes), ou bien par la réalisation des CMM in situ, en plaçant la céramique (particules ou fibres) dans un moule puis en l'infiltrant par du métal liquide.

La mise en forme peut se faire par différents procédés :

- Moulage gravité (sable, cire perdue...)
- Fonderie sous pression.
- Squeeze-casting.
- La centrifugation.

I.8. Les matériaux utilisés

I.8.1 Le carbure de silicium

I.8.1.1 Définition

C'est un composé chimique de formule SiC, il se comporte presque comme le diamant, il n'est pas seulement le matériau céramique le plus léger mais aussi le plus dur. Il se caractérise par une faible densité, une excellente conductivité thermique, une faible dilatation, et une haute résistance aux acides et bases [14].

I.8.1.2 Les propriétés de carbure de silicium

- Faible densité de 3.07 à 3.15 g/cm³.
- Coefficient de poisson 0.16.
- Degré élevé de dureté HV10 ≥ 22 GPa.
- Module d'Young élevé de 380 à 430 GPa.
- Haute conductivité thermique de 120 à 200 W/Mk.
- La température d'exploitation maximale du SiC sous gaz interne 1800°C.
- Excellente résistance au choc thermique ΔT 1100 K.

I.8.1.3 Les domaines d'utilisation

Le carbure de silicium est principalement utilisé en usinage (outils, pièces de friction), comme abrasif ou comme renfort (joints, composite à matrice céramique). Il peut également être utilisé comme échangeurs de chaleur, supports de catalyseur ou pour ces propriétés semi-conductrices à large bande interdite pour les applications d'électronique de puissance, il est également utilisé dans l'espace comme grands miroirs et structures pour télescopes. Il est aussi utilisé dans le secteur médical-implantologie [16].

I.8.2 L'aluminium

I.8.2.1 Définition

L'aluminium est l'élément métallique le plus abondant dans la nature, c'est le métal le plus employé après l'acier. Il est léger, robuste, facile à usiner, économique et résistant à la corrosion, sa couleur blanc tirant légèrement sur le bleu [17].



Figure I.12 : Aluminium

L'aluminium est un élément du troisième groupe de classification de Mendéléiev.

L'aluminium industriel contient 0,5% d'impuretés (principalement Fe+Si) mais il peut être obtenu presque pur raffinage électrolytique ($Al > 99,99\%$). ces impuretés ont différents effets sur leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques [17].

La structure de l'aluminium émane de celle du CFC, c'est à dire Cubique à faces centrées comme il est montré dans la figure (I. 13) ci-dessous : [17]

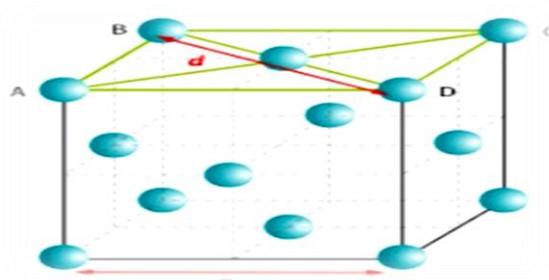


Figure I.13 : Structure d'aluminium.

I.8.2.2 Les propriétés de l'aluminium

L'aluminium pur industriel à l'état recuit a de mauvaises propriétés mécaniques, mais ces propriétés peuvent être améliorées par un écrouissage, l'ajout d'éléments d'alliage ou un traitement thermique [18] [19] :

Quelques propriétés mécaniques et physiques d'aluminium :

Propriété	Valeur
Masse volumique	2700 Kg.m ⁻³
point de fusion	660.45 °C

Point d'ébullition	2519°C
Pression de vapeur	3.7×10^{-3} Pa
Energie interne massique	3.98×10^5 J.Kg ⁻¹
Capacité thermique massique	897 J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹
Conductivité thermique	237 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Module d'élasticité	67000 [MPa]
Coefficient de poisson	0.34
Densité	2.7 Kg/dm ³
Allongement à la rupture	20 à 30 %
Limite de résistance à la rupture	60 à 125 MPa
Limite élastique à la traction	30 [MPa]
Module de torsion	27 [GPa]

Tableau I.2: Les propriétés physiques de l'aluminium dépendant du traitement thermique, du traitement mécanique et des éléments ajoutés. [18] [19]

I.8.2.3 Domaines d'utilisation

Le coût de production de l'aluminium a baissé depuis l'avènement de l'électrolyse en 1887. Les secteurs du transport, de la construction, de l'emballage et de la vie quotidienne sont les marchés les plus importants pour les produits en aluminium. Les autres utilisations concernent les équipements électriques, la mécanique, la chimie et la pharmacie [20].

I.9. Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux très divers, disponible partout et actuellement en croissance significative dans tous les domaines. Ce chapitre donne un aperçu des matériaux composites, de leur processus de mise en forme et de leur conception, ainsi que de leur utilisation dans l'industrie. De plus, nous décrivons deux matériaux différents (l'aluminium et carbure de silicium) et leurs propriétés.

Chapitre II

Comportement élastique du matériau hétérogène

II Le comportement élastique d'un matériau hétérogène.

II.1. Introduction

La mécanique est une vaste science divisée en plusieurs branches au sien de ces branches on trouve la micromécanique qui a l'avantage de pouvoir capturer les déformations physiques et les dommages à une échelle fondamentale, ce qui permet une meilleur saisi des taux de contraintes et de déformations multiaxiaux.

La micromécanique vise donc à déterminer l'état mécanique de chaque composant d'un matériau composite, à décrire le comportement global d'un matériau hétérogène à partir du comportement de ces constituants et aussi à prédire les propriétés effectives du matériau comme les constantes thermo-élastiques, les propriétés viscoélastiques, les propriétés de résistance, la fonction d'élasticité, la ténacité à la rupture, les conductivités thermiques et les propriétés électromagnétiques. L'utilisation des informations liées à la microstructure pour définir celles de la macrostructure nécessite toujours un changement d'échelle donc une homogénéisation. Dans ce chapitre on traitera de tous les éléments motionnés plus haut en détail.

II.2 Généralité sur le comportement élastique du matériau:

Pour bien définir le comportement mécanique d'un milieu, on utilise les lois dites de comportement, liant les champs de déformation et de contraintes, ces lois sont décrites par des axiomes qui expliquent le mieux les phénomènes observé. Des expériences montrent que pour une température donnée et un intervalle de déformation donné plusieurs milieux solides et déformables présentent un comportement élastique linéaire. [21]

Dans le domaine linéaire le matériau composite se comporte comme tout autre matériau conventionnel en supposant que la température est uniforme dans tout le volume considéré. [21].

II.2.1 Elasticité linéaire

La relation élastique linéaire communément appelée loi de Hooke généralisé s'écrit :

Sous forme condensée [21] :

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (\text{II.1})$$

Avec $\boldsymbol{\sigma}$: le tenseur de contrainte de second ordre.

$\boldsymbol{\varepsilon}$: le tenseur de déformation de second ordre.

\mathbf{C} : le tenseur de rigidité symétrique du quatrième ordre.

«:» : Désigne le double produit scalaire entre deux tenseurs.

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \sigma_{ii} &= \sigma_\alpha & \varepsilon_{ii} &= \varepsilon_\alpha & \alpha &= 1 \\ \sigma_{ij} &= \sigma_\beta & \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_\alpha & \beta &= 9 - i - j \end{aligned}$$

Elle peut aussi s'écrire sous la forme inverse

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S} \boldsymbol{\sigma} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$$\mathbf{S} = \mathbf{C}^{-1} \quad (\text{II.4})$$

Ou \mathbf{S} : matrice de flexibilité ou de souplesse (symétrique).

Ainsi, dans le cas général, le comportement linéaire du matériau se décrit par 21 coefficients indépendants.

II.2.2 Matériau anisotrope

Généralement les matrices de rigidité et de souplesse sont déterminées chacune par 21 constantes indépendantes. Cette situation correspond à des matériaux sans symétrie appelés matériau triclinique ou anisotrope. Ce type de matériau présente des propriétés différentes en fonction de la direction [21].

II.2.3 Matériau monoclinique

On appelle matériau monoclinique un matériau avec un seul plan de symétrie [21].

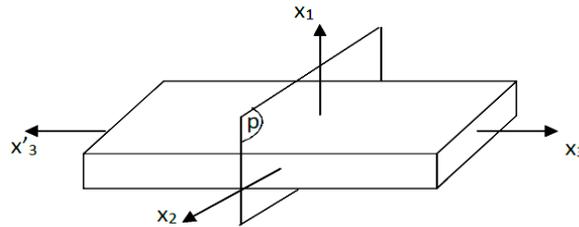


Figure II.1: Plan de symétrie.

La matrice de rigidité ou souplesse doit rester inchangé malgré tout changement de base effectué par symétrie par rapport au plan de symétrie du matériau.

L'exploitation des changements de base pour le cas où le plan (1,2) et le plan de symétrie donne une matrice de rigidité avec 13 constantes d'élasticité indépendantes (La matrice de souplesse a la même forme) [22].

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & C_{36} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & C_{44} & C_{45} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & C_{45} & C_{55} & \mathbf{0} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 5})$$

II.2.4 Matériau orthotrope

L'orthotrope est un cas particulier de l'anisotropie, Un matériau orthotrope possède trois plans de symétrie, perpendiculaires deux à deux [21].

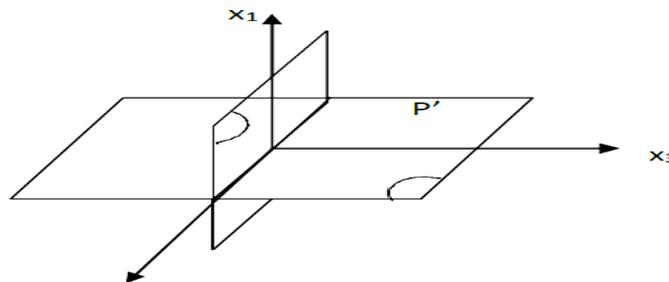


Figure II.2: Matériau orthotrope.

Pour obtenir la matrice de rigidité (la même forme que la matrice de souplesse), ils ont ajoutés au matériau monoclinique un plan de symétrie perpendiculaire au plan précédent.

L'invariance de la matrice dans un changement de base apportée par la symétrie autour du second plan se traduit par une matrice de rigidité avec un nombre de constantes d'élasticité indépendantes ramené à 9 [22]:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

II.2.5 Matériau orthotrope de révolution ou isotrope transverse

Il se comporte comme un matériau orthotrope, avec un axe de révolution ou de rotation supplémentaire, de sorte que tout changement de base effectué par rotation quelconque autour de cet axe doit maintenir la matrice de rigidité constante [21].

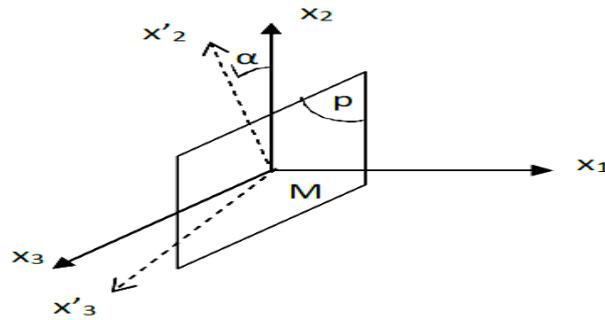


Figure II.3: Plan d'isotropie.

La matrice de rigidité est déterminée par 5 constantes d'élasticité indépendantes, elle s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22}-C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

II.2.6 Matériau isotrope

Ce dit d'un matériau dont les propriétés sont les même dans toutes les directions donc elles ne dépendent pas de la direction ou du choix d'axe de référence. La matrice de rigidité (ou souplesse) doit rester constante dans tout changement de bases orthonormées [21].

Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes de la matrice de rigidité est donc réduit à 2.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1(C_{11}-C_{12})}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1(C_{11}-C_{12})}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1(C_{11}-C_{12})}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 7})$$

Les constantes de rigidité sont généralement exprimées en introduisant les coefficients de lamé λ et μ :

$$\begin{cases} C_{11} = \lambda + 2\mu \\ C_{12} = \lambda \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Ou bien on peut utiliser la formule suivante pour décrire complètement la caractéristique de C :

$$C = 3KI^V + 2G I^d \quad (\text{II.10})$$

Avec I^V et I^d la partie volumétrique et la partie dévia torique d'un tenseur à quatre ordres.

II.3 Généralités sur les matériaux hétérogènes

Les matériaux composites hétérogènes sont des matériaux qui peuvent être biphasé (à deux phases) ou multiphasée (à plusieurs phases). Un matériau hétérogène désigne un matériau dont les propriétés sont différentes et ne sont pas les même dans tout le volume.

Les composites fibreux ou particulaires, les matériaux poreux, les matériaux granulaires, les mousses métalliques ou céramiques, les matériaux de construction en génie civil et les matériaux vivants sont des exemples des matériaux hétérogènes [22].



Figure II.4 : Exemple des matériaux hétérogènes multiphasiques obtenus par la Tomographie [23].

II.3.1 Matériau poreux

Un matériau poreux est un matériau hétérogène biphasé, composé d'une matrice contenant en son sein de petites cavités de vide qui peuvent prendre diverses formes (sphérique, allongée, aplatie...etc.). Dans le cas d'un matériau avec une porosité très élevée en général 70-95% du volume, on l'appelle une mousse [22].

Les structures poreuses se divisent en deux catégories :

- Porosité fermée : les pores sont isolés à l'intérieur et n'ont aucun contact les uns avec les autres ou avec le milieu extérieur.
- Porosité ouverte : les pores sont reliés ensemble pour former des canaux minces, ou reliés à la partie externe de matériau.

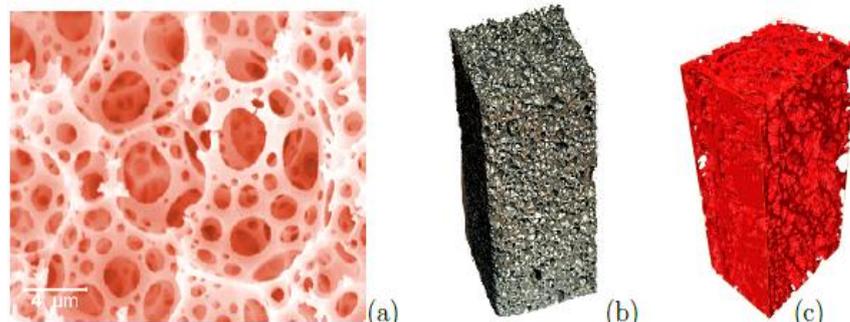


Figure II.5 : Matériaux hétérogènes poreux : a) milieu poreux à l'échelle microscopique (CNRS Photothèque/ISM), (b) : une mousse métallique réelle et (c) une mousse simulée [22].

II.4 Effet d'échelles dans les matériaux hétérogènes

Dans cette partie, nous présentons la méthodologie et les notions générales de l'approche de changement d'échelle et les lois de comportement entre les différentes échelles d'une microstructure hétérogène. Une microstructure peut être décrite en mécanique par trois échelles [22]:

- échelle macroscopique : où le comportement est homogène.
- échelle mésoscopique (intermédiaire) : où le comportement est hétérogène.
- échelle microscopique : où le comportement est hétérogène.

Ce type de description paraît particulièrement approprié pour les matériaux hétérogènes pour leur nature multi-échelle qui permet de repérer l'échelle de la structure, l'échelle de l'hétérogénéité (renfort) et à la fin l'échelle des constituants [22].

La figure ci-dessous est un exemple d'un matériau hétérogène (béton) dans les différentes échelles (macro, méso et micro), dont les constituants et les compositions de chaque échelle sont données [22].

Il convient de noter que la composition de matériau hétérogène varie généralement en fonction des dimensions de l'échantillon.

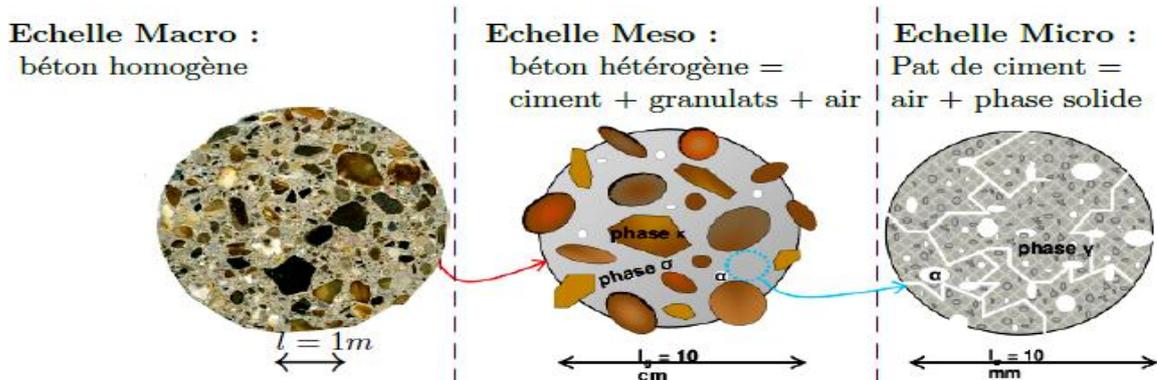


Figure II.6 : La taille et les constituants des échelles dans un matériau de construction [24].

La deuxième échelle est de nature mésoscopique, et l'effet des particules sur la réponse globale demeure mineur comparativement à l'échelle microscopique, dans cette échelle nous retrouvons les microstructures dans lesquelles nous parlons de grain, de fibre de pores ou de charge.

Et enfin la troisième qui est la taille du volume à partir duquel le comportement macroscopique est calculé en prenant compte les données mésoscopique et microscopique disponibles, il s'agit donc de l'échantillon dans son état naturel.

Pour passer d'une échelle à une autre plus grande l'homogénéisation est toujours nécessaire, cette opération se définit par plusieurs étapes, chacune régie par un ensemble d'équations. On trouvera ci-après le principe, les techniques et la méthodologie pour homogénéiser un matériau hétérogène. Un ensemble d'équations et de comportements qui régissent chaque échelle est également présentée [22].

II.5 Méthodologie de la modélisation par changement d'échelles :

II.5.1 Principe et représentation du milieu hétérogène

Afin de construire des modèles comportementaux prédictifs, on s'est efforcé depuis de nombreuses années de considérer l'hétérogénéité de la matière à l'échelle microscopique pour modéliser son comportement macroscopique. La modélisation par mise à l'échelle consiste à remplacer le milieu de modélisation par un milieu homogène équivalent qui permet [25]

- Représentation simplifiée de milieux hétérogènes
- Estimation du comportement de matériaux hétérogènes
- Améliorer les propriétés prédictives des lois de comportement

Le principe du changement d'échelle est d'établir la relation entre des grandeurs physiques à deux échelles : la micro échelle des milieux hétérogènes et la macro échelle des milieux homogènes. Ces relations permettent alors d'évaluer les propriétés effectives de milieux hétérogènes. En pratique, ils sont construits sur des volumes élémentaires représentatifs (VER) de milieux hétérogènes. Le VER est défini comme un volume suffisamment grand par rapport à la taille d'hétérogénéité de la microstructure et suffisamment petit par rapport à la taille caractéristique de la structure. Le volume fondamental (EV) étudié ne dépend pas toujours du volume utilisé et du type de conditions aux limites utilisées pour appliquer la charge. [25].

II.5.2 L'homogénéisation

L'homogénéisation a pour but de remplacer un matériau ou une structure hétérogène par un milieu homogène de comportement équivalent. Pour atteindre cet objectif, la plupart des modélisations micromécaniques suivent trois étapes [26]

- ✓ Représentation
- ✓ Localisation
- ✓ Homogénéisation

II.5.2.1 Représentation

Dans cette étape, le nombre de phases incluses dans le VER est très important. Il faut déterminer la nature des paramètres permettant la description des phases correspondantes, puis caractériser le comportement mécanique de chaque phase, et enfin décrire leurs géométries et leurs proportions. Il est nécessaire de connaître la fraction volumique des phases [26].

Le comportement microscopique élastique de chaque phase « ph » est donné comme suit :

$$\underline{\underline{\underline{\sigma}}}_{ph} = \underline{\underline{\underline{C}}}_{ph} : \underline{\underline{\underline{\varepsilon}}}_{ph} \quad \text{et} \quad \underline{\underline{\underline{\varepsilon}}}_{ph} = \underline{\underline{\underline{S}}}_{ph} : \underline{\underline{\underline{\sigma}}}_{ph} \quad \text{avec} \quad \underline{\underline{\underline{C}}}_{ph} = \underline{\underline{\underline{S}}}_{ph}^{-1} \quad (\text{II.11})$$

Ou $\underline{\underline{\underline{\sigma}}}_{ph}$ et $\underline{\underline{\underline{\varepsilon}}}_{ph}$ représentent les contraintes et déformations locales de la phase « ph »

$\underline{\underline{\underline{C}}}_{ph}$ et $\underline{\underline{\underline{S}}}_{ph}$ est respectivement le tenseur de rigidité et le tenseur de souplesse de la phase « ph ».

II.5.2.2 Localisation

Dans cette étape, le VER déterminé dans l'étape de représentation est considéré. Il s'agit de relier les grandeurs mécaniques microscopiques locales et macroscopiques. C'est-à-dire, on recherche des relations entre déformation moyennes locales de chaque phase $\underline{\underline{\underline{\varepsilon}}}_{ph}$ et la déformation macroscopique $\underline{\underline{\underline{E}}}$ imposées, ou contraintes moyennes locales de chaque phase $\langle \underline{\underline{\underline{\sigma}}} \rangle_{ph}$ et contraintes macroscopiques $\underline{\underline{\underline{\Sigma}}}$ imposées. Les grandeurs moyennes sont définies par : [26]

$$\langle \underline{\underline{\underline{\varepsilon}}} \rangle_{ph} = \frac{1}{v} \int_v \underline{\underline{\underline{\varepsilon}}}_{ph} \, dv \quad \text{et} \quad \langle \underline{\underline{\underline{\sigma}}} \rangle_{ph} = \frac{1}{v} \int_v \underline{\underline{\underline{\sigma}}}_{ph} \, dv \quad (\text{II.12})$$

Les relations de localisation des déformations et de concentration des contraintes à partir des quantités moyennes sont :

$$\langle \underline{\underline{\underline{\varepsilon}}} \rangle_{ph} = \underline{\underline{\underline{A}}}_{ph} : \underline{\underline{\underline{E}}} \quad \text{et} \quad \langle \underline{\underline{\underline{\sigma}}} \rangle_{ph} = \underline{\underline{\underline{B}}}_{ph} : \underline{\underline{\underline{\Sigma}}} \quad (\text{II.13})$$

Ou $\underline{\underline{\underline{A}}}_{ph}$ et $\underline{\underline{\underline{B}}}_{ph}$ désignent respectivement les tenseurs de localisation des déformations et de concentration des contraintes.

II.5.2.3 Homogénéisation

Cette dernière étape permet de déterminer la réponse moyenne due à l'analyse préalable des champs mécanique au sein du VE. On établit ainsi une relation de transition de la micro-échelle à la macro-échelle dont on peut déduire ses propriétés apparentes [26]

$$\langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle = \sum_{ph=1}^N f_{ph} \langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle_{ph} \text{ et } \langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle = \sum_{ph=1}^N f_{ph} \langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle_{ph} \quad (\text{II.14})$$

Les contraintes et les déformations locales doivent vérifier les relations :

$$\underline{\underline{\Sigma}} = \langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle \text{ et } \underline{\underline{E}} = \langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle \quad (\text{II.15})$$

Grace aux équations (II.13), (II.14), (II.15) on peut déduire les propriétés des tenseurs $\underline{\underline{A}}_{ph}$ et $\underline{\underline{B}}_{ph}$:

$$\sum_{ph=1}^N f_{ph} \underline{\underline{A}}_{ph} = \underline{\underline{I}} \text{ et } \sum_{ph=1}^N f_{ph} \underline{\underline{B}}_{ph} = \underline{\underline{I}} \quad (\text{II.16})$$

Ou : $\underline{\underline{I}}$ est le tenseur unité d'ordre 4.

La relation constitutive pour le matériau hétérogène est donnée par :

$$\langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle = \underline{\underline{C}} : \langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle \quad (\text{II.17})$$

En utilisant les relations (II.13), (II.14), (II.15) (II.16), (II.17), on obtient le tenseur de rigidité équivalent $\underline{\underline{C}}$ qui s'exprime en fonction des tenseurs de rigidité $\underline{\underline{C}}_{ph}$ de chaque phase

« ph » et des tenseurs de localisation $\underline{\underline{A}}_{ph}$ de déformation dans chaque phase « ph » :

$$\begin{aligned} \sum_{ph=1}^N f_{ph} \langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle_{ph} &= \underline{\underline{C}} : \langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle \\ \Leftrightarrow \sum_{ph=1}^N f_{ph} \underline{\underline{C}}_{ph} \langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle_{ph} &= \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{E}} \\ \Leftrightarrow \sum_{ph=1}^N f_{ph} \underline{\underline{C}}_{ph} \underline{\underline{A}}_{ph} : \underline{\underline{E}} &= \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{E}} \\ \Leftrightarrow \underline{\underline{C}} &= \sum_{ph=1}^N f_{ph} \underline{\underline{C}}_{ph} \underline{\underline{A}}_{ph} \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

Le tenseur de rigidité équivalent d'un matériau hétérogène dépend donc du tenseur de localisation. Ce tenseur de localisation dépend de chaque modèle d'homogénéisation [26].

I.6 La loi de mélange pour les composites stratifiés

La déformation des matériaux homogènes et isotropes peut être décrite relativement à partir de module de Young et de cisaillement, qui sont les propriétés globales de la matière première [27].

La loi de mélange est donc une méthode d'estimation des propriétés simples d'un matériau composite en se basant sur la contribution de chaque partie de composite.

Pour un composite à 3 composants [27]:

$$V_i + V_m + V_p = 1 \quad (\text{II.19})$$

Avec : V_i : fraction volumique de l'inclusion.

V_m : fraction volumique de la matrice.

V_p : fraction volumique des pores.

La propriété du composite P_c peut être estimée par la formule suivante

$$P_c = P_i * V_i + P_m * V_m + P_p * V_p = P_i * V_i + P_p * V_p + P_m(1 - V_i - V_p) \quad (\text{II.20})$$

Avec : P_i : propriété de l'inclusion.

P_m : propriété de la matrice.

P_p : propriété des pores.

Par exemple le module d'élasticité E_1 , parallèle à la direction des fibres, peut être calculé en utilisant le module de Young de chaque composant :

$$E_1 = E_i * V_i + E_m * V_m \quad (\text{II.21})$$

Pour bien comprendre cette équation l'analogie de calcul de raideur de 2 ressorts connectés en parallèle est utilisée [27] :

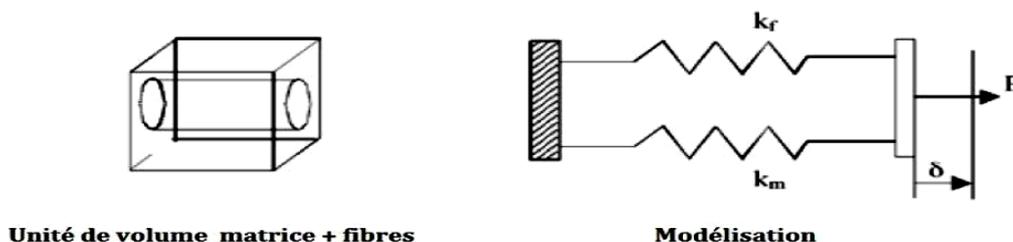


Figure II.7: modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié [27].

Pour notre cas à trois phases la loi s'écrit :

$$E_1 = E_i * V_i + E_m * V_m + V_p * E_p \quad (\text{II.22})$$

Mais ce n'est pas la même formule pour tous les cas, pour le module d'élasticité perpendiculaire à la direction des fibres, ça devient compliqué, dépendant de la forme et de la teneur en fibre des fibres. Pour une bonne estimation en utilise le modèle de 2 ressorts connectés en série [27].

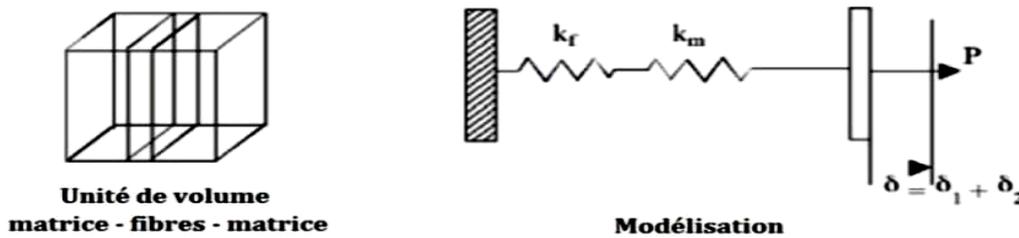


Figure II.8 : modélisation par un système de ressorts des propriétés en flexion d'un composite stratifié. [27].

Pour ce cas d'un chargement perpendiculaire à la direction des fibres, la déformation totale en ce point de chargement sera la somme des déviations dans la fibre et la matrice [27].

$$1/(E_2) = V_f/E_f + V_m/E_m \quad (\text{II.23})$$

Et dans notre cas :

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_p}{E_p} + \frac{V_m}{E_m} \quad (\text{II.24})$$

II.7 Notion de VER dans un matériau hétérogène

La description du matériau doit être suffisamment riche et réaliste pour estimer correctement le comportement microscopique. A cette fin, nous recherchons des descriptions dimensionnelles et géométriques adéquates des microstructures représentatives des propriétés que nous souhaitons estimer. Nous parlons ici de VER. Le VER joue un rôle important dans la réponse globale dans les matériaux hétérogènes. La connaissance de la taille VER est un élément essentiel pour déterminer les caractéristiques efficaces. La taille dépend de la nature et de la composition du matériau.

Plusieurs définitions ont été proposées pour le concept VER. Par exemple, la taille de VER doit être bien supérieure à la plus grande hétérogénéité et également négligeable par

rapport à la taille de la microstructure. La mise en garde ici est que l'utilisation de la méthode d'homogénéisation nécessite une connaissance de la taille VER. La figure (II.11) montre des exemples de VERs dans une microstructure hétérogène. Au sein d'une même microstructure on peut distinguer plusieurs cas, appelés réalisations pour représenter la grandeur de VER. La différence entre ces réalisations est le nombre des hétérogénéités entouré par le volume, la forme, la disposition et enfin la distribution et la nature [22].

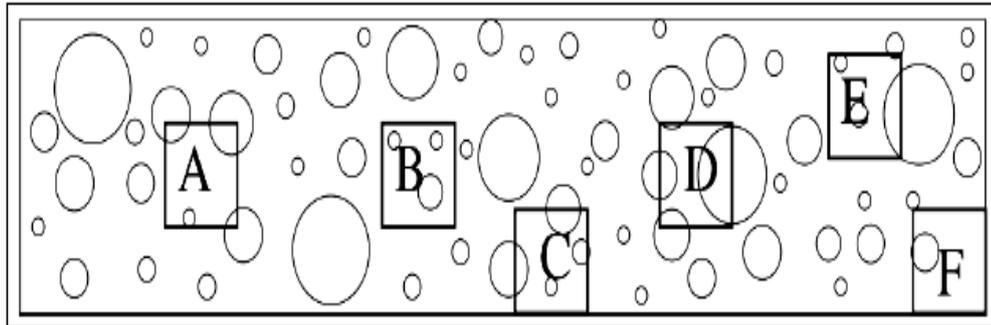


Figure II.9 : Exemple de VER d'une microstructure hétérogène.

II.8 Différentes approche d'homogénéisation des matériaux hétérogènes

Selon Bornert et al (2001), il existe deux approches pour décrire, modéliser et caractériser la microstructure de matériaux hétérogènes. Ces méthodes visent généralement à déduire un comportement macroscopique lors de l'application de différentes contraintes mécaniques, thermiques, magnétiques, etc. On distingue : [22]

- (1) L'approche phénoménologique qui consiste à mener des expériences sur des échantillons de matériau puis à déterminer la forme mathématique du comportement qui reproduit aux mieux les résultats expérimentaux. Cette étape n'est pas simple, notamment lorsqu'il s'agit de déterminer la forme mathématique associée au comportement macroscopique. Cette méthode de caractérisation expérimentale nécessite de multiples essais est donc coûteuse. [22]
- (2) Une alternative à l'approche phénoménologique est l'utilisation des techniques d'homogénéisations. En utilisant cette approche, nous n'essayons pas de masquer la morphologie microscopique des matériaux, mais essayons plutôt de tirer parti des connaissances microscopiques et d'exploiter les caractéristiques multi échelles pour

comprendre le comportement macroscopique. Cette approche vise à réduire la taille de la microstructure à un élément de volume représentatif VER. [22]

II.9 Les techniques d'homogénéisation analytique et numérique

II.9.1 Homogénéisation analytique

Homogénéisation analytique est une solution qu'on peut d'écrire à l'aide d'une fonction mathématique ou des bornes. Les méthodes analytiques ont été proposées pour permettre de déterminer des bornes mais aussi des estimations du comportement effectif des matériaux à l'aide d'une connaissance partielle de la microstructure.

Parmi les nombreuses méthodes analytiques, on peut citer la première théorie mathématique de l'homogénéisation qui utilise le développement asymptotique de grandeurs mécaniques telles que la contrainte et la déformation. Il existe également un ensemble de bornes et d'estimations largement utilisées par les mécaniciens et les physiciens. Les bornes (bornes supérieure et inférieure) encadrent les propriétés du matériau hétérogènes. Il existe plusieurs types de bornes qui diffèrent la finesse de la description de l'échelle. En fait comme la microstructure est bien comprise, les limites inférieures et supérieures sont plus strictes. Enfin des estimations théoriques permettent d'évaluer les propriétés effectives de matériaux hétérogènes sous certaines hypothèses spécifiques. Contrairement aux terminaisons qui fournissent une ossature elles ont l'avantage de se rapprocher plus précisément du comportement de matériaux hétérogènes. [28]

II.9.1.1 Les bornes de Voigt et Reuss

Parmi les modèles analytique utilisé pour l'évaluation des propriétés élastique effective d'un matériau composite, on trouve le modèle de Voigt et le modèle de Reuss qui représente respectivement la limite supérieur et la limite inférieur que la propriété calculé ne doit pas dépasser [29].

Pour le matériau composite à constituant isotrope :

- Voigt à définit le module effectif du composite C comme limite supérieure par l'expression :

Dans le cas d'un matériau à trois phases :

$$\mathbf{C} = f_i \mathbf{C}_i + (1 - f_i - f_p) \mathbf{C}_m \quad (\text{II.23})$$

f_i, C_i : la fraction et module d'inclusion.

f_p : la fraction des pores.

C_m : module de la matrice.

- Reuss a aussi défini cette propriété comme limite inférieure par l'expression :

$$\frac{1}{c} = \frac{f_i}{c_i} + \frac{1-f_i-fp}{Cm} \quad (\text{II.24})$$

II.9.1.2 Modèle de Mori et Tanaka

C'est un modèle analytique, est défini pour un milieu hétérogène du type matrice renforcée (milieu particulaire), constitué d'inclusions réparties de manière isotrope se comportant, en moyenne comme des inclusions isolées dans une matrice infinie. Le tenseur de localisation A^i s'écrit en conservant les mêmes notations indicielles : [30]

$$A^i = T^i (\sum_{j=0}^n F_j T^j)^{-1} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$T^i = [I + S_{\text{Esh}}^i (C^0)^{-1} (C^i - C^0)]^{-1} \quad (\text{II.26})$$

Ce modèle reste valide pour des fractions volumiques d'inclusion faibles. [30]

II.9.2 Homogénéisation numérique

La mécanique des matériaux hétérogènes a longtemps été limitée aux méthodes analytiques. Les progrès significatifs des ressources informatiques ont facilité l'utilisation des simulations numériques. Trois types de microstructures ont été utilisés dans cette technique : une microstructure virtuelle générée par les algorithmes de la morphologie mathématique, une microstructure réelle obtenue par le microscope ou par la tomographie et une microstructure périodique basée sur des cellules élémentaires. Les méthodes numériques sont principalement divisées en deux catégories : [28]

- Méthodes intégrées : consiste à considérer à la fois les échelles microscopique et macroscopique dans les calculs par élément finis.
- Méthodes séquentielles : on tente d'estimer les propriétés macroscopiques d'un matériau en effectuant un ou plusieurs calculs sur la description de corrélation microscopique correspondante. [28].

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé d'abord le comportement mécanique élastique des différents types de matériaux.

Nous avons également présenté une étude générale sur les matériaux hétérogènes, l'effet de l'échelle sur de tels matériaux et enfin l'homogénéisation avec ces différentes méthodes et approches, qui est toujours nécessaire la prédiction de comportement globale d'un matériau hétérogène à partir de sa microstructure

Chapitre III

**Génération des
microstructures 3D et
maillage**

III. Génération des microstructures 3D et maillage

III.1 Introduction

Pour étudier le comportement d'un matériau quelconque, il y a toujours deux étapes important à suivre qui sont la génération des microstructures et leur maillage. Ce chapitre présente d'abord les différentes méthodes de génération des microstructures 3D puis le maillage et ces méthodes qui sont incontournable dans la simulation numérique.

III.2 Génération des microstructures 3D

Grace à l'évolution des outils numériques et des outils de conception graphique, des modélisations de plus en plus fines et sophistiqué des structures peuvent être réalisées .Le calcul microstructural consiste à modéliser la microstructure d'un matériau, représenter différents phénomènes physiques au sien de ce matériaux et aussi d'établir des liens entre la microstructure et les propriétés du matériau. La réalisation de la microstructure impose une connaissance des morphologies et les formes des constituants, et pour la création de ces formes on utilise des méthodes de générations ou de reconstitution de forme, parmi eux : [31]

- La reconstitution à partir d'un tomographe.
- La méthode de génération dite d'addition séquentielle aléatoire (RSA).
- Modèle de génération par la technique dynamique moléculaire.

Dans notre travail on utilise la méthode de génération d'addition séquentielle aléatoire (RSA), pour générer un modèle numérique de la microstructure d'un matériau composite qui se constitue de particule de même diamètre et des pores de nombre et de diamètre différents

III.3 Les méthodes de génération des microstructures 3D

III.3.1 La reconstitution à partir d'un Micro tomographe

La méthode de la reconstitution à partir d'un Micro tomographe repose sur l'utilisation des équipements de microtopographie qui nous permette de représenter des microstructures en deux ou trois dimensions, cette technique et encore coûteuse en temps et en ressources. Actuellement il n'est pas utilisable pour tous les matériaux. Les techniques de microtopographie aux rayons X mettent en évidence la structure tridimensionnelle de matériau à un contraste entre phases suffisant.

Cette technique est basée sur la reconstitution couche par couche de l'échantillon par polissage et cartographie EBSD. Cependant cette méthode présente l'inconvénient d'affecter la structure de l'échantillon. On espère donc que des progrès seront réalisés.

La micro tomographie aux rayons X est une technique d'imagerie permettant la reconstruction 3D d'un échantillon. La méthode consiste à partir de radiographie X sur 360° de reconstituer une image volumique qui en chaque position de l'espace retourne une valeur liée au coefficient d'absorption du matériau. [31]

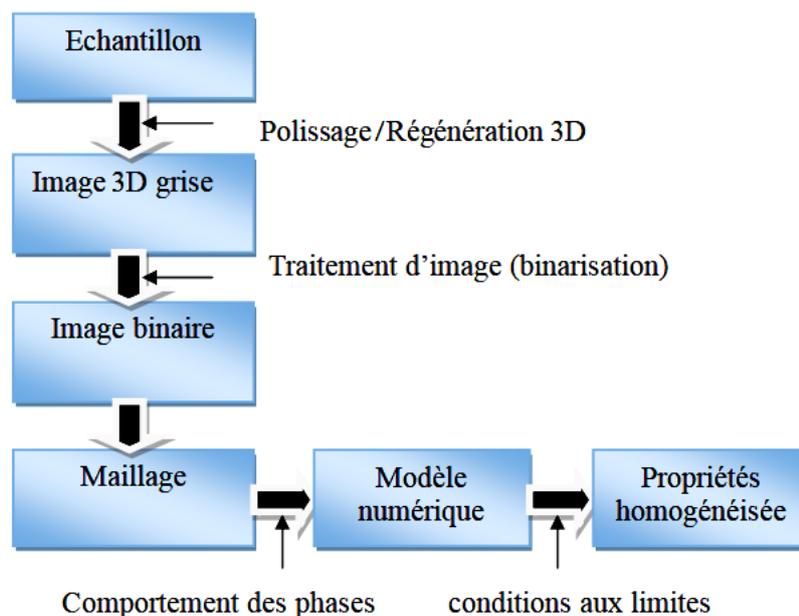


Figure III.1: Schéma de la procédure de traitement d'une microstructure réelle pour la simulation.

III.3.2. Modèle d'addition séquentielle aléatoire (RSA)

Ce modèle est une méthode de type Monte-Carlo, elle consiste à placée des particules de diamètre D l'une après l'autre dans un volume fixe de cote L jusqu'à l'obtention de la concertation de particule voulue, en choisissant aléatoirement les coordonnées de leurs centres. Après le traçage de chaque particule on vérifie le non interpénétration de celle-ci avec les particules déjà existantes, sinon le traçage sera exclu et une nouvelle particule sera dessinée. [32]

Cette méthode est une méthode simple utilisée dans la plupart des domaines scientifique (la chimie, la biologie, la physique et les mathématiques.).

Suivant cette méthode la fraction volumique des particules maximales possible si on suppose que la taille du domaine fixe L est plus grande que le diamètre D , change suivant le nombre de dimension : [32]

- Pour 1D (génération aléatoire de segments de taille D dans un segment de taille L) : La fraction linéique limite est : en s'arrêtant à la quatrième décimale, de 74.76 % (pour L infiniment grand) (calculée par Reni, 1958).
- Pour 2D (génération de disques de diamètre D dans un carré de côté L) : La fraction surfacique limite a été estimée numériquement à 54.7 %.
- Pour 3D (génération de sphères de diamètre D dans un cube de côté L) : Les fractions volumiques limites estimées ne dépassent pas 40 % [32].

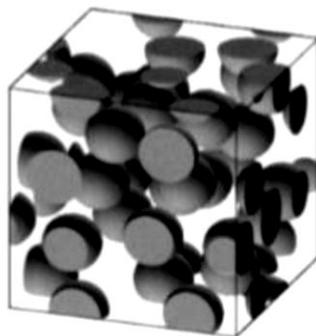


Figure III.2 : Microstructure générée à l'aide d'algorithme aléatoire séquentielle Adsorption (RSA). Nombre de sphères = 30, fraction volumique = 30%.

III.3.3 Modèle de génération par la technique dynamique moléculaire

Cette méthode de génération des particules distribuées aléatoirement dans la cellule basale VE est basée sur la dynamique moléculaire qui est également connue sous le nom de modèle de Lubachavsky et Stillinger qui ont développés un nouvel algorithme basé sur la dynamique qui permet la dispersion initiale des disques dans une cellule élémentaire 2D. En 1991, les auteurs Lubachevsky et al ont étendu l'algorithme à des sphères réparties aléatoirement dans un bloc élémentaire 3D.

Cet algorithme suppose qu'au temps zéro toutes les inclusions sont générées et ont une masse nulle, des positions vectorielles et des vitesses leur sont affectées. Les particules sont ensuite été mises en mouvement et augmentées à chaque répétition jusqu'à ce que la fraction volumique souhaitée soit atteinte. A chaque itération, deux types d'événements sont testés :

- les collisions binaires : qui est une collision entre particules, dans ce cas le vecteur de vitesse de ces particules seront mis à jour selon le principe de l'énergie cinétique. [32]

- les collisions entre les particules et les faces de la cellule élémentaire : dans ce cas si les particules sortent et quittent la cellule à travers une face elle doit y retourner mais par la face opposée pour assurer les conditions aux limites de périodicité. [32]

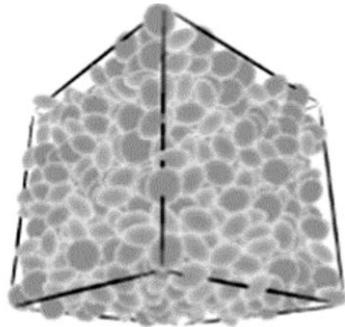


Figure III.3 : Parking d'ellipsoïdes aplatis généré en utilisant l'algorithme de dynamique moléculaire proposé par Donev et al. Nombre de l'ellipsoïdales = 1000, fraction volumique = 70%

III.4 Génération des particules en 3D dans un volume cubique

Afin d'effectuer une analyse micromécanique, dans cette partie on introduit le concept lié à la génération des microstructures à trois phases. La génération des microstructures est réalisée à l'aide de script programmé avec un langage de programmation dans un outil de graphisme 3D. la méthode utilisés pour la génération des particules et la méthode d'addition séquentielle aléatoire (RSA).

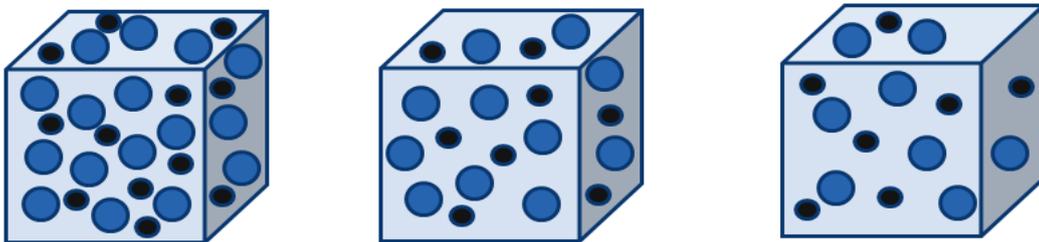


Figure III.4 : Génération des particules sphériques dans un volume cubique.

Pour la génération de ces particules 3D dans une cellule cubique, un algorithme 2D a été utilisé pour le cas 3D, mais avec des changements comme l'ajout de la troisième coordonnée. , cet algorithme assure une répartition aléatoire des particules tout en respectant les contraintes géométriques suivantes :

- Les particules d'inclusion sont de même taille (diamètre).
- Les pores sont de même taille (diamètre).
- Les particules ne doivent pas chevaucher entre elles.
- Les pores ne doivent pas chevaucher entre elles.
- l'inclusion et les pores ne doivent pas se toucher.
- Les particules et les pores ne doivent pas toucher les parois de la cellule.

Cet algorithme est basé aussi sur la taille de la cellule L , le volume de la cellule est relié avec le volume des particules et le volume des pores en fonction des fractions volumiques si dessous :

Pour les particules
$$f_i = N_i * S_i / S_c \quad (\text{III.1})$$

Pour les pores
$$f_p = N_p * S_p / S_c \quad (\text{III.2})$$

Avec : f_i et f_p : les fractions volumiques de l'inclusion et des pores respectivement.

N_i et N_p : le nombre de particule d'inclusion et de pore.

S_i, S_p et S_c : L'aire de l'inclusion, les pores et la cellule.

Les données initiales de l'algorithme sont : le choix de type de particules d'inclusion et de porc, leurs nombres, leurs fractions volumiques dans la cellule élémentaire et le type d'arrangement de ces particules.

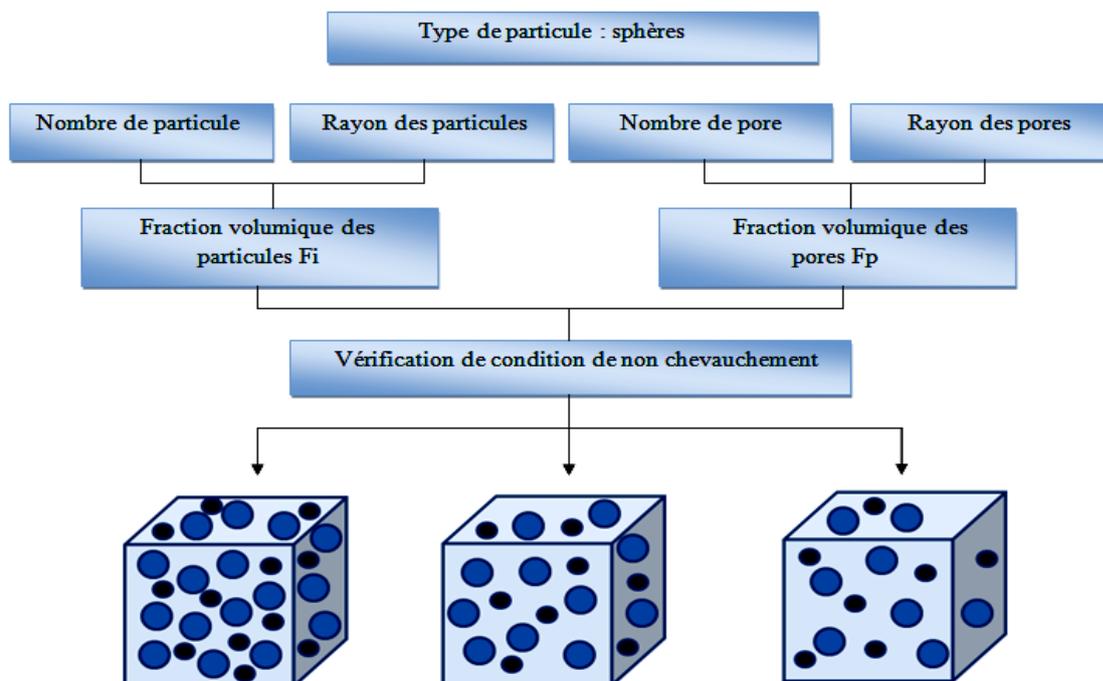


Figure III.5 : Propriétés géométriques de la cellule cubique

Pour vérifier la condition de non collision entre deux géométries, il faut chercher deux points p_1 et p_2 de deux particules avec les coordonnées (x_1, y_1, z_1) et (x_2, y_2, z_2) respectivement, qui justifieront la condition, les centres $O_1(x_1, y_1, z_1)$ et $O_2(x_2, y_2, z_2)$ de ces particules seront choisis au hasard. [33].

La distance entre les deux centres de coordonnées des particules est :

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (\text{III.3})$$

La condition de non collision entre les parois de la cellule et les particules doit aussi être vérifiée, si la distance D est inférieure au diamètre des sphères il y a collision. Si D est supérieur donc il y'en a pas. [33]

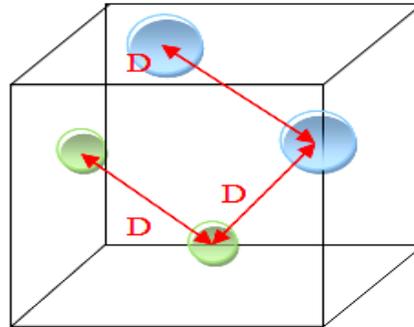


Figure III.6 : Définition de la géométrie et du paramétrage des particules.

III.5 Maillage 3D des microstructures :

Le maillage de la microstructure est une des étapes importantes de l'homogénéisation numérique. L'homogénéisation numérique se fait en trois étapes : [28]

- La génération des images (génération de VER)
- Le maillage des images
- Les calculs numériques

Le choix d'une méthode numérique pour résoudre des problèmes microstructuraux nécessite de générer des maillages pour différencier la géométrie, la méthode de création et de maillage d'un grand nombre de matériaux hétérogènes s'articule autour de trois étapes : [28]

- Représentation surfacique de matériau
- Maillage surfacique
- Maillage volumique

Pour mailler ces modèles, nous avons utilisé le logiciel Comsol cet outil de simulation numérique permet de faire plusieurs études de problèmes physiques.

Les étapes à suivre pour la modélisation de notre problème avec Comsol sont les suivantes [34]:

- Configurer l'environnement du modèle
- Construire la géométrie
- Spécifier les propriétés matériaux
- Définir les conditions aux limites des physiques

- Créer le maillage
- Exécuter la simulation
- Post-traiter les résultats

Dans cette méthode, le comportement mécanique associé aux phases est attribué à chaque point d'intégration de chaque élément [33].

III.6 Différentes méthodes de maillage

Il existe différentes méthodes de maillage pour la microstructure parmi eux : le maillage régulier et le maillage adaptatif.

III.6.1 Maillage régulier

Il s'agit d'un simple maillage régulier consistant à construire une surface 2D ou un volume 3D d'un échantillon et à attribuer les caractéristiques de sa phase à des éléments finis. Il est également possible d'utiliser des éléments multi phases, ou l'attribution des propriétés de chaque phase se fait au point d'intégration de l'élément en fonction de la phase dans laquelle il se trouve. Cette méthode réside dans la simplicité et la rapidité de création de médias hétérogènes. De plus la méthode est applicable à tout type de milieu hétérogène. [25].

III.6.2 Maillage adaptatif

Est une méthode consiste à utiliser un maillage initial quelconque (libre ou régulier), suffisamment fin, et à déplacer certains nœuds du maillage pour les faire coïncider avec les interfaces. La méthode permet de conserver la topologie des interfaces de la microstructure. [25].

III.7 Les conditions aux limites

Comme tous les problèmes de modalisation, les conditions aux limites doivent être définies pour résoudre les équations du comportement dans le cas élastique.

En élasticité linéaire, la relation reliant le tenseur de déformation macroscopique E et le tenseur de contrainte macroscopique Σ comme suit : [22]

$$\Sigma = C : E \quad (\text{III.4})$$

- Pour les conditions aux limites cinématiques homogènes KUBC :

Le déplacement imposé sur les nœuds de la surface externe s'écrit à partir du tenseur de déformation :

$$\begin{cases} \underline{\mathbf{u}} = \mathbf{E} \cdot \underline{\mathbf{x}} \\ \mathbf{E} = \frac{1}{V} \int \boldsymbol{\epsilon}(\underline{\mathbf{x}}) dV \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Avec $\boldsymbol{\epsilon}(\underline{\mathbf{x}})$ est le tenseur de déformation locale.

- Pour les conditions aux limites statiques homogènes SUBC :

On applique sur la surface extérieure du volume V un effort surfacique $T = \boldsymbol{\sigma} \underline{\mathbf{n}}$ qui s'écrit :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} \underline{\mathbf{n}} &= \underline{\boldsymbol{\Sigma}} \underline{\mathbf{n}} \\ \underline{\boldsymbol{\Sigma}} &= \frac{1}{V} \int \boldsymbol{\sigma}(\underline{\mathbf{x}}) dV \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

Avec $\boldsymbol{\sigma}(\underline{\mathbf{x}})$ est le tenseur de contrainte locale.

- Pour les conditions aux limites périodiques PBC

Le déplacement $\underline{\mathbf{u}}$ appliqué sur les nœuds de la surface extérieure dV est périodique, il s'écrit en fonction du tenseur de déformation homogénéisé E et d'une fluctuation périodique $\underline{\mathbf{v}}$ comme suit : [22]

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{u}} &= \mathbf{E} \underline{\mathbf{x}} + \underline{\mathbf{v}} \\ \mathbf{E} &= \frac{1}{V} \int \boldsymbol{\epsilon}(\underline{\mathbf{x}}) dV \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

La fluctuation est périodique car elle prend la même valeur en deux points homologues, de facettes ou droites opposées. [22]

III.8. Conclusion

La réalisation des microstructures est basée sur les connaissances de leur morphologie et leurs constituants. Ce chapitre à traiter la génération des microstructures à travers ces différentes méthodes dont la RSA qui est la méthode adoptée dans notre travail pour la génération des particules sphériques dans un volume cubique, ainsi que les différentes techniques de maillage qui peuvent être utilisées pour discrétiser ces microstructures.

Chapitre IV

Comportement élastique d'un matériau hétérogène à trois phases

IV. Comportement élastique d'un matériau hétérogène à trois phases

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous discuterons du comportement élastique d'un matériau triphasé hétérogène. Dans cette étude, basé sur une modélisation numérique est analytique les propriétés effective d'un composite à matrice métallique avec des pores, pour différentes fraction et différent nombre d'inclusion et de pores a été analysée.

IV.2 Matériaux et Méthodes

IV.2.1 Description de la microstructure

Dans notre travail la microstructure étudiée est un cube constitué de trois phases, une matrice en aluminium, une inclusion de carbure de silicium et des pores.

On a pris une cellule de dimensions $20 \times 20 \times 20$, et on faisait dans chaque cas varier les fractions volumiques 5%, 10%, 15% pour l'inclusion et 1%, 3%, 5% pour les pores et le nombre de particules 20, 50, 100 pour l'inclusion et 1, 5, 10, 20 pour les pores.

Dans l'analyse par éléments finis élastoplastique, on a supposé que la carbure de silicium est un matériau élastique linéaire et la matrice d'aluminium est un matériau élastoplastique.

IV.2.2 Propriétés élastiques des phases

Dans notre étude, les propriétés mécaniques des phases utilisées dans les simulations numériques sont le module de Young E et le coefficient de poisson ν . Les pores sont considérés comme des vides, les deux propriétés élastique des constituants sont données dans le tableau suivant :

Les constituants	E [GPa]	ν
La matrice	97[GPa]	0.341
L'inclusion	135[GPa]	0.25

Tableau IV. 1: les propriétés mécaniques des constituants

IV.2.3 Génération des modèles

Quelques exemples de volumes représentatifs pour différents fractions volumiques et différents nombre de particule d'inclusion et de pores sont donnés ci-dessous :

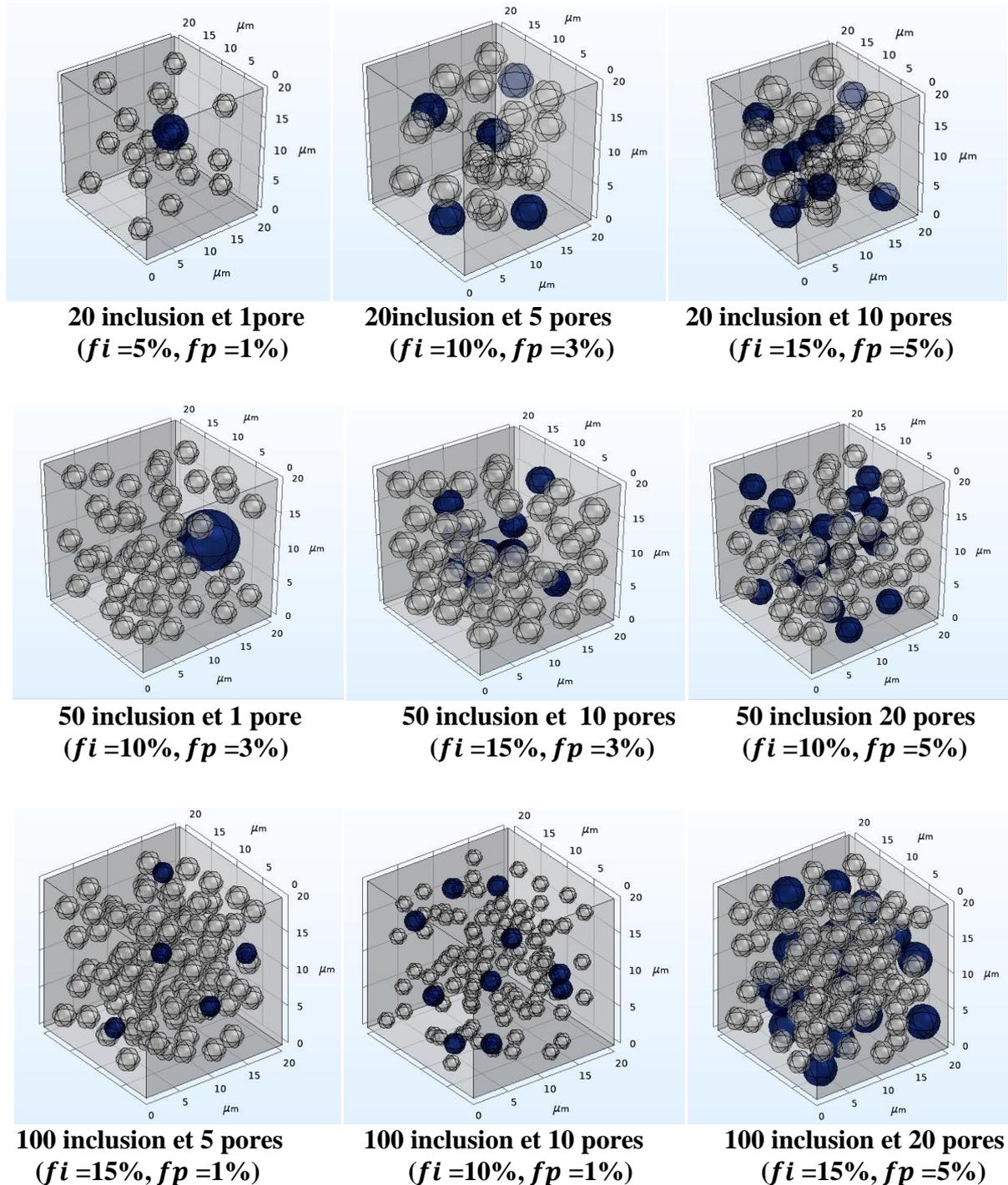


Figure IV.1 : Exemple de volume représentatif pour différentes fraction volumique d'inclusion et des pores.

IV.2.4 Maillage des modèles

Nous présentons ici les mêmes exemples donnés plus haut, avec un maillage grossier :

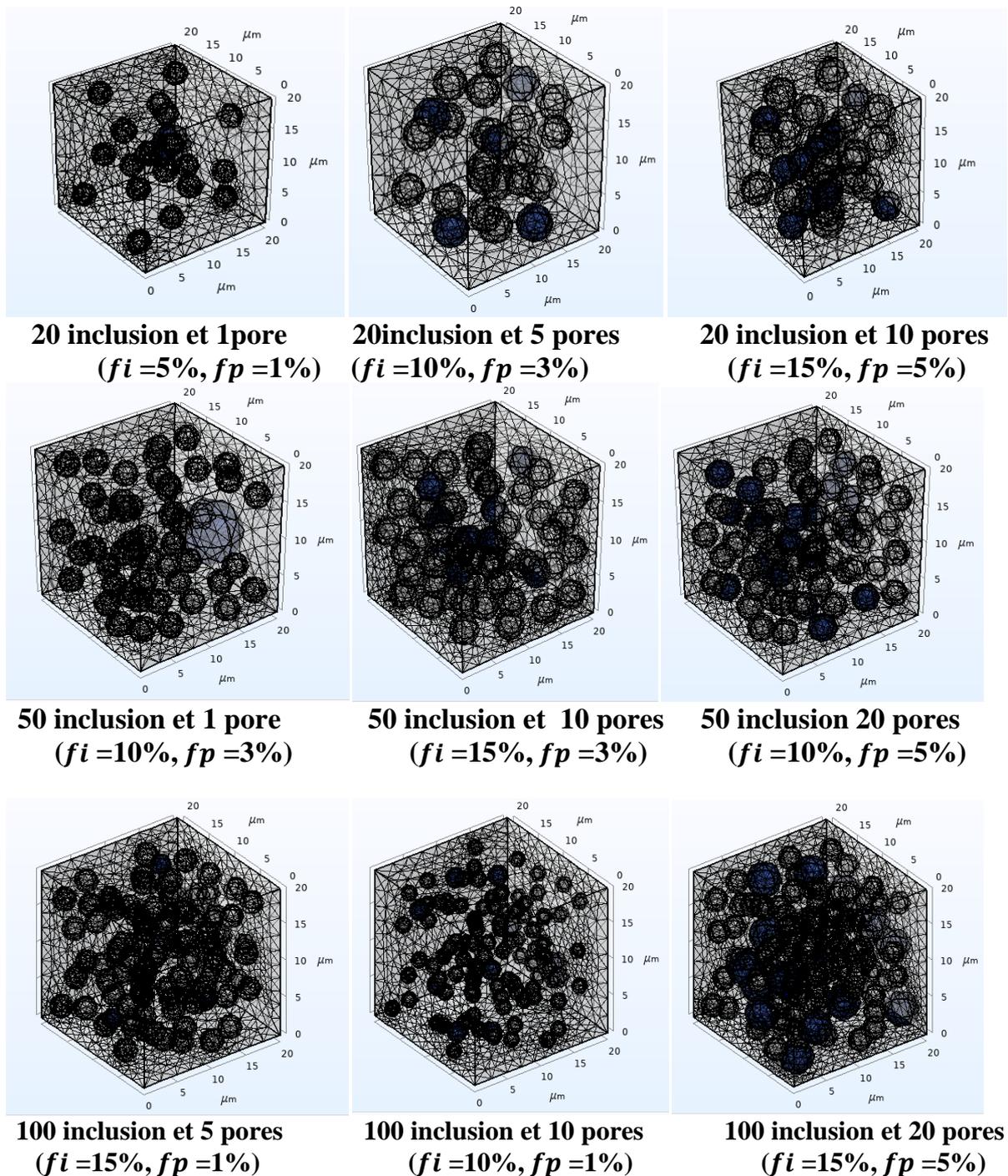


Figure IV.1 : Exemples de maillage de volumes représentatifs pour différentes fraction volumique d'inclusion et des pores

IV.3 Allure de la contrainte

Ici deux exemples sont donnés pour les deux déformations du aux contraintes de traction (module de Young) et de cisaillement (module de cisaillement) :

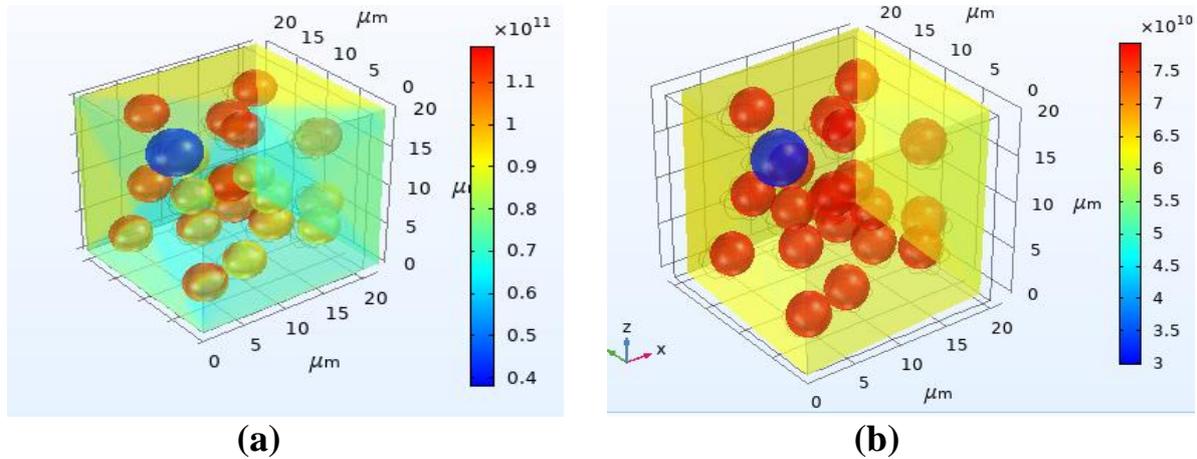


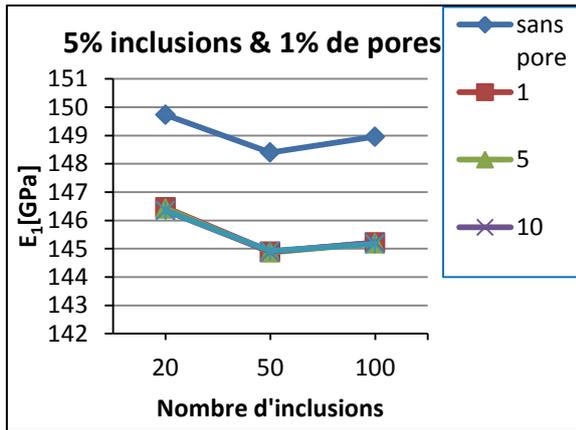
Figure IV.1 : Allure de la deformation du a la contrainte de traction(a)et à la contrainte de cisaillement (b).

IV.4 Résultats et discussion

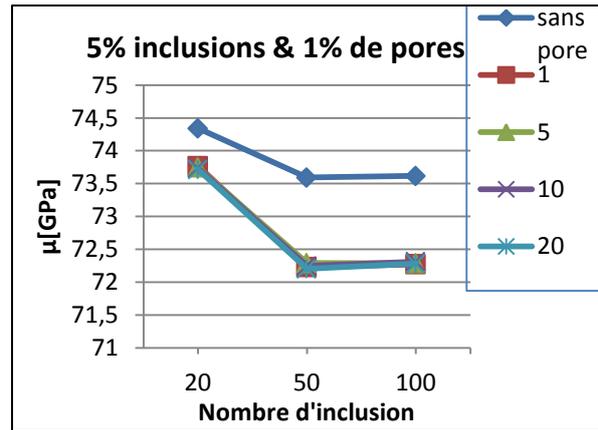
Dans cette section et pour déterminer le module de Young et le module cisaillement de tous les volumes représentatifs avec différentes fractions volumiques et différents nombres de particules d'inclusion et de pores, nous avons utilisé le logiciel de simulation numérique « Comsol multi physique 5.6 ». les résultats obtenus sont présentés en ce qui suit.

IV.4.1 Effet de nombre de particule d'inclusion sur les propriétés mécaniques

Les graphes suivant représentent quelques résultats numériques des deux propriétés élastiques calculés dans notre simulation en fonction du nombre de particule d'inclusion 20 ,50 et 100 pour le cas du matériau sans pores et avec pores.

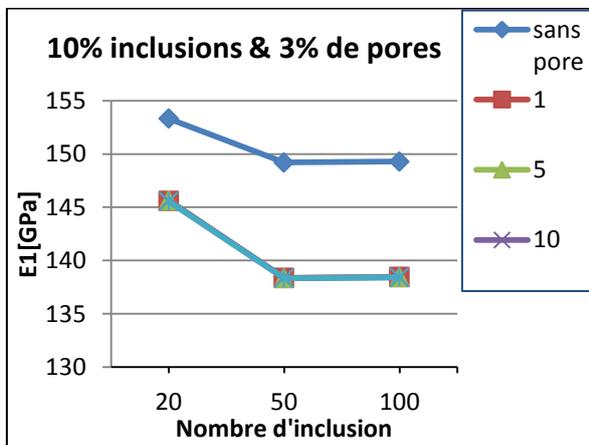


(a)

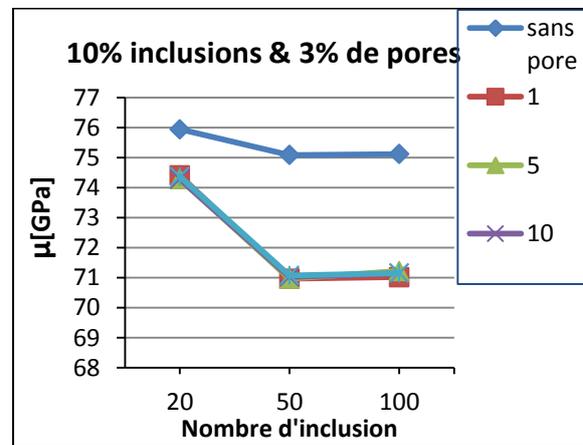


(b)

Figure IV.1 : Courbes de module de Young(a) et de module de cisaillement (b) en fonction de nombre d'inclusion, pour le cas sans pores et avec pores (5% d'inclusion et 1% de pores).



(c)



(d)

Figure IV.2 : Courbes de module de Young (c) et de module de cisaillement (d) en fonction de nombre d'inclusion, pour le cas sans pores et avec pores (10% d'inclusion et 3% de pores)

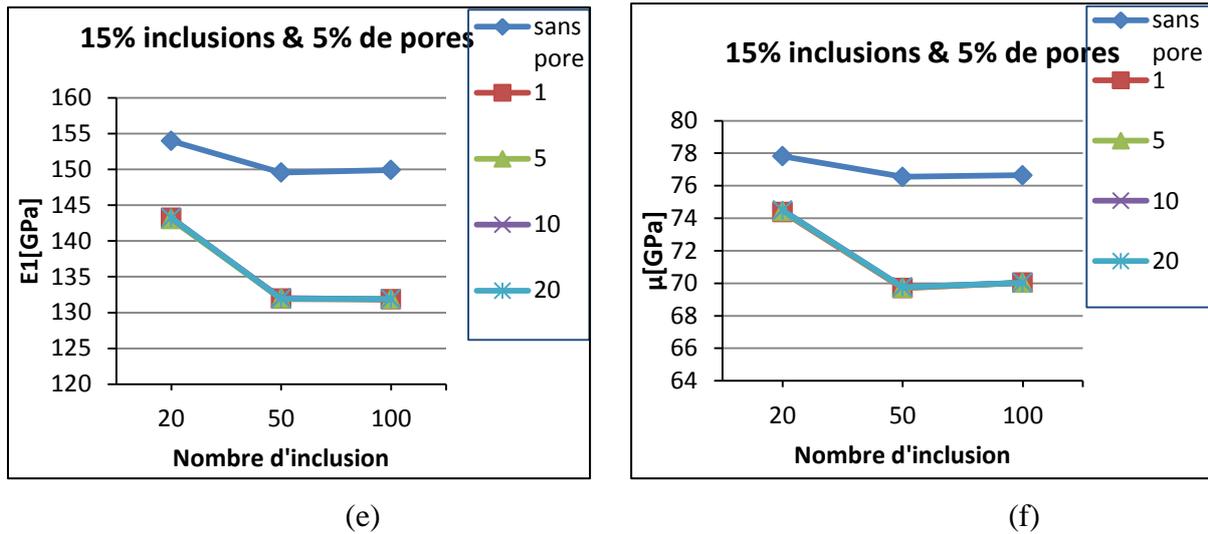


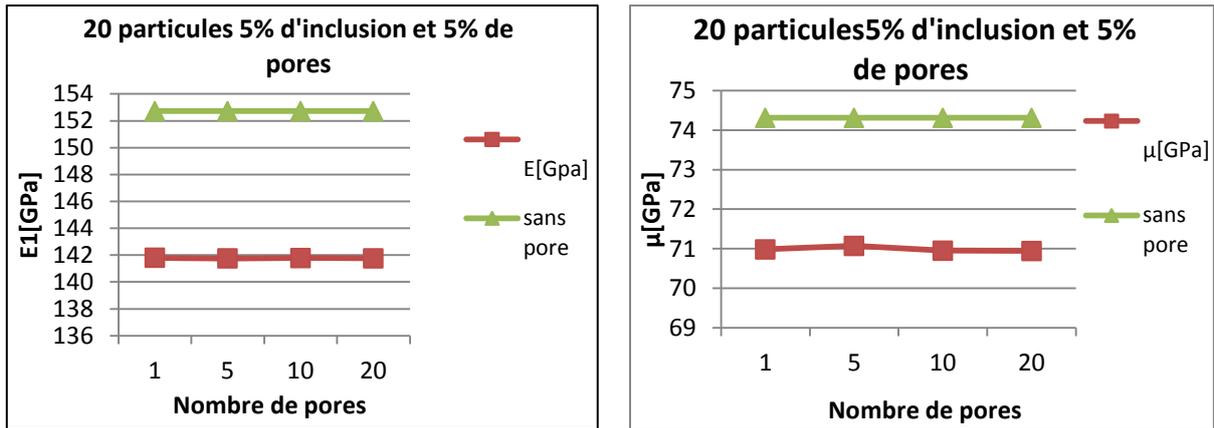
Figure IV.3 : Courbes de module de Young (e) et de module de cisaillement (f) en fonction du nombre d'inclusion, pour le cas sans pores et avec pores (15% d'inclusion et 5% de pores).

A partir de ces figures on peut voir que l'augmentation du nombre de particules d'inclusion pour la même fraction volumique fait d'abord diminuer les propriétés et puis à la fin les augmenter légèrement, et cela peut être dû à la répartition de ces particules dans la matrice.

On peut remarquer aussi que les courbes des différents nombres de pores se coïncident dans tous les points, et que les deux courbes sans pore et avec pore diminuent et augmentent de la même façon, donc les pores n'affectent pas l'effet du nombre d'inclusion sur les propriétés du matériau.

IV.4.2 Effet de nombre de particule de pores sur les propriétés mécaniques

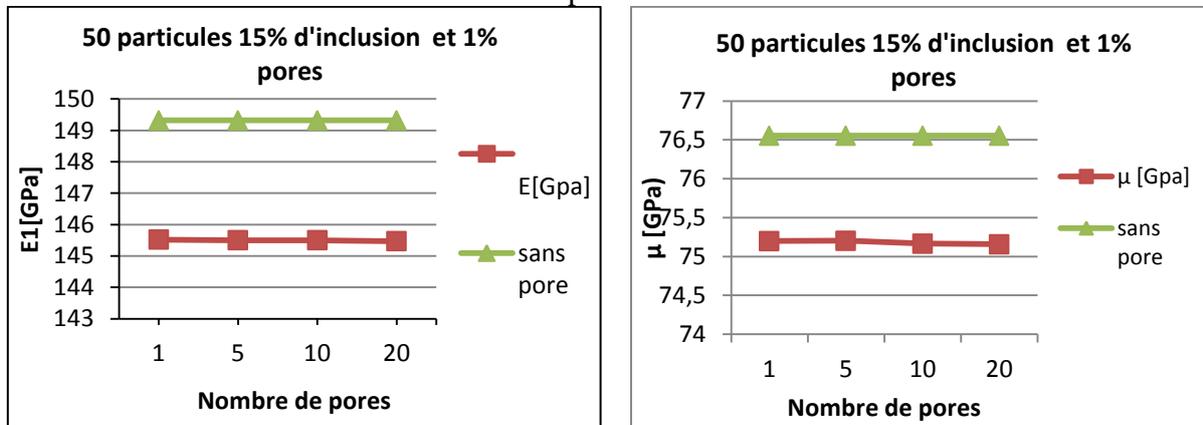
Ici nous avons étudié des volumes représentatifs avec des fractions volumiques d'inclusion et des fractions volumiques de pores fixées, le nombre de pores varie ce qui fait que les diamètres de ces pores varient d'un cas à l'autre. Les résultats indiqués ci-après sont quelques exemples de ceux obtenus :



(a')

(b')

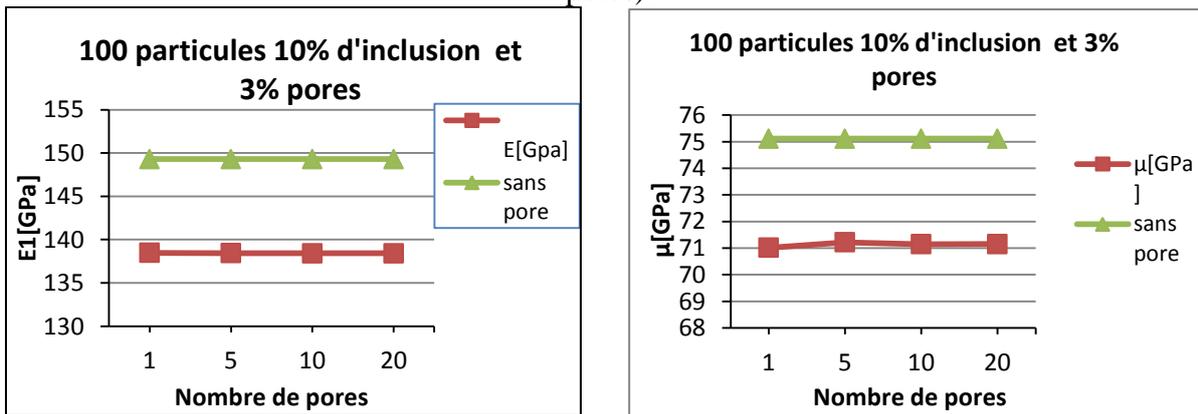
Figure IV.1 : Courbes de module de Young (a') et du module de cisaillement (b') en fonction de nombre pores, pour le cas sans pores et avec pores (20 particules 5% d'inclusion et 1% de pores).



(c')

(d')

Figure IV.2 Courbes de module de Young (c') et du module de cisaillement (d') en fonction de nombre de pores, pour le cas sans pores et avec pores (50 particules 15% d'inclusion et 1% de pores).



(e')

(f')

Figure IV.3 : Courbes de module de Young (e') et du module de cisaillement (f') en fonction de nombre de pores, pour le cas sans pores et avec pores (100 particules 10% d'inclusion et 3% de pores)

Suivant les graphes ci-dessus, on note que les valeurs de module de Young et du module de cisaillement du modèle poreux sont inférieurs à celles du modèle non poreux, on constate donc que les pores ont un effet négatifs sur les composites et leur propriétés.

Et on comparant les valeurs par rapport au nombre de pores on remarque qu'il n'y a pas de grande variation et que les valeurs sont presque égales, la courbe peut être considéré stable. D'où on peut conclure que peu importe le nombre des pores et leurs diamètre, ils ont tous le même impact sur le comportement et les propriétés des matériaux tant que c'est pores occupe le même volume (la même fraction volumique).

IV.4.3 Effet de la fraction volumique de l'inclusion :

Dans ce cas des simulations numériques pour les différents cas de fraction volumique d'inclusion ont été réalisées sur chaque cas de fraction volumique de porc. Les résultats obtenus sont comparé à ceux réalisé par le modèle analytique de Mori Tanaka dans les graphes suivants.

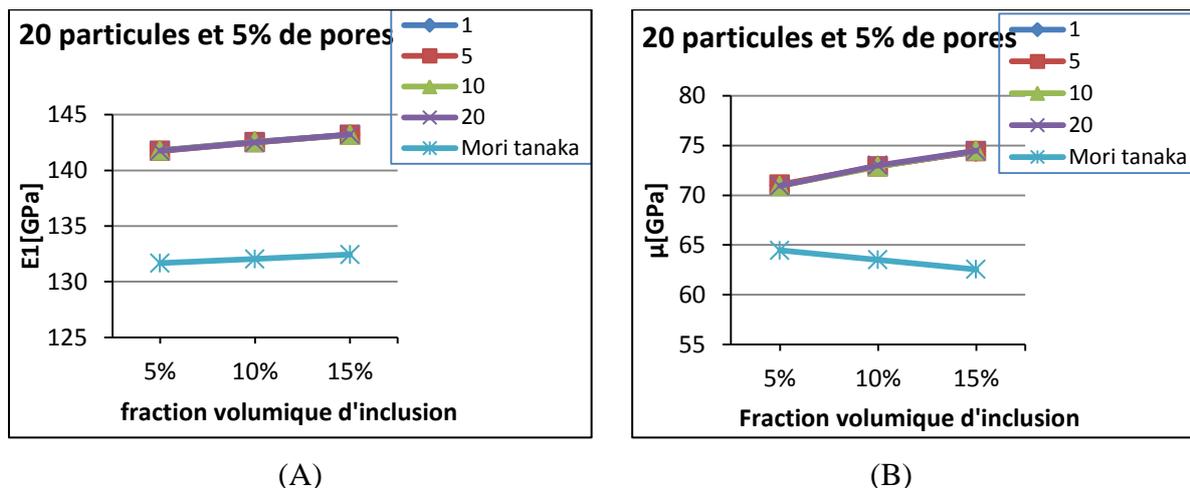
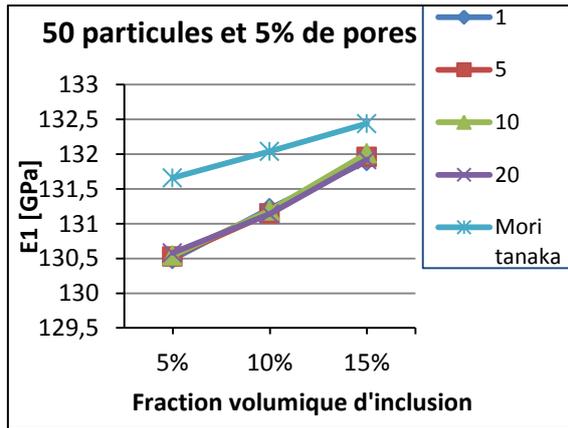
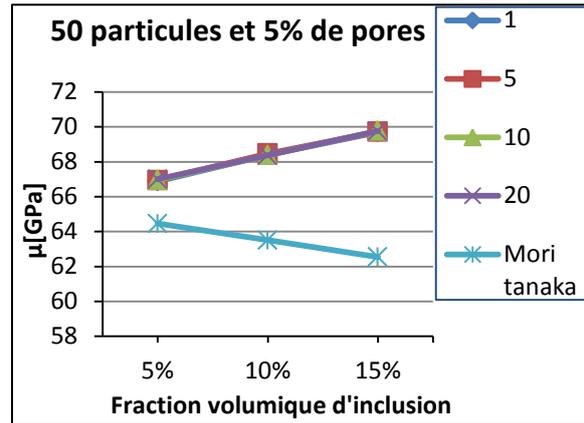


Figure IV.1 : courbes de module de Young(A) et du module de cisaillement (B) en fonction de la fraction volumique d'inclusion pour le modèle analytique et numérique (20 particule 5% pores).

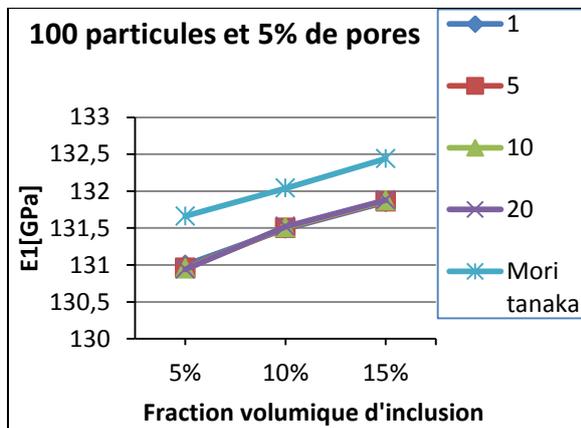


(C)

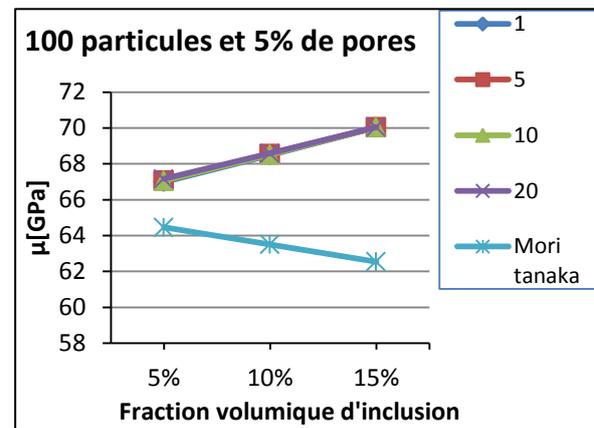


(D)

Figure IV.2 : Courbes de module de Young (C) et du module de cisaillement(D) en fonction de la fraction volumique d'inclusion pour le modèle analytique et numérique (50 particule 5% pores).



(E)



(F)

Figure IV.3 : Courbes de module de Young (E) et du module de cisaillement (F) en fonction de la fraction volumique d'inclusion pour le modèle analytique et numérique (100 particule 5% pores).

On observe que les courbe des pores se coïncident en tous points, donc come déjà dit le composite se comporte de la même manière malgré l'évolution du nombre de pores tant que la fraction de volume est la même.

Commençant par les courbes du module de Young (A, C, E), nous voyons que les deux courbes des résultats analytiques et numériques sont ascendantes, ce qui veut dire que l'augmentation de la fraction de l'inclusion conduit directement à l'amélioration des propriétés élastiques du matériau .mais nous avons aussi remarqué qu'il y avait des différences dans les résultats obtenus par les deux méthodes.

En ce qui concerne les courbes de module de cisaillement (B, D, F), la propriété augmente toujours avec le taux d'inclusion dans le modèle numérique, mais cette fois dans le modèle analytique, le module de cisaillement diminue avec l'augmentation de la fraction volumique de l'inclusion.

IV.4.4 Effet de la fraction des pores

L'effet de taux de porosités (1% ,3%,5%) sur des VER de même fraction volumique d'inclusion a été simulé, et les résultats sont présentés dans les graphiques.

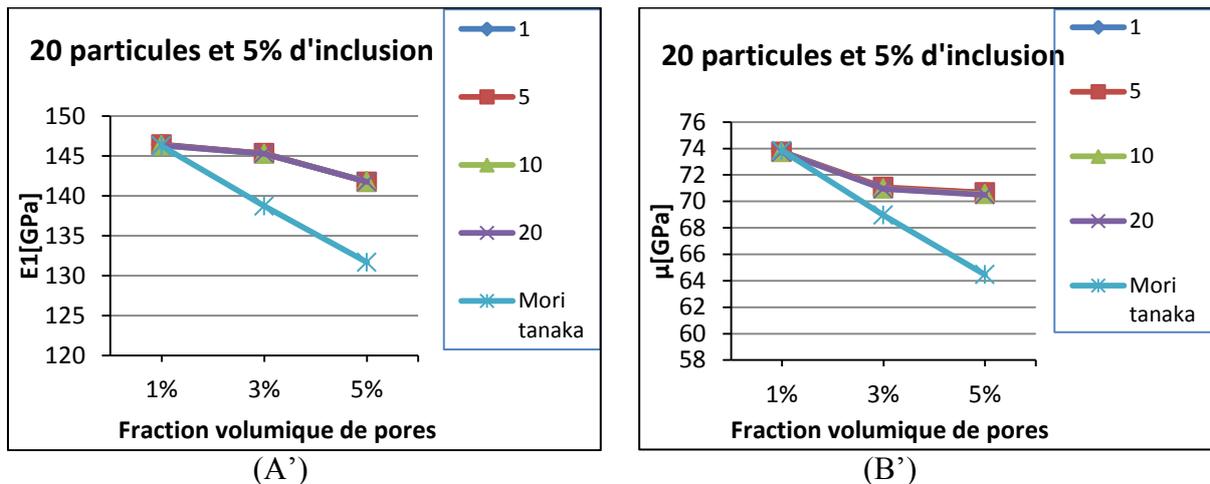


Figure IV.1 : Courbes de module de Young (A') et du module de cisaillement (B') en fonction de la fraction volumique de pores pour le modèle analytique et numérique (20 particule 5%d'inclusion).

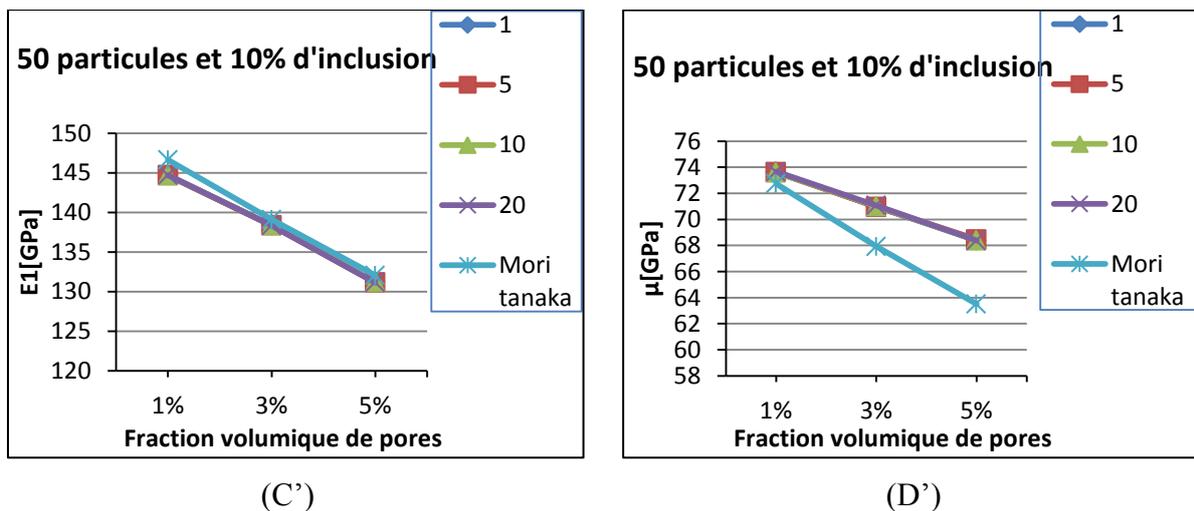


Figure IV.2 Courbes de module de Young(C') et du module de cisaillement (D') en fonction de la fraction volumique de pores pour le modèle analytique et numérique (50 particule 10%d'inclusion)

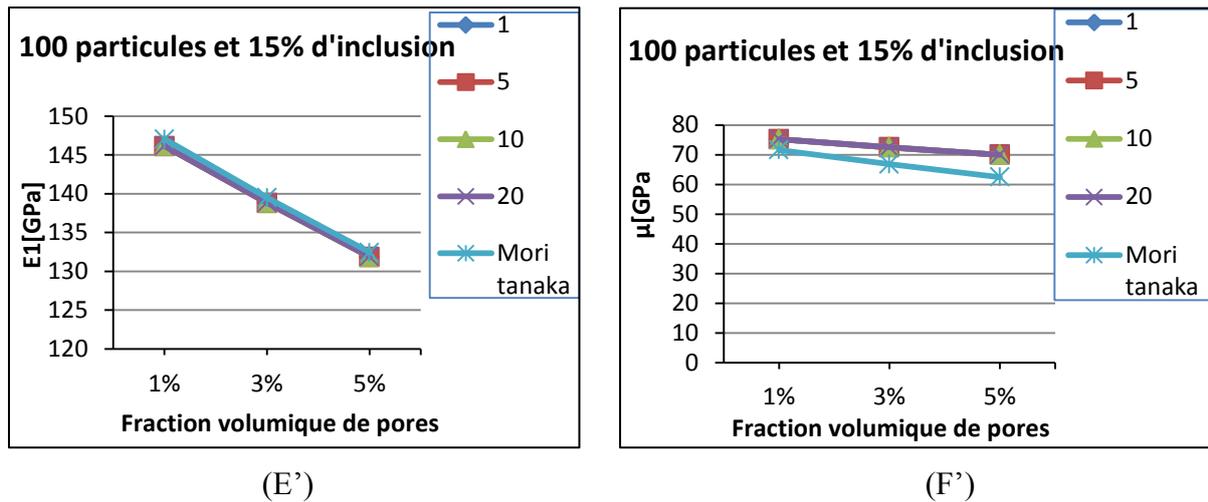


Figure IV.3 : courbes de module de Young(E') et du module de cisaillement (F') en fonction de la fraction volumique de pores pour le modèle analytique et numérique (100 particule 15%d'inclusion).

Les figures montrent que les deux modules de Young et de cisaillement décroissent au fur et à mesure que la fraction augmente. Pour les deux modèles les résultats sont très proches et presque identiques dans certains cas.

IV.5 Comportement élastoplastique d'un composite à matrice métallique à trois phases

IV.5.1 Effet de la fraction d'inclusion

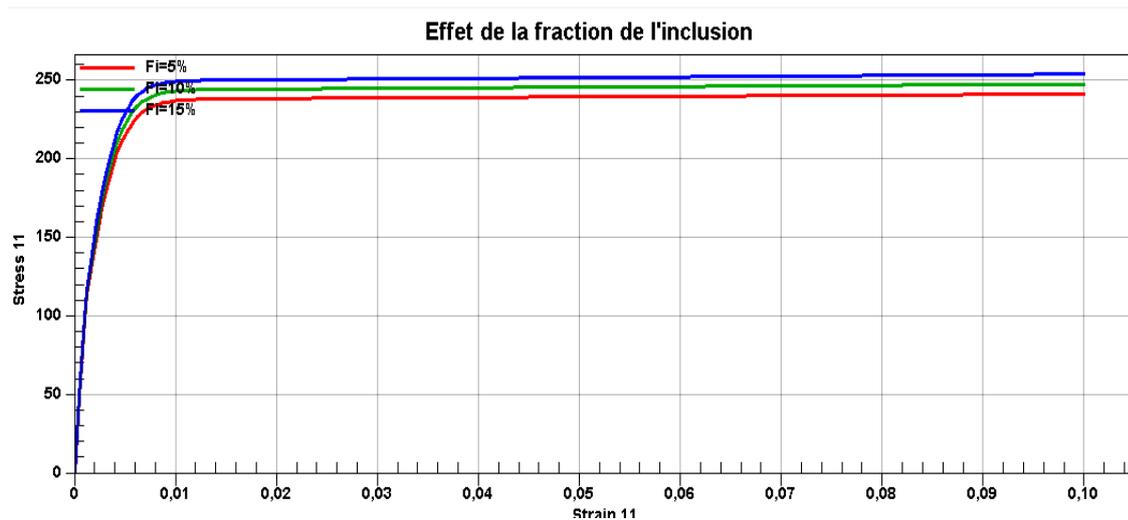


Figure IV.1 : Effet de la fraction volumique de l'inclusion sur le comportement élastoplastique de matériau.

A partir du graphe on peut noter qu'au stade de la déformation élastique les courbes de contrainte-déformation pour les différentes fractions sont fondamentalement les mêmes, et que leurs amplitudes diffèrent légèrement dans le stade plastique, aussi l'augmentation de la fraction volumique de l'inclusion fait améliorer la résistance du matériau.

IV.5.2 Effet de la fraction des pores

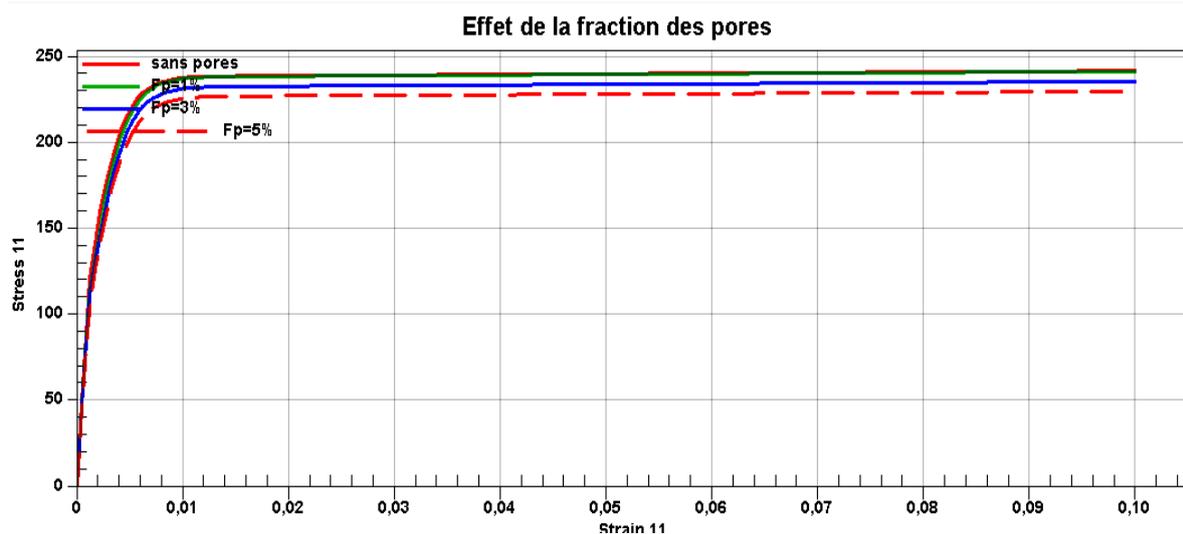


Figure IV.1 : Effet de la fraction volumique des pores sur le comportement élastoplastique de matériau.

Dans la figure ci-dessus on peut remarquer que les différentes courbes se coïncident dans le domaine élastique et qu'au début du domaine plastique que celles-ci commencent à se différencier, on peut aussi voir qu'avec l'augmentation de la fraction volumique des pores la résistance du matériau diminue.

IV.6 Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent que le taux de l'inclusion est de la porosité ont un effet significatif sur les propriétés et le comportement des composites, dont l'inclusion les améliorent et les pores les réduisent.

De plus dans le cas de fraction volumique de pore fixe, les modèles avec des nombres et des diamètres différents se comportent presque de la même façon et ont approximativement les mêmes propriétés. Par contre quand on fixe la fraction volumique d'inclusion, et on varie le nombre de particules et leurs diamètres, on remarque qu'il y a une variation du comportement d'un cas à l'autre.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce mémoire l'objectif principal est la modélisation des propriétés effectives d'un matériau composite à matrice métallique d'aluminium avec une inclusion sous forme de sphères du carbure de silicium et des pores sphériques.

Cette étude consistait à simuler le comportement des VERs générés par la méthode de reconstitution séquentielle aléatoire (RSA) pour différentes fractions volumiques d'inclusion et de pores avec une approche numérique par le logiciel Comsol multiphysics 5,6 et aussi dans certain cas par une approche analytique avec le logiciel digimat 2017.

Cette analyse nous a permis de démontrer que l'évolution de la fraction volumique de l'inclusion améliore la rigidité et la résistance des matériaux composite, contrairement à celle des pores qui nuisent à leurs comportement et propriétés.

En outre, la modification du nombre de pores et de leur diamètre pour la même fraction volumique maintient le comportement du composite pratiquement inchangé, mais en cas d'inclusion la variation du nombre et du diamètre des particules influe sur les propriétés et le comportement du composite.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[1] : Toumi Wafa « Optimisation de la configuration des tubes en matériaux composites sous pression », mémoire de master, université de Biskra, 2019.

[2] : <https://thesis.univ-biskra.dz> Y Djebloun « Généralités sur les matériaux composites » 2004.

[3] : Merazi Mohamed « Analyse mécanique des structures composites : Etude comparative entre les différentes théories des plaques » Thèse de doctorat en 3^{ème} cycle, université Sidi bel Abbas, 2014-2015.

[4] : Jean Marie Berthelot, « matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures », 4^{ème} édition, TEC & DOC, Le Mans Novembre 2010.

[5] : Bourhan kechaou « Corrélation entre propriétés diélectriques et mécaniques du composite à matrice époxyde renforcée par des fibres de verre E » Thèse, Ecole centrale de Lyon, 2003.

[6] : Marc Marzano « action composite pascal celle » ANFA, édition 2014.

[7] : Laurent gormet, « Généralités sur les matériaux composites », ECN, Centre Nantes 2008.

[8] : Lionel GENDRE « Matériaux composites et structures composites. » Université Paris-Saclay, édité 17/05/2011.

[9] : A. AL-Maghribi, « Comportement des matériaux composites à fibres Courtes applications à l'impact basse vitesse », thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier, 2008.

[10] : Yousef Khalil « glossaire matériaux composite Carma », livre, actualisé octobre 2006.

[11] : Jean Marie Berthelot, « matériaux composite, comportement mécanique et analyse des structures », 4^{ème} édition, Lavoisier 2005.

[12] : Khiloun Mokhtar « Investigation sur la réponse mécanique des structures en matériaux à gradient de propriété » Thèse de doctorat, université Sidi bel Abbas, 2019.2020.

[13] : <https://metalblog.ctif.com> « les composite à matrice métallique pour résister à l'usure ».

[14] : <https://www.ceramtec.fr> « Matériaux-céramiques carbure de silicium ».

[15] : <http://www.ceramtec.fr> « Céramique non oxydée-carbure de silicium ».

[16] : <https://ceramique-technique.com> « carbure de silicium Sict – le syndicat des industriels »

[17] : Devlay, R, « données numérique sur l'aluminium non allié », les technique de l'ingénieur.

- [18] : <https://www.universalis.fr>
- [19] : Michel Dequatre Marc et Thierry Devers, « Précis des aluminiums ».
- [20] : H.Hadji et Dj Mabrouki, « Effet de traitement thermique sur les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium ».Mémoire de master, université M'sila ,2019-2020.
- [21] : Birouk Koussaila, Chekroun Mounir « Simulation numérique du comportement élastique d'un matériau composite à trois phases », mémoire de master, université de Bejaia, 2019-2020.
- [22] : Ahmed El Moumen, « prévision du comportement des matériaux hétérogènes basé sur l'homogénéisation numériques », thèse de doctorat, Université de Lille 1,2014.
- [23] : Ding, Y, 2012 « analyse morphologique de la microstructure 3Dde réfractaires électrofondus à très haute teneur en zircone : relations avec les propriétés mécaniques chimiques et le comportement pendant la transformation quadratique monoclinique ».Rapport de thèse.
- [24] : Musielak, M, Marcoux, M, Quintard, M ,2013 « détermination des paramètres de transfert du TCE à travers le béton ».Journées techniques.
- [25] : M. François DI Paola, « modélisation multi-échelles du comportement thermo-élastique de composites à particules sphérique », thèse, école centrale paris, 2010.
- [26] : NGUYEN Huy Gia « approche micromécanique pour la modélisation de comportement élastoplastique des composites : application aux mortiers de résine », thèse, université de Cergy-Pontoise, 2008.
- [27]:<http://www.gurit.com> « Guide to composites ».
- [28] : Kassir Adjao O.Boussari « prédiction numérique des propriétés élastique du composite terre de bane-pailles de riz », mémoire de fin de formation, université d'Abomey-Calavi, 2017-2018.
- [29] : Laid Chaibinou, « Etude des propriétés thermomécaniques des composites renforcées par des particules », thèse de doctorat, Université de Biskra.
- [30] : Sophie lemaitre, « modélisation des matériaux composites multiphasiques à microstructures complexes. Etude des propriétés effectives par des méthodes d'homogénéisation », thèse de doctorat 2017.
- [31]:<https://mateis.insa-lyon.fr> « Microtomographe rayon X ».
- [32] : Mohamed Said Boutaani « Détermination du volume élémentaire représentatif (VER) et les propriétés macroscopique d'un matériau hétérogène à microstructure aléatoires », Thèse, Université de Batna 2, 2018.

[33]:Saidj.L et Boudjetten .L « homogénéisation du comportement thermique d'un milieu hétérogène biphasique »mémoire de master, université de Bejaia, 2017-2018

[34] : <https://www.comsol.fr> « la méthodologie de modélisation de Comsol »

Résumé

Il existe différents types de matériaux dans l'industrie avec différentes qualités et performances parmi eux les matériaux composites qui sont constitué d'au moins deux matériaux, un renfort sous forme de fibre ou particule et une matrice dont l'inclusion est noyée.

Lors de la conception de ces matériaux et à cause de plusieurs facteurs des pores peuvent se créer et former une nouvelle phase comme dans notre cas d'un composite triphasé à matrice métallique avec une inclusion sphérique et des pores sous forme de sphère.

La détermination des propriétés et du comportement des composites à l'échelle macro n'est pas facile, mais pour ce faire nous devons d'abord passer à échelle microscopique où nous pouvons capturer même les plus petites déformations et dommages puis utilisée les informations obtenues pour déterminer les propriétés effectives du matériau globale par l'homogénéisation. Pour étudier la microstructure d'un matériau elle doit être générée par l'une des méthodes de génération puis maillée, cela est obligatoire dans toute analyse.

Dans ce travail nous avons discuté de tout ce qui précède plus en détail, et nous avons effectué plusieurs essais et simulations avec un logiciel numérique Comsol et un autre analytique Digimat pour déterminer les propriétés effectives d'un composite à matrice métallique d'aluminium avec une inclusion du carbure de silicium et des pores et en déduire l'effet de taux de cette inclusion et de la porosité sur la rigidité et la résistance de matériau.

Abstract

There are different types of materials in the industry with different qualities and performances among composite materials which are made up of at least two materials, reinforcement in the form of fiber or particle and a matrix whose inclusion is drowned.

During the design of these materials and because of several factors pores can be created and form a new phase as in our case of a three-phase metal matrix composite with a spherical inclusion and pores in the form of a sphere.

Determining the properties and behavior of composites at the macro scale is not easy, but to do this we must first move to the micro scale where we can capture even the smallest deformations and damages and then use the information obtained to determine the effective properties of the global material by homogenization

To study the microstructure of a material it must be generated by one of the generation methods then meshed, this is mandatory in any analysis.

In this work we have discussed all the above in more details, and we have carried out several tests and simulations with Comsol numerical software and Digimat software to determinate the effective properties of an aluminum metal matrix composite with an inclusion of silicon carbide and pores, and to deduce the rate effect of this inclusion and of the porosity on the rigidity and the resistance of the material.

Résumé

Il existe différents types de matériaux dans l'industrie avec différentes qualités et performances parmi eux les matériaux composites qui sont constitués d'au moins deux matériaux, un renfort sous forme de fibre ou particule et une matrice dont l'inclusion est noyée.

Lors de la conception de ces matériaux et à cause de plusieurs facteurs des pores peuvent se créer et former une nouvelle phase comme dans notre cas d'un composite triphasé à matrice métallique avec une inclusion sphérique et des pores sous forme de sphère.

La détermination des propriétés et du comportement des composites à l'échelle macro n'est pas facile, mais pour ce faire nous devons d'abord passer à l'échelle microscopique où nous pouvons capturer même les plus petites déformations et dommages puis utiliser les informations obtenues pour déterminer les propriétés effectives du matériau globale par l'homogénéisation. Pour étudier la microstructure d'un matériau elle doit être générée par l'une des méthodes de génération puis maillée, cela est obligatoire dans toute analyse.

Dans ce travail nous avons discuté de tout ce qui précède plus en détail, et nous avons effectué plusieurs essais et simulations avec un logiciel numérique Comsol et un autre analytique Digimat pour déterminer les propriétés effectives d'un composite à matrice métallique d'aluminium avec une inclusion du carbure de silicium et des pores et en déduire l'effet de taux de cette inclusion et de la porosité sur la rigidité et la résistance de matériau.

Abstract

There are different types of materials in the industry with different qualities and performances among composite materials which are made up of at least two materials, reinforcement in the form of fiber or particle and a matrix whose inclusion is drowned.

During the design of these materials and because of several factors pores can be created and form a new phase as in our case of a three-phase metal matrix composite with a spherical inclusion and pores in the form of a sphere.

Determining the properties and behavior of composites at the macro scale is not easy, but to do this we must first move to the micro scale where we can capture even the smallest deformations and damages and then use the information obtained to determine the effective properties of the global material by homogenization

To study the microstructure of a material it must be generated by one of the generation methods then meshed, this is mandatory in any analysis

. in this work we have discussed all the above in more details, and we have carried out several tests and simulations with Comsol numerical software and Digimat software to determine the effective properties of an aluminum metal matrix composite with an inclusion of silicon carbide and pores, and to deduce the rate effect of this inclusion and of the porosity on the rigidity and the resistance of the material.