République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication mécanique et productique

Par :

HAMMOUMRAOUI Thiziri

BIROUCHI Samira

Thème

Comportement multi-échelle d'un matériau hétérogène

Soutenu le 28/09/2021 devant le jury composé de :

Melle	HIMED	Président
Mr	BOUTAANI	Rapporteur
Mr	HADJOU	Examinateur

Année Universitaire 2020-2021

Remerciement

Nos profonds remerciements à Monsieur S. BOUTAANI, enseignent à l'Université de Bejaia, encadreur de ce mémoire, pour son aide précieuse, sa confiance, ses encouragements, sa patience et son soutien favorable pour l'aboutissement de ce travail.

Nous remerciement vont également aux membres de jury pour avoir accepté d'examiné et jury notre travail.

Nous tenons aussi à adresser nos vifs remerciements à tous les enseignants du département génie mécanique de l'université de Bejaia, ainsi que le personnel du hall technologie

Targa Ouzemour.

En finale nos souhaitons remercié l'ensemble des étudiants génie mécanique et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin.

Dédicaces

Je tien a remerciés le dieu tout, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu

Je dédie ce modeste travaille :

Particulièrement je remercie mes chers parents qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études.

A mes sœurs KHOUKHA, NAIMA et FARIDA, à mes frères SAID, RAZIK, SAMIR et DJAMEL, à mes belles sœurs, à mes beaux-frères et leurs enfants pour leurs soutiens moraux et leurs conseils pour que je puisse atteindre mes objectifs.

Je remercie également mes chères copines NESSMA et THIZIRI, pour leurs aides.

A l'ensemble de mes proches, mes chers amis.

SAMIRA

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chères parents qui m'ont soutenu et encouragé, pour leur amour, leur sacrifices et leur prières toute au long de mes études.

A ma sœur Cylia et son mari Mohamed Saïd et mon frère Yanis Saïd pour leur soutien.

A mes amies Samira et Katia qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de réalisation de ce travail.

A toute ma famille et proches.

A tous mes amis sans exception et à qui je souhaite plus de succès.

Thiziri

Liste de figures

Figure I.1 Matériau composite

Figure I.2 Types de renfort

Figure I.3 Renforts unidirectionnels

Figure I.4 Types de renfort

Figure I .5 Fibre de verre

Figure I.6 Fibre d'aramide

Figure I.7 Fibre de bore

Figure I.8 Fibre silice (quartz)

Figure I.9 Fibre de polyéthylène

Figure I.10 Différentes familles de matrice

Figure I.11 Principe du moulage au contacte

Figure I.12 Principe du moulage par projection simultanée

Figure I.13 Moulage sous vide

Figure I .14 Principe de moulage par centrifugation

Figure I.15 Principe de moulage par injection de résine

Figure I .16 Composite monocouche

Figure I.17 Plaque stratifiée

Figure I.18 Composite sandwich

Figure I .19 Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié

Figure I.20 Graphite

Figure I.21 Aluminium

Liste de figures

Figure I.22 La structure d'aluminium

Figure II.1 Matériau orthotrope

Figure II.2 Plan d'isotropie

Figure II.3 Exemple des matériaux hétérogènes multiphasiques obtenus par la Micro Tomographie

Figure II.4 La taille et les constituants des échelles dans un matériau de construction

Figure II.5 Principe de l'approche d'homogénéisation des matériaux hétérogènes.

Figure II.6 Approche et principe de l'homogénéisation numérique

Figure II.7 Exemple de VER d'une microstructure hétérogène.

Figure II.8 Méthodologie de l'utilisation de l'approche numérique.

Figure II.9 Microstructures virtuelles utilisées pour la simulation : (a) Gonzálezet al. (2004), (b) Guo et al. (2014), (c) Kari et al. (2007b) et (d) Tawerghi and Yi(2009)

Figure II.10 Etape de préparation d'une microstructure réelle pour la simulation.

Figure II.11 Schéma de la procédure de traitement d'une microstructure réelle pour la simulation

Figure III.1 Génération des particules en 3D dans une cellule cubique

Figure III.2 Propriétés géométriques de la cellule cubique

Figure III.3 Définition de la géométrie et du paramétrage des particules

Figure III.4 Les tailles de volume de la microstructure 3D utilisé pour les fractions volumique 10% et 05%

Figure III.5 Interface du logiciel Comsol

Figure III.6 Maillage de microstructures hétérogènes :(a) maillage associé, (b) microstructure

Figure III.7 module de compressibilité k en fonction de nombre d'élément.

Liste de figures

Figure III.8 module de cisaillement μ en fonction de nombre d'élément.

Figure III.9 Module de Young E en fonction de nombre d'élément.

Figure III.10 Courbes de convergence de module de compressibilité apparent kapp en fonction de la taille du domaine V. Fr05%

Figure III.11 Courbes de convergence de module de cisaillement apparent μapp en fonction de la taille du domaine V.Fr05%

Figure III.12 Courbes de convergence de module de Young en fonction de la taille du domaine V. Fr05%

Figure III.13 Courbes de convergence de module de compressibilité apparent kapp en fonction de la taille du domaine V. Fr10%

Figure III.14 Courbes de convergence de module de cisaillement apparent μapp en fonction de la taille du domaine V.Fr10%

Figure III.15 Courbes de convergence de module de Young en fonction de la taille domaine V.Fr20%

Figure III.16 Effet de la fraction volumique sur le module de compressibilité K.

Figure III.17 Effet de la fraction volumique sur le module de cisaillement μ

Figure III.18 Effet de la fraction volumique sur le module de cisaillement E

Liste des tableaux

Tableau I-1 les caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Tableau I.2 Les avantages et les inconvénients du moulage sous vide

Tableau I.3 Quelque caractéristique de l'aluminium

Tableau I.4 la composition chimique de l'aluminium 2017A

Tableau I.5 caractéristique des alliages de l'aluminium

Tableau III.1 Propriétés élastiques des composants.

Sommaire

Introduction général

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

I.1. Introduction ……..……..2

I.2 Définition ……..…...2

I.3. Les constituants ……...…….3

I.3.1. Le renfort ……...…….3

I.3.1.1 architecture des renforts ……...……..4

I.3.1.2 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts ……...……7

I.3.2. La matrice ……..…….……7

I .3.3 Les charges et les additifs ……..….……8

I .3.3.1 Les charges 8

I .3.3.2 Les additifs ……9

I.4. Procédés d'élaborations ……..……...9

I.4-1- Moulage au contact ……9

I.4-2-Moulage par projection simultanée ……10

I.4 -3- Moulage sous vide …….……...10

I.4 -4- Moulage par centrifugation ……...….....11

I.4 -5- Moulage par projection de résine ……...…….…..11

I.5. Structure des matériaux composites ……...12

I.5.1- Les monocouches ……...……..12

I.5.2- Les stratifiés ……..12

I.5.3. Les sandwichs ……...13

I.6. Les domaines d'utilisation ……..13

I.7. La loi de mélange pour les composites stratifiés ……13

I.8 Le graphite …….....15

I.8.1 Définition du graphite ……15

I.8.2.Usages …….……16

I.9. L'aluminium ……...……..17

I.9.1 Définition ……..17

I.9.2 Principales caractéristiques d'aluminium ……17

I.9.3.Propriété d'aluminium 2017A……..….18

I.10. Conclusion …….....19

Chapitre II Etude bibliographique sur la micromécanique

II.1 introduction …….…21

II.2 Généralité sur le comportement élastique du matériau ……..…….21

II.2.1 Elasticité linéaire …….……21

II.2 .2 Matériaux élastiques isotropes ……22

II.2.3 Matériau anisotrope ……..22

II.2.4 Matériau orthotrope ……...……...22

II.2.5 Matrice orthotrope à isotrope transverse ……...……...22

II.3 Généralités sur les matériaux hétérogènes ……..….23

II.3.1 Effet d'échelles dans les matériaux hétérogènes ……..……24

II.4 Généralité sur les techniques d'homogénéisation …….……...……..25

II.4.1 Notion de VER dans un matériau hétérogène …….……..27

II.5 Approches d'homogénéisation analytique et numérique …….27

II.5.1 Homogénéisation analytique ……....……28

II.5.2 Homogénéisation numérique 28

II.5.2.1 Approches numériques basées sur les microstructures virtuelles 29

II.5.2.2 Approche numériques basées sur les microstructures réelles ……..……...30

II.6 Condition aux limites ……..….32

II.7 Présentation de quelques modèles analytiques de changement d'échelles …….…....32

II.7.1 Bornes de Voigt …….…….….….….33

II.7.2 Bornes de Reuss ……...…..33

II.8 Conclusion ……..……..34

Chapitre III Comportement élastique d'un matériau hétérogène à 02 phases

III.1 Introduction …….……..36

Sommaire

III.2 Génération des particules en 3D dans un volume cubique ……..……...……..36

III.3 Matériaux et Méthodes ……...…..…38

III.3.1 Description de la microstructure ……....38

III.3.2 Propriétés élastiques des phases ……..…….…….…40

III.4 Définition d'un maillage …….…….40

III.5 Différentes méthodes de maillage ……..…….…….49

III.5.1 Maillage régulier ……...……...….….42

III.5.2 Maillage adaptatif ……..……..…….…..42

III.6 Problématiques liées au maillage éléments finis …….……42

III.7 Effet du nombre des éléments sur les valeurs du module de compressibilité k, module de cisaillement μ et module de Young E ……..….…….42

III.8 Résultats et discussion ……..….…….44

III.8.1 Fraction volumique 5% …….……..44

III.8.2 Fraction volumique 10%.....46

III.9 Effet de la fraction volumique sur les propriétés élastiques …….……47

III.10 Discussion des courbes …….…….…….49

III.11 Conclusion ……....……..49

Conclusion générale

Références bibliographique

Résumé

Introduction générale

Introduction générale

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de « nouveaux matériaux ».

Aujourd'hui, on remarque une progression importante dans l'emploi des matériaux composites dans des domaines d'application aussi divers et variés.

Le but de notre travail est de prévoir le comportement multi-échelle d'un matériau hétérogène à 2 phases ainsi de déterminer les propriétés élastiques apparent. Plusieurs réalisations sont effectuons pour différentes fractions volumiques, ces réalisations sont de forme d'un cube qui contient un certain nombre de sphères et avec défirent géométrie. Le comportement élastique est évalué à l'aide d'un logiciel de simulation numérique (Comsol), ce travail est devisé on 03 chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique des matériaux composite d'une façon générale. Où on expose défirent types de renfort et matrice qui constituent les matériaux hétérogènes, on aborde quelque procédé d'élaboration de ces matériaux.

Le deuxième chapitre contient une étude bibliographique sur la micromécanique, ainsi une présentation générale des matériaux hétérogènes. Il expose aussi les techniques d'homogénéisation élastique en tenant compte les méthodes d'approche (analytique et numérique). On présente aussi quelque modèle analytique de changement d'échelle (Bornes de Voigt-Reuss).

Finalement, le troisième chapitre présentera la génération des particules en 3D dans un volume cubique, il expose aussi la technique de maillage des images virtuelles utilisée dans cette étude, finalement la modélisation par la méthode d'homogénéisation numérique à l'aide du logiciel Comsol multi-physique 5.5 et le calcul des propriétés élastiques effectives de composite en 3D ayant des particules sous forme sphérique, les résultats obtenus seront comparé aux deux modèles abordés (Hashin-Strikman et le modèle auto cohérent).

Chapitre I : GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

I. GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

I.1. Introduction

Il existe différentes familles de matériaux : Les métaux, les plastiques, les composites, ect

Dans ce chapitre, on s'intéresse seulement aux composites. Ce type des matériaux ne sont pas une nouveauté, ils ont tous le temps été utilisé par l'homme, citons par exemple le bois, le béton et le béton armé.

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel limité.

Ces matériaux se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie.

I.2 Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins de deux matériaux de nature déférentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

On distingue deux types de composites : [1] [2]

- **Grande diffusion**

  Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont :

  Optimisation des couts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe des matériaux (moulage par contact, SMC et injection).

- **Hautes performances**

  Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

  Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

  -Drapage autoclave, enroulement finalement, RTM.

  -Beaucoup de procédés encore manuels.

I.3. Les constituants

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont :

- La matrice.
- Le renfort.
- Les charges et les additifs.

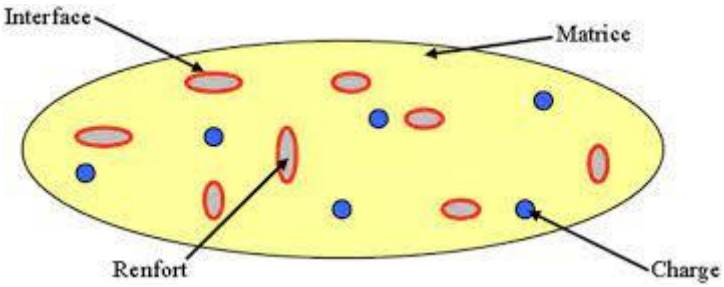


Figure I.1 Matériau composite

I.3.1. Le renfort

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des couts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes :

-linéique (fils, mèches)

-tissus surfaciques (tissus, mats)

- multidirectionnelle (tresse, tissus complexe, tissage tri directionnel ou plus).

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure (I-2)

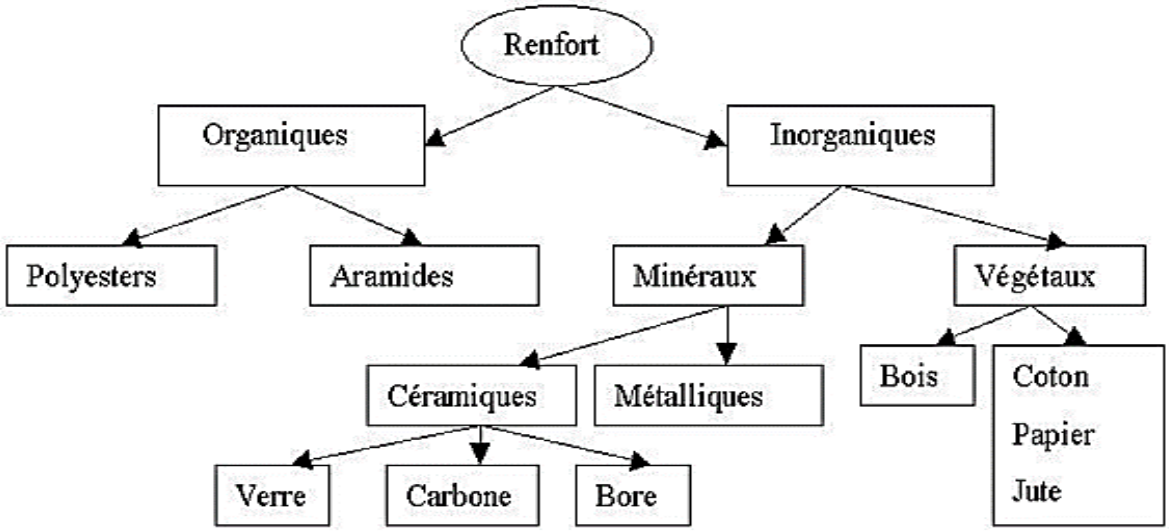


***Figure* I.2.*Types de renfort* [3]**

I.3.1.1 architecture des renforts

Il existe différentes géométries et textures de renforts [4]

- **Les unidirectionnels (UD)**

  Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

  Les tissus se composent de fils de chaine et de trames perpendiculaires entres eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

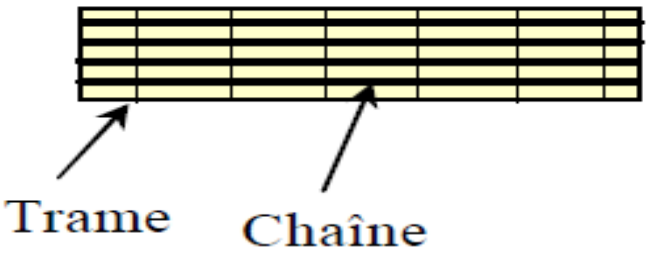


Figure* I.*3 Renforts unidirectionnels

- **Toile ou taffetas** chaque fil de chaine passe dessus chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.
- **Serge** chaque fil de chaine flotte au-dessus de plusieurs(n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaine. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé2/2.
- **Satin** chaque fil de chaine flotte au-dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique.

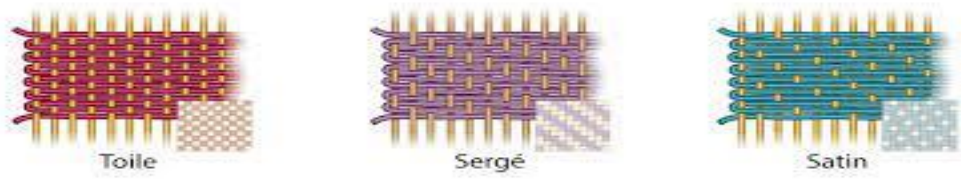


Figure I.4 Types de renfort

On distingue plusieurs natures de fibre :

a) fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyactylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

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

b) fibre de verre

Elle constitue le renfort essentiel les composites de grandes diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres : [4]

E : Pour les composites de grande diffusion et les applications courantes.

R : Pour les composites hautes performances.

D : Pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

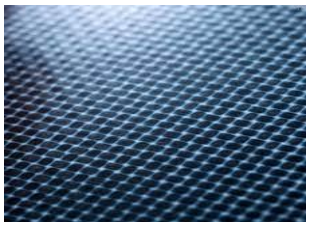


Figure* I .*5 Fibre de verre

c) Fibre d'aramide

Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- 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.

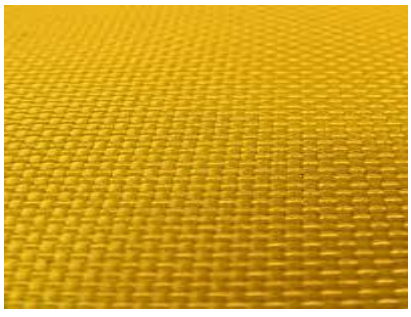


Figure I.6 Fibre d'aramide

d) Fibre de bore

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

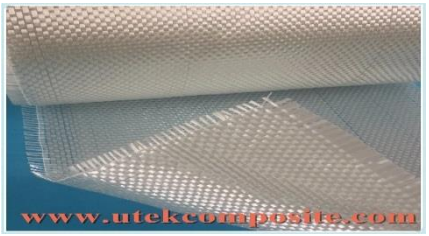


Figure I.7 Fibre de bore

e) Fibre de silice (ou de quartz)

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée

Figure I.8 Fibre silice (quartz)

f) Fibre de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées. On peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

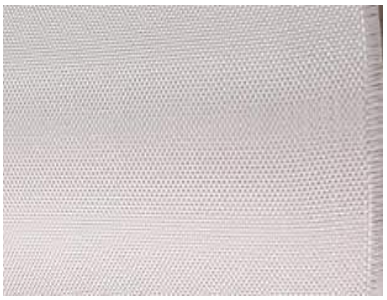


Figure I.9 Fibre de polyéthylène

I.3.1.2 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Tableau I-1 les caractéristiques moyennes des fibres et renforts.

Renforts	Diamètre du filament (µm)	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $°C^{-1}$
	d	Mv	E	G	k	C_r	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	$0,5*10^{-5}$
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	$0,3*10^{-5}$
Carbone HM	6,5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	$0,08*10^{-5}$
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	$0,02*10^{-5}$
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	$-0,2*10^{-5}$
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	$0,4*10^{-5}$
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

I.3.2. La matrice

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartit les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres.

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure (I-10)

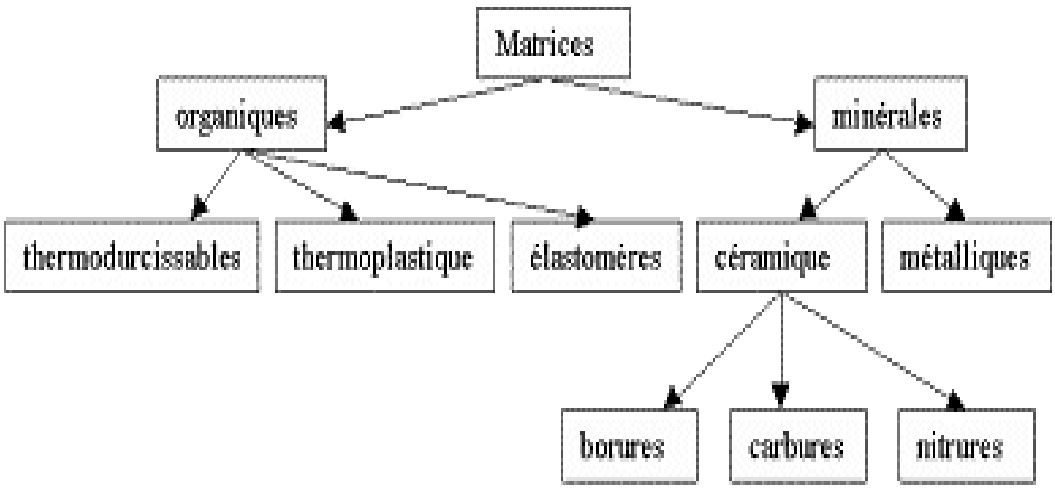


Figure I.10 Différentes familles de matrice

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques. [1]

a) Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées (traitement thermique ou physico-chimique). Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage : les résines polyesters insaturées, les résines de condensation, les résines époxydes.

b) Résines thermoplastiques

Ce sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité.

c) Résines thermostables

Ce sont des polymères présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (plus de 200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques.

I .3.3 Les charges et les additifs

I .3.3.1 Les charges

- **Charges renforçâtes**

  L'objet de l'incorporation de charges renforçâtes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en :

- Charges sphériques.
- Charges non sphériques. [1]

- **Charges non renforçâtes**

  Les charges non renforçâtes ont pour rôle soit de diminuer le cout des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines. Parmi ces classes on trouve :

  - Charges de faible cout.
  - Charges ignifugeantes.
  - Charges conductrices et antistatiques. [1]

I .3.3.2 Les additifs

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelque % et moins) et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage.
- Pigments et colorants.
- Agents anti-retrait.
- Agents anti-ultraviolets.

I.4. Procédés d'élaborations :

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort. [1]

I.4-1- Moulage au contact

***Principe**

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détourée. [4]

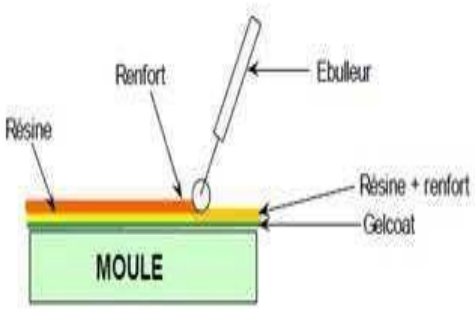


Figure I.11 Principe du moulage au contacte

I.4-2-Moulage par projection simultanée

***Principe**

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite « de projection » comportant :

- Un dispositif de coupe – projection du renfort (fibre).
- Un ou deux pistolets projetant simultanément. [4]

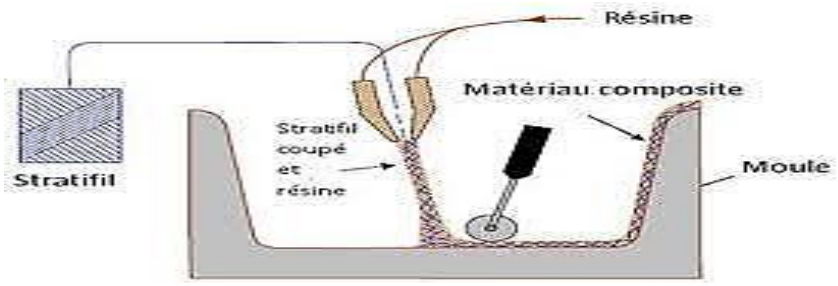


Figure I.12 Principe du moulage par projection simultanée

I.4 -3- Moulage sous vide

***Principe**

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre.

Le renfort est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort.

On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort.

La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide. [4]

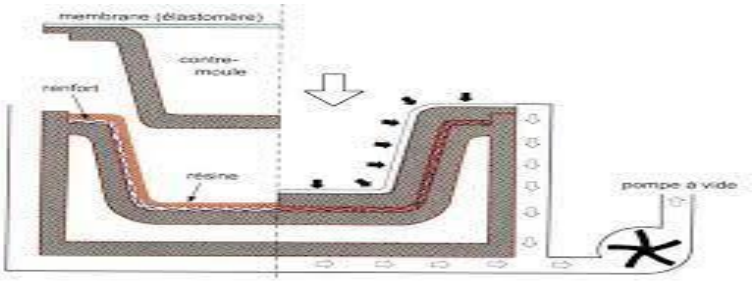


Figure I.13 Moulage sous vide

Le tableau suivant représente les avantages et les inconvénients du moulage sous vide :

Tableau I.2 Les avantages et les inconvénients du moulage sous vide

Avantages	Limites
• Deux faces lisses éventuellement gel-captés. • Qualité constante. • Bonne cadence de production. • Nécessite peu de surface. • Investissement très modéré (moule, pompes à vide). • Bonnes conditions de travail et d'hygiène.	• Possibilité de forme plus réduite qu'au contact. • Mise au point parfois difficile •

I.4 -4- Moulage par centrifugation

Principe

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. Le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande vitesse. [4]

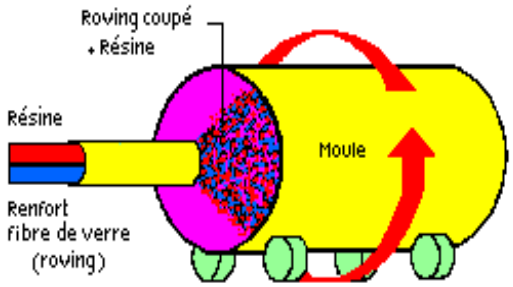


Figure I .14 Principe de moulage par centrifugation

I.4 -5- Moulage par projection de résine

Principe

Le moulage par injection de résine RTM (Résine Transfert Molding). Une nappe de fibre (tissus, mats) est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse pression.

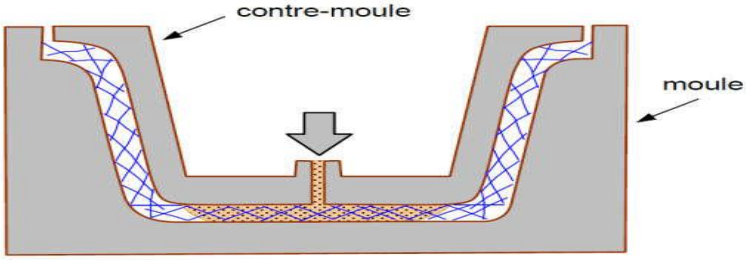


Figure I.15 Principe de moulage par injection de résine

I.5. Structure des matériaux composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches.
- Les stratifiées.
- Les sandwiches.

I.5.1- Les monocouches

Les monocouches sont les éléments de base des structures composites. Des fibres unidirectionnelles placées dans le plan médian sont emprisonnées dans une matrice polymère.

Ils sont caractérisés par le type de renfort utilisé : des fibres logues (unidirectionnelles ou non), courtes, sous forme de tissus, de rubans. [6]

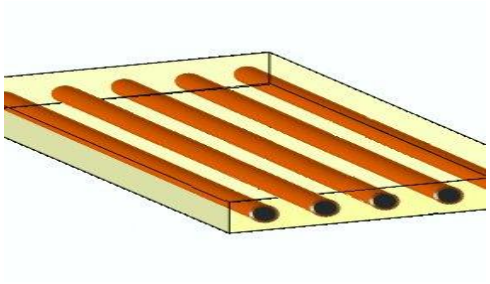


Figure I .16 Composite monocouche

I.5.2- Les stratifiés

On appelle stratifier un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux (figure). Une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. Le type de stratifié est définie généralement par sa séquence d'empilement, information qui fournit de manière synthétique l'orientation des diverses couches d'un stratifié. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure. [5]

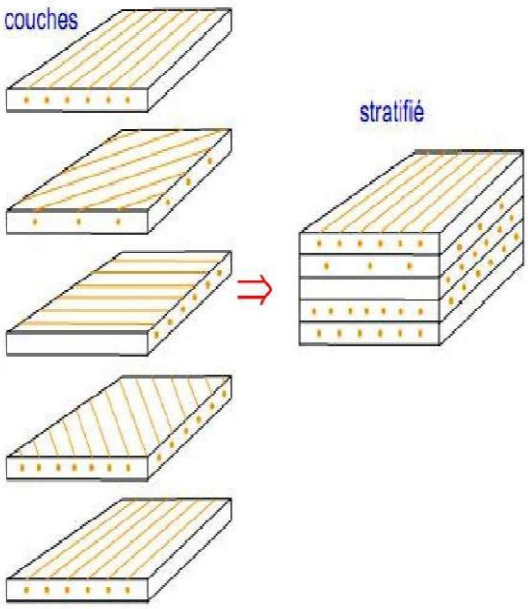


Figure I.17 Plaque stratifiée

I.5.3. Les sandwichs

Les structures composites subissant des sollicitations de types flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites. L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Une âme nid d'abeilles est présentée sur la figure (I-13)

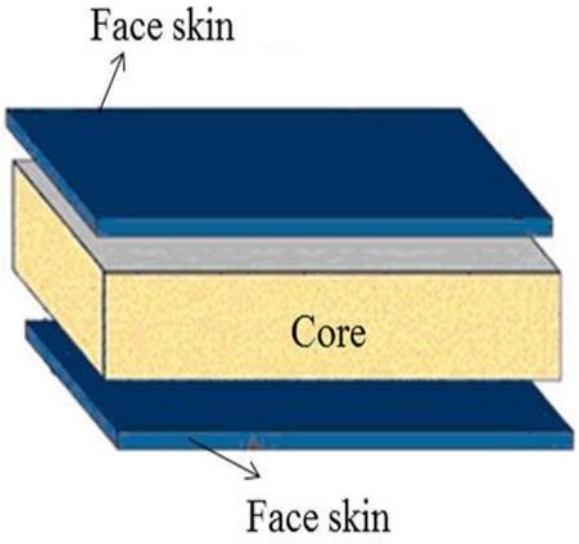


Figure I.18 Composite sandwich

I.6. Les domaines d'utilisation

Les matériaux composites de nos jours prennent une place prépondérante dans différents domaines :

- Electricité et électronique.
- Bâtiment et travaux publics.
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire).
- Santé (instrumentation médicale). [6]

I.7. La loi de mélange pour les composites stratifiés

Les déformations des matériaux homogènes et isotopiques peuvent être décrites assez simplement à l'aide des modules d'élasticité et des contraintes de déformation, qui sont les propriétés de base des matériaux bruts. Dans le cas des composites, chaque élément joue un rôle différent et c'est l'association de ces propriétés qui confère au matériau final ses caractéristiques propres. Bien que ces caractéristiques finales soient le résultat d'interactions complexes entre le renfort et la matrice, il est possible d'en donner une estimation simple à l'aide de la Loi des Mélanges [7] appliquée aux composites stratifié :

$$\boldsymbol{Pc = \rho c * Vc = \ \rho f * Vf + \rho m * Vm} \quad \text{Où } (\boldsymbol{Vf + Vm}) = \mathbf{1} \qquad \textbf{(I-1)}$$

Avec :

- Vf : Fraction volumique de fibres.
- Vm : Fraction volumique de matrice.
- Pc : Poids estimé du composite.
- ρf : Masse volumique de la fibre.
- ρm : Masse volumique de la matrice.

Il s'agit de valeurs théoriques, en réalité la présence de vides fait que $Vf + Vm \leq 1$. Par exemple, le module d'élasticité en traction peut être estimé en se basant sur les modules respectifs de la fibre et de la matrice. Cette équation peut être modélisée par un système de ressorts associés en parallèle Figure (I-14).

$$\boldsymbol{Ec = Ef * Vf + Em * Vm} \qquad \textbf{(I-2)}$$

Avec :

- Ec : Module d'élasticité en traction estimé du composite.
- Ef : Module d'élasticité en traction de la fibre.
- Em : Module d'élasticité en traction de la matrice.
- Vf : Fraction volumique de fibre.
- Vm : Fraction volumique de matrice.

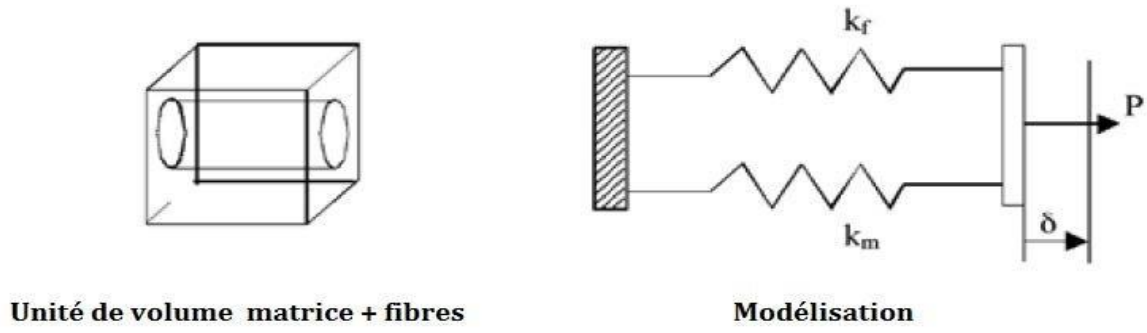


Figure I .19 Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié

I.8.Le graphite

I.8.1 Définition du graphite

Le graphite naturel est un minéral de carbone (C) élémentaire, de structure cristalline hexagonale. Sa couleur varie de noire à gris –noir. C'est un minéral tendre, flexible, d'éclat métallique et d'aspect graisseux et luisant caractérisé par :

Figure I.20 Graphite

- Une densité faible qui varie de 2.1à 2.3
- Une dureté faible de 2 sur l'échelle de Mohs
- Un point de fusion très élevé (3500 °C)
- Une masse volumique varie de [2.09 à 2.23] g/cm^3
- Une conductivité thermique varie de [120à 150] W/m.k
- Un module d'Young E =12.58 GPa
- Un module de compression K= 8.58GPa
- Coefficient de poisson V=0.26

Le graphite naturel se subdivise en trois variétés :

- Le graphite en paillettes.
- Le graphite de veine.
- Le graphite amorphe.

Le graphite est une substance inerte qui résiste à l'attaque de la plupart des produits chimiques. C'est un excellent conducteur d'électricité et de chaleur. Il possède un faible coefficient de friction, en raison d'un clivage parfait entre ses lamelles superposées. Son coefficient thermique est également faible.

Le graphite symétrique, de même composition que le graphite naturel, est obtenu par la graphitisation (cuisson entre 2600°C et 3000°C) d'un mélange de coke de pétrole et de brai (bitume) précuit. [8]

I.8.2. Usages

Le graphite est utilisé en raison de ses propriétés chimique et physique : neutralité chimique, résistance à la chaleur, conductivité thermique et électrique, faible coefficient d'expansion thermique, faible coefficient de friction est faible coefficient d'absorption des rayons X et des électrons. De plus, l'usage du graphite est très polyvalent Ainsi :

- Le graphite entre dans la fabrication des crayons à mine et des piles alcalines ;
- Il est aussi utilisé dans l'industrie métallurgique pour la fabrication de l'acier, dans les mélange de briques réfractaires et dans le revêtement de moules de fonderies (creusets et divers ustensiles de coulée de métaux).
- Dans **l'industrie de la peinture,** le graphite sert à la fabrication de peintures anticorrosives et antistatiques ;
- Dans **l'industrie automobile,** le graphite entre dans la fabrication de garnitures de freins et d'embrayages, de pièces de moteurs, de génératrices électriques et de joints étanches mécaniques ;
- Le graphite est employé dans plusieurs autres produits, tels les lubrifications industrielles, les poudres métalliques, les composants de polymère et de caoutchouc, les matériaux ignifuges qui servent à retarder la progression du feu ;
- Dans **les technologies de pointe,** le graphite est utilisé comme modérateur dans les réacteurs atomiques et comme substance stable à la chaleur dans la fabrication de composants de roquette. Il sert également dans la fabrication de piles à combustible pour les véhicules. [8]

I.9.L'aluminium

I.9.1 Définition

L'aluminium est un élément du troisième groupe de classification de Mendeleïev, dont le nombre atomique est 13. Les nombreux attributs et qualités de l'aluminium explique sa popularité croissante ; en effet ce métal est malléable, de couleur argentée. [9]

Figure I.21 Aluminium

L'aluminium industriel contient généralement 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 les propriétés électrique et mécanique [9].

L'aluminium a une structure CFC, c'est-à-dire Cubique à faces Centrées comme il est montré dans la figure (21) ci-dessous :

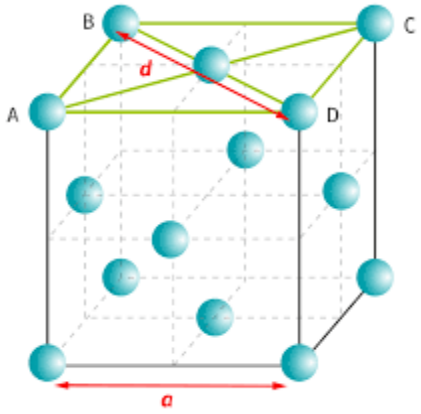


Figure I.22 La structure d'aluminium

I.9.2 Principales caractéristiques d'aluminium

Le tableau suivant nous donne les valeurs et la symbolisation des propriétés principales de l'aluminium [10]

Tableau I.3 Quelque caractéristique de l'aluminium

Propriété	Symbole	Valeur
Symbole chimique	Al	
Température de fusion	θ_F	660°C
Masse volumique	ρ	2700 Kg.m^-3
Coefficient de poisson	V	0.33
Module de Young	E	70 GPa
Limite d'élasticité	Re	10 à 20 MPa
Conductivité thermique	λ	237 W.m-1K-1
Allongement %	A%	50 60%
Capacité calorifique	c	9.10² J.Kg- ¹K-¹
Résistance maximale à la traction	Rm	70 à 80 MPa

I.9.3. Propriété d'aluminium 2017A

Dans notre pratique nous avons utilisé un aluminium de décolletage de nuance 2017 A sa composition chimique et donné dans le tableau () ci-dessous. [11]

Tableau I.4 la composition chimique de l'aluminium 2017A

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.20à 0.80	Max 0.7	3.5à 4.5	0.40à 1.0	0.40à0.1	0.1	0.25	-	Solde

Tableau I.5 caractéristique des alliages de l'aluminium

Propriété	Symbole	Valeur
Alliage	2017A	
Résistance maximale de la traction	Rm	420 Mpa

Allongement	A%	18%
Limite d'élasticité	Rp	280 Mpa
Module de Young	E	74000 Mpa

I.10. Conclusion

Ce chapitre présente une présentation générale sur les matériaux composites, le rôle des différentes phases (fibre, interface, matrice,) y est faite avec ces avantages et ces inconvénients, leurs conceptions ainsi que leurs utilisations dans le secteur industriel.

Par ailleurs, nous avons décrit deux différents matériaux (l'aluminium et le graphite), ainsi que leurs propriétés et leurs caractéristiques.

Chapitre II

Etude bibliographique sur la micromécanique

II. Etude bibliographique sur la micromécanique

II.1 introduction

La micromécanique est une branche de la mécanique dont l'objectif est de décrire le comportement des matériaux hétérogènes. Les approches micromécanique consistent généralement à considérer un matériau hétérogène comme un ensemble de constituants dont la morphologie, la répartition et la taille influencent le comportement global.

La plupart des méthodes de micromécanique des matériaux sont basées sur la mécanique des milieux continue plutôt que sur des approches atomistiques telles que la dynamique moléculaire. Les chercheurs ont utilisé la mécanique du milieu continu pour trouver diverses expressions mathématiques, y compris des règles de mélanges (Voigt (1887) et Reuss (1929)), et des méthodes de champ moyen (par exemple Eshelby (1957)) menant à la dérivation de formules semi-empiriques (Halpin et Tsai (1969)), comme modèles pour le calcul des propriétés effectives approximatives.

La micromécanique a la capacité à capturer r la déformation physique et les dommages à une échelle plus fondamentale. Cela permet de mieux saisir les taux de contrainte et de déformation multiaxiaux. Sans oublier que la micromécanique utilise des modèles constitutifs de constituants isotropes plus simples et des critères de défaillance [4].

La micromécanique permet de de prédire des propriétés multiaxiales souvent difficile à mesurer expérimentalement.

II.2 Généralité sur le comportement élastique du matériau

II.2.1 Elasticité linéaire

La loi de comportement d'un matériau est généralement donnée comme suite :

$$\sigma = C : \varepsilon \qquad \textbf{(II.1) [12]}$$

Ou σ est le tenseur des contraintes du second ordre, $\boldsymbol{\varepsilon}$ est le tenseur second ordre, $\boldsymbol{C}$ est le tenseur de rigidité du quatrième ordre, le symbole «**:**» désigne le double produit scalaire entre deux tenseurs. Ou sous forme matricielle.

II.2 .2 Matériaux élastiques isotropes

À Cinq constantes matérielles, c'est -à-dire le module d'Young E , le module de cisaillement G, le module de masse k Lame constant λ, et le coefficient de poisson v , sont couramment utilisés. Cependant, seuls deux eux sont nécessaires pour décrire complétement la caractéristique de C. Par exemple, en utilisant les valeurs de Ket G, C peut être représenté comme :

$$C=3KI^{V}+2GI^{d} \qquad \textbf{(II.2)}$$

Dans l'équation (2), I^{V} et I^{d} désignent respectivement la partie volumétrique et la partie dévia torique d'un tenseur à quatre ordres [13].

II.2.3 Matériau anisotrope

Dans le cas le plus général, la matrice de rigidité et la matrice de souplesse sont déterminées chacune par 21 constantes indépendantes. Ce cas correspond à un matériau ne possédant aucune propriété de symétrie. Un tel matériau est appelé matériau triclinique ou matériau anisotrope [12]

II.2.4 Matériau orthotrope

Un matériau orthotrope possède trois plans de symétrie, perpendiculaires deux à deux. Il est à noter que l'existence de deux plans de symétrie perpendiculaires implique l'existence du troisième.

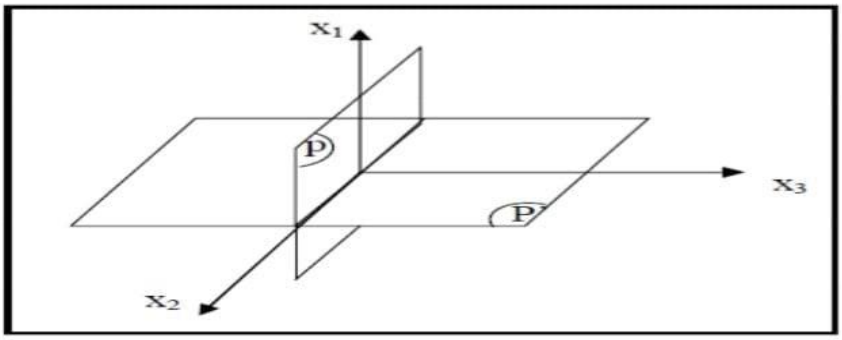


Figure II.1 Matériau orthotrope

II.2.5 Matrice orthotrope à isotrope transverse

Le matériau se comporte donc comme un matériau orthotrope possédant de plus un axe de révolution. Le matériau est alors appelé matériau orthotrope de révolution ou isotrope

transverse. Il en résulte qu'un changement de base effectué par rotation quelconque autour de cet axe doit laisser inchangée la matrice de rigidité (ou souplesse).

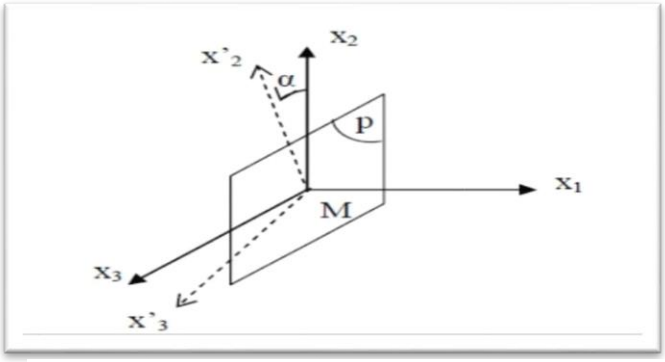


Figure II.2 Plan d'isotropie

II.3 Généralités sur les matériaux hétérogènes

Les matériaux hétérogènes sont des matériaux qui possèdent deux (biphasée) ou plusieurs phases (multi phase). Figure (II.3). L'avantage essentiel de ce type de matériaux est les propriétés structurales importantes, que leurs constituants élémentaires ne possèdent pas individuellement, et leur permettre de remplir de nombreuses fonctions techniques. Les exemples sont nombreux : 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 [14].

Pratiquement tous les matériaux hétérogènes sont constitués d'éléments discontinus appelés hétérogénéités, noyés dans une phase continue appelée matrice.

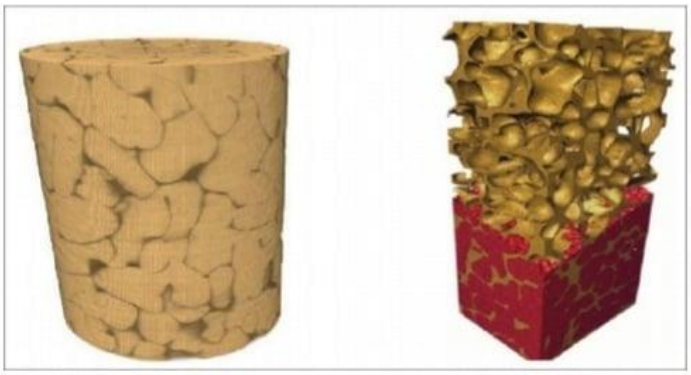


Figure II.3 Exemple des matériaux hétérogènes multiphasiques obtenus par la Micro Tomographie

II.3.1 Effet d'échelles dans les matériaux hétérogènes

On présente dans cette section la méthodologie et les concepts généraux de l'approche de changement d'échelle et les lois de comportement entre les déférentes échelles d'une microstructure hétérogène. Une microstructure peut être décrite dans le cadre de la mécanique par trois échelles :

- Échelle dite 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 semble être particulièrement adapté aux matériaux hétérogènes qui sont caractérisés par leur nature multi-échelle qui permet de distinguer successivement l'échelle de la structure, l'échelle du renfort ou de l'hétérogénéité et finalement l'échelle des continuant Figure (II.4). Sur cette figure, on présente le cas d'un matériau en béton avec ses échelles de caractérisation. On présente aussi les constituants et les compositions de chaque échelle. On remarque que la composition du matériau hétérogène dépend généralement des dimensions de l'échantillon [15]

Il faut d'abord pouvoir distinguer trois échelles de variations. La première, dite microscopique, c'est-à-dire l'échelle locale. Cette échelle permet de suivre les particules dans leurs distributions, orientation, contacte.... Cette échelle doit être suffisamment faible pour ne pas gommer les éléments élevés pour que les outils classiques de la mécanique des milieux continue soient utilisables. Il faut noter qu'il n'existe pas de critères universels pour fixer cette dimension. La seconde échelle est de nature mésoscopique dont laquelle l'effet des particules sur la réponse globale reste mineur par rapport à l'échelle microscopique. A cette échelle on trouve les microstructures dans lesquelles on parle de grain, fibre, pore ou charge.

La troisième dimension est la taille du volume à partir duquel le comportement macroscopique est calculé en tenant compte des informations mésoscopique ou microscopiques disponible. Cette échelle est l'échantillon dans son état naturel.

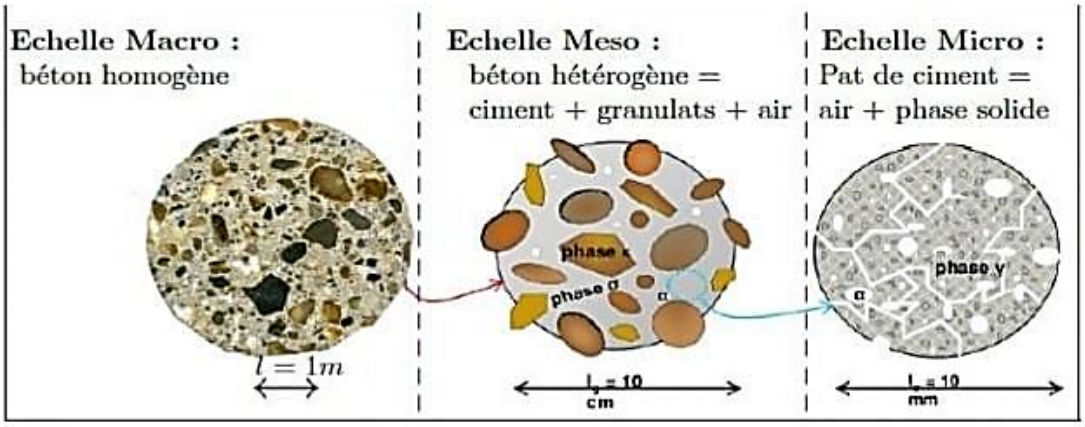


Figure II.4 La taille et les constituants des échelles dans un matériau de construction

Le passage d'une échelle vers une autre plus grande nécessite l'opération d'homogénéisation. Cette opération est définie par plusieurs étapes chacune gouverné par un ensemble d'équations. Dans ce qui suit, on présente le principe, les techniques et la méthodologie de l'homogénéisation qui régissent chaque échelle.

II.4 Généralité sur les techniques d'homogénéisation

L'approche d'homogénéisation consiste à définir le comportement d'un matériau hétérogène à partir de la connaissance des comportements (élastique, mécanique, électrique et autres) de ses différents composants élémentaires.

Le matériau hétérogène peut être remplacé par un milieu homogène équivalent qui a les mêmes propriétés effectives calculées. Le calcul des contraintes moyennes ou effectives ainsi que les déformations moyennes ou effectives du milieu homogène équivalent est l'analyse de niveau globale. Le terme « homogénéisation » est le processus dont le quel sont calculées les propriétés effectives, Chaboche [16]. Un autre terme utilisé est la « localisation » pour déterminer la déformation et la contrainte moyenne et locale obtenue de l'analyse locale, Gitman [17].

Les figures (II.5) et (II.6) montrent la description de l'approche d'homogénéisation et les éléments nécessaires pour le passage Micro-Macro et pour l'analyse multi-échelle. On note bien que la méthode d'homogénéisation consiste à substituer un matériau hétérogène par un matériau homogène, dit matériau homogène équivalent (MHE), qui répond globalement à un chargement

quelconque de la même façon. Bien sûre, ces méthodes s'appliquent à de nombreux problèmes de la physique et de mécanique tels que la conduction thermique, l'élasticité linéaire, la plasticité, la viscoplasticité, l'électromagnétisme, etc.

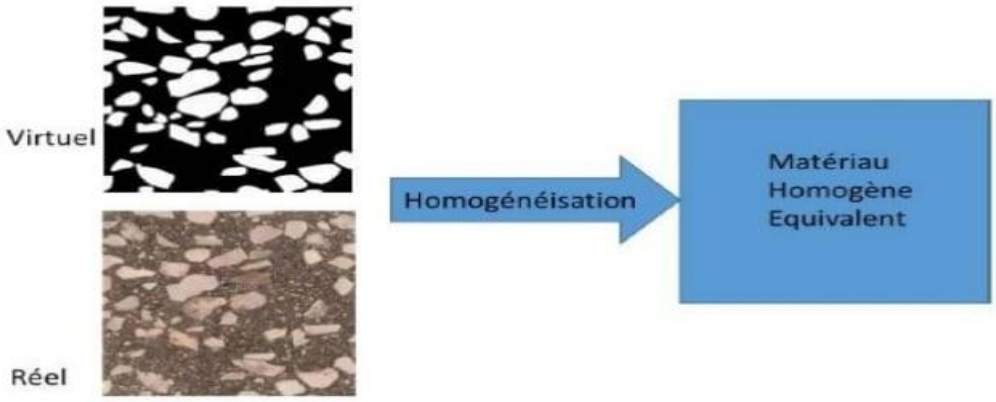


Figure II.5 Principe de l'approche d'homogénéisation des matériaux hétérogènes.

L'application de la procédure d'homogénéisation est basée sur le choix d'un plus petit volume élémentaire qui doit être représentatif du comportement macroscopique au niveau microscopique. Ce volume est appelé volume élémentaire représentatif (VER), qui est décrit dans figure (II.6) [15] selon les conditions d'échelles suivantes **:**

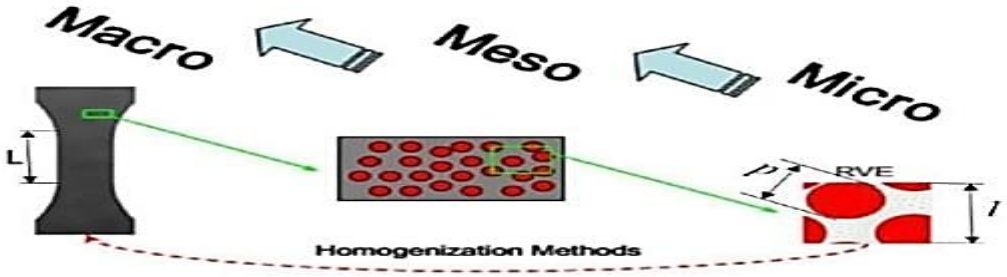


Figure II.6 Approche et principe de l'homogénéisation numérique

Si d est la taille caractéristique des hétérogénéités, et L la taille caractéristique de la structure macroscopique considérée, alors la taille caractéristique l du VER est soumise à deux conditions :

$l << L$: C'est la condition pour qu'on puisse traiter le matériau comme un milieu continu et y déterminer des champs continus de contraintes et de déformations.

$l > d$: C'est la condition nécessaire pour pouvoir affecter au VER un comportement macroscopique homogène malgré son hétérogénéité méso/microscopique.

II.4.1 Notion de VER dans un matériau hétérogène

Le VER (volume élémentaire représentatif) est capital pour l'évaluation de la réponse globale dans un matériau hétérogène. La connaissance de la taille du VER est un élément essentiel lors des propriétés effectives thermiques ou mécaniques. Cette taille dépend de la nature et des constituants du matériau.

La taille du VER doit d'être beaucoup plus grande que la plus grosse des hétérogénéités et en plus négligeable aussi devant la taille de la microstructure. Il faut noter que l'emploi des méthodes d'homogénéisation requière la connaissance de la taille du VER. La figure (II.7) montre des exemples de VER dans une microstructure à 2-phases. Dans le même exemple de microstructure, on distingue différentes situations, dites réalisations, pour représenter la taille d'un VER. La différence entre ces exemples de réalisations concerne le nombre d'hétérogénéités dans le volume, la morphologie, la disposition des hétérogénéités et finalement leurs distributions et leur nature.

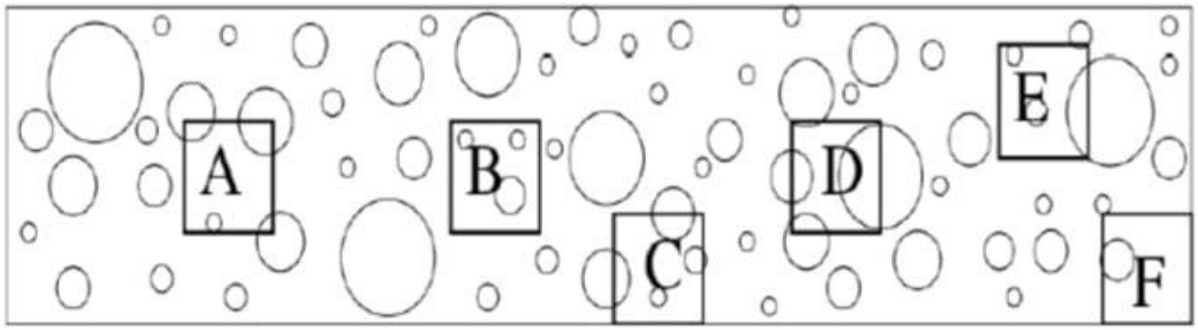


Figure II.7 Exemple de VER d'une microstructure hétérogène.

II.5 Approches d'homogénéisation analytique et numérique

Nous proposons dans cette partie une présentation générale des déférentes approches et méthodes d'homogénéisation. On choisit de classer ces deux grandes familiales, les méthodes d'homogénéisation numérique.

II.5.1 Homogénéisation analytique

Les méthodes d'homogénéisation analytique sont classées en deux groupes : les bornes et les modèles.

On considère un milieu élastique. Composé d'une matrice isotrope de module de compression k_m, de module de cisaillement μ_m de coefficient de poisson v_m et d'un module de Young E_m renforcé par une distribution aléatoire des inclusions de modules k_i μ_i, $v_i$etE_i.

Nous donnons les expressions des bornes de différents ordres et les modèles disponibles dans la littérature. Nous avons présenté les méthodes suivantes : les bornes d'ordre 0, les bornes d'ordre 1 de Voigt (1889) et Reuss (1929) et les bornes d'ordre 2 de Hashin et Shtrikman (1963) (HS) ainsi que la solution diluée auto-cohérent de Mori et Tanaka (1973) (MT) et le modèle Auto-cohérent généralisé de Christensen et Lo (1979) (GSC).

II.5.2 Homogénéisation numérique

La mécanique des matériaux hétérogènes s'est longtemps aux approches analytiques. Les progrès considérables des moyens de calcul ont favorisé l'utilisation de la simulation numérique. Trois types de microstructures ont été utilisés dans cette approche. 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. La figure (II.8**)** présente la méthodologie et le principe de l'homogénéisation numérique basée sur la notion du VER. On remarque que la première étape consiste au choix du VER puis la définition de la géométrie globale du matériau et finalement vient le maillage et la simulation numérique du comportement.

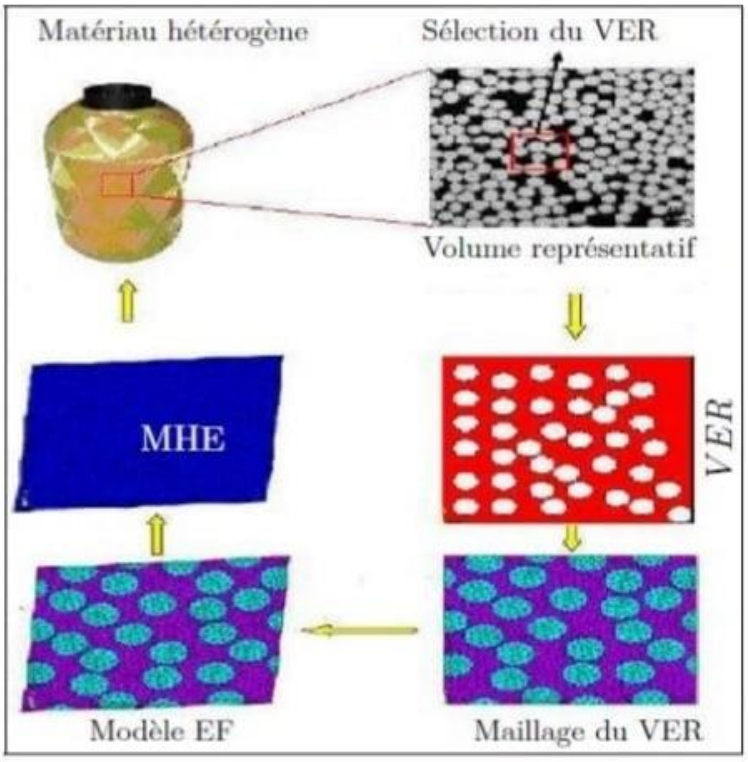


Figure II.8 Méthodologie de l'utilisation de l'approche numérique.

II.5.2.1 Approches numériques basées sur les microstructures virtuelles

En ce qui concerne l'étude du comportement mécanique des milieux hétérogènes par les approches numériques basées sur la notion du VER,

On note que les propriétés élastiques augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique. L'erreur obtenue sur les propriétés effectives diminue avec l'augmentation de la taille du VER. La convergence est alors assurée par des volumes de grande taille avec une erreur absolue faible. A partir de ces contributions, et pour les inclusions fibreuses, un rapport entre la longueur du volume L et le diamètre des particules D a été proposé pour une bonne convergence. On note qu'un rapport de L/D>10/3 est largement suffisant pour estimer une propriété effective.

On note que les approches numériques basées sur la méthode des éléments finis ont été utilisées pour d'autres types de microstructures virtuelles, comme le cas des mosaïques de

Voronoi étudié par Kanit et al. (2003), figure (II.9) (a) et l'étude de la plasticité macroscopique des poly cristaux par Barbe et al. (2001b), figure (II.9) (b).

Récemment, la caractérisation des matériaux par l'approche numérique a été utilisé pour d'autre type de microstructure hétérogènes avec une très compliquée et architecturée figure (II.9) (c). Par exemple, Minh et al. (2011) et Minhet al. (2013) ont étudié le comportement d'un matériau hétérogène représenté par une microstructure architecturée, pour des applications dans le domaine des balistiques.

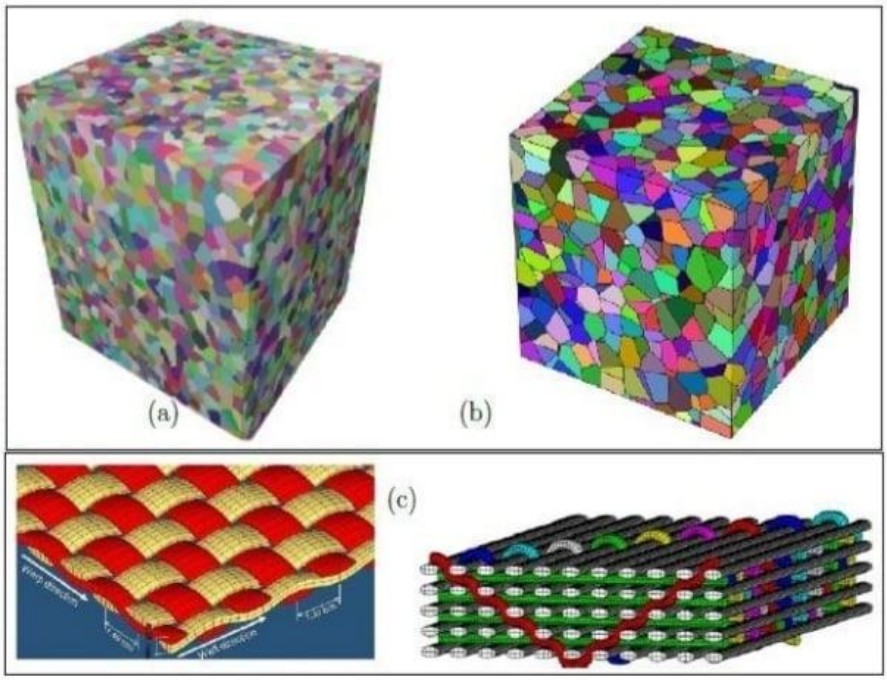


Figure II.9 Microstructures de morphologie complexe pour l'approche numérique, (a) Kanit et al.(2003), Quey et al.(2011) et (c) Minh et al.(2013).

II.5.2.2 Approche numériques basées sur les microstructures réelles

Les observations microscopiques fournissent des vues bidimensionnelles (2D) d'un échantillon. Elles produisent également des informations sur la distribution des hétérogénéités dans la matrice. Dans le cas général, la microstructure des matériaux hétérogènes contient un grand nombre d'hétérogénéités, exige un effort considérable.

Cependant, la tomographie peut être aussi utilisée.

Les microstructures réelles sont obtenues par des mesures expérimentales. C'est le cas par exemple des travaux de Kanit et al. (2003) qui s'intéressent à la modélisation numérique des

microstructures hétérogènes de la crème glacée. L'image 3D de la crème est obtenue par le polissage successif des éprouvettes. Ils ont proposé une nouvelle démarche pour estimer les propriétés apparentes et effectives en utilisant des approches numériques couplées avec les moyennes les paramètres statiques.

Pour introduire les microstructures réelles dans une approche numérique, un ensemble des étapes de binarisation et de segmentation sont nécessaires, en utilisant des algorithmes dédiés à l'amélioration des images réelles. La figure (II.10**)** montre l'ensemble des opérations pour préparer une microstructure réelle pour effectuer une simulation numérique.

L'organigramme de la figure (II.11) donne un aperçu de traitement d'une image réelle pour le maillage et pour la simulation numérique.

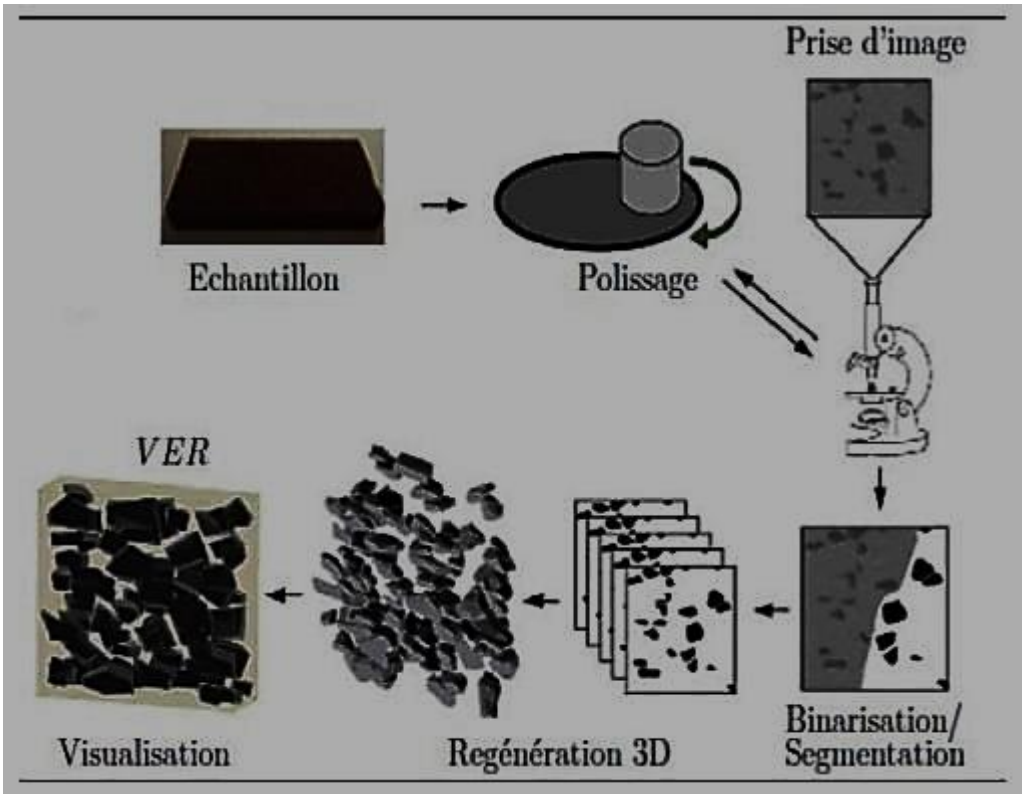


Figure II.10 Etape de préparation d'une microstructure réelle pour la simulation.

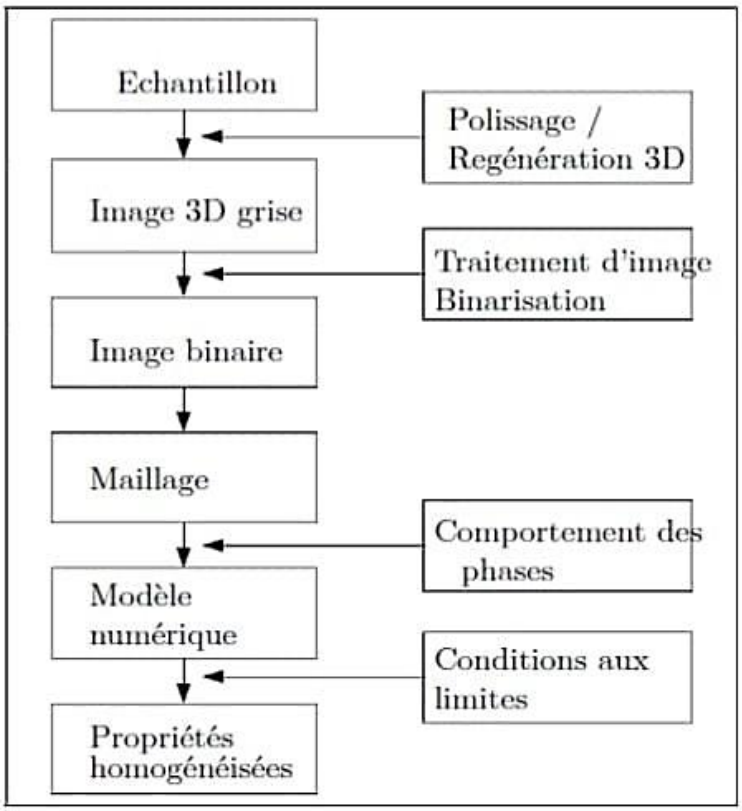


Figure II.11 Schéma de la procédure de traitement d'une microstructure réelle pour la simulation

II.6 Condition aux limites

Deux types de conditions aux limites (CAL) sont considérés et doivent être appliquées sur un élément de volume *V*. Dans le cas d'élasticité linéaire, ces conditions sont des conditions aux limites uniformes cinématiques (KUBC) et des conditions de périodicité. La taille minimale du VER exigée pour estimer les propriétés effectives est inférieure pour des conditions aux limites périodiques que pour le KUBC. Les résultats obtenus par les conditions aux limites périodiques convergent plus rapidement que ceux obtenus par KUBC. Ont démontrés que les conditions aux limites périodiques fournissent les évaluations les plus raisonnables parmi la classe des états de conditions aux limites possibles pour des matériaux statistiquement homogènes.

II.7 Présentation de quelques modèles analytiques de changement d'échelles

Cette partie récapitule les principaux modèles analytiques utilisables en élastique linéaire parmi les nombreux modèles d'homogénéisation existants.

Un aspect important dans l'étude de modèles micromécaniques est de savoir si les méthodes utilisées donnent des résultats cohérents. Les limites de (Reuss, 1929 ; Voigt 1928) sont utilisés

pour vérifier les bornes des modèles analysés, en d'autres termes, les résultats obtenus par les modèles décrits précédemment devraient se situer dans la région formée par ces limites.

Dans cette section, les différents modèles et limites pour les prédictions élastiques des composites à deux phases sont examinées. Les méthodes comprennent les approximations de Voigt et Reuss (règle de mélangeurs).

Par la suite, on site les différents limites (bornes) de rapproches pour le domaine de multi échelle (dit micromécanique). [18]

II.7.1 Borne de Voigt

Le modèle de Voigt (1928) est utilisé comme un seuil pour évaluer les propriétés élastiques effectives d'un matériau hétérogène. En général, cette limite surestime la rigidité du composite. Pour constituants isotropes, le modèle Voigt prédit toujours l'isotropie du matériau composite. [18]

II.7.2 Borne Hashin-Shtrikman

Les limites (Hashin & Shtrikman, 1961 ; 1962) sont les plus souvent utilisées dans la littérature, car ils ont un intervalle plus limité. Pour les composite isotrope macroscopiquement avec deux phases isotropes 1 et 2, les limites de module d'élasticité volumique et de module de cisaillement sont données par :

$$k^{Hs^{\pm}} = k_m + \frac{f_i}{(k_i - k_m)^{-1} + f_m(k_m + \frac{4}{3}\mu_m)^{-1}} \quad \textbf{(II.3)}$$

$$\mu^{Hs^{\pm}} = \mu_m + \frac{f_i}{(\mu_2 - \mu_1) + \frac{2f_m(k_m + 2\mu_m)}{5\mu_m(k_m + \frac{4}{3}\mu_m)}} \quad \textbf{(II.4)}$$

Avec :$k_m > k_i$; $\mu_i > \mu_m$; Vi + Vm = 1

Où (k_1, k_2) et (μ_1, μ_2) sont respectivement les modules de compressibilités et de cisaillement pour les deux phases f_m , f_i sont les fractions volumiques pour les deux phases les signes (+) et (-) désignent respectivement les bornes supérieures et inférieures.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a défini les généralités sur le comportement élastique du matériau composite et la matrice de rigidité effective d'un composite, ensuite nous avons donnés une généralité sur les matériaux hétérogènes ainsi que la notion de volume élémentaire représentatif (VER), par la suite nous avons défini les méthodes d'homogénéisation analytique (les bornes et les modèles) et les méthodes d'homogénéisation numérique.

Chapitre III :

Comportement élastique d'un matériau hétérogène à 02 phases.

Comportement élastique d'un matériau hétérogène à 02 phases.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on traite le comportement élastique d'un matériau à 2 phases, Le matériau élastique représente une classe très importante des matériaux avec une variété importante d'applications s'étendant des structures aérospatiales. Cette étude est basée sur la simulation et le calcul des propriétés effectives d'un matériau hétérogène dépendent essentiellement des propriétés des phases et de leurs fractions volumiques des deux matériaux choisi.

III.2 Génération des particules en 3D dans un volume cubique

Dans cette partie, on introduit le concept lié à la génération des microstructures à deux phases dans le but d'effectuer l'analyse micromécanique. La génération des microstructures se fait à l'aide des scripts programmés à l'aide d'un langage de programmation au sein d'un outil de graphisme 3D. L'idée de ces scripts est basée sur l'algorithme du schéma d'addition séquentielle aléatoire (RSA). Dans ce cas un algorithme est utilisé pour la génération 3D (Figure III.1). [18]

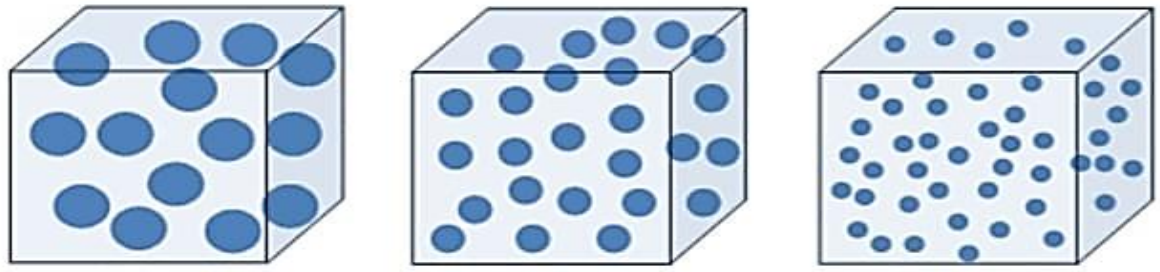


Figure III.1 Génération des particules en 3D dans une cellule cubique

De la même procédure de génération des particules en 2D, on applique l'algorithme en 2D pour le cas 3D (figure II.12), mais avec des changements comme la troisième coordonnée. Le problème se complexer un peu plus avec l'ajout de la troisième direction. En effet, nous nous retrouvons avec les paramètres définis aléatoirement pour les trois volumes :

- Les particules sont de même taille (diamètre).
- Les particules ne doivent pas chevaucher entre elles.
- Les particules ne doivent pas toucher0 les parois de la cellule.

L'algorithme est basé aussi sur le paramètre de la cellule qui est sa taille $\boldsymbol{l}$. Le volume de la cellule et le volume des particules sont relié entre elles en fonction de la fraction volumique des particules avec la relation :

$$fparticule = Nparticule * Sparticule / Scellule$$

Avec : $fparticule$ est la fraction volumique des particules.

$Sparticule$ Et $Scellule$ représentants l'aire de particule et de la cellule. Le nombre de particule Np, la taille de la particule dp et la fraction volumique des particules fp dans la cellule.

Les données initiales de l'algorithme sont : le choix de type de particules, leur nombre, leur fraction volumique dans la cellule élémentaire et le type d'arrangement de ces particules Figure (III.2).

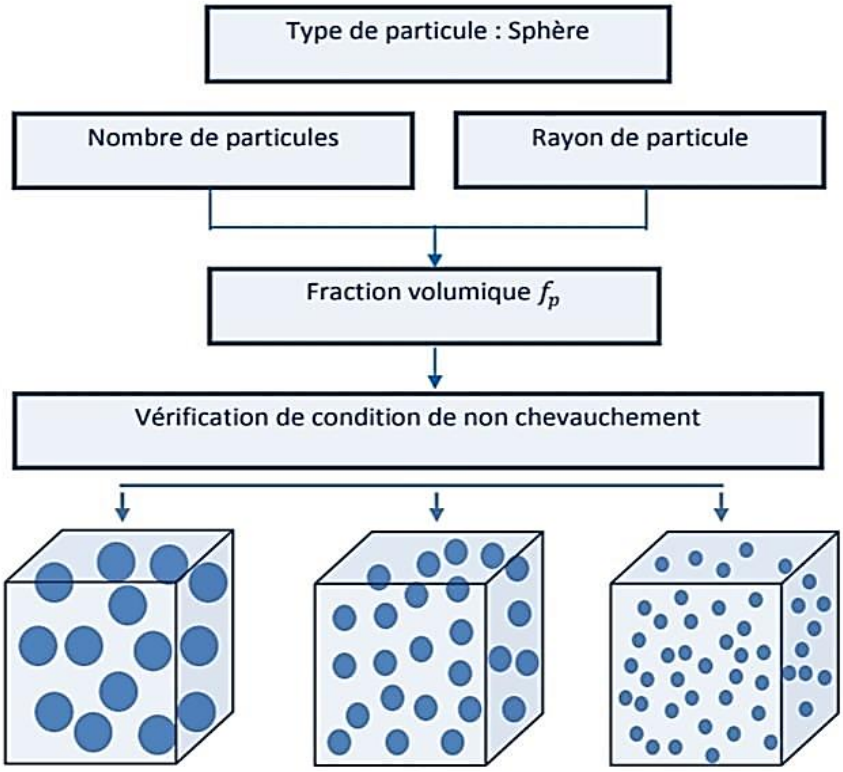


Figure III.2 Propriétés géométriques de la cellule cubique

La Figure (III.3) donne un schéma sur les particules et la distance entre deux géométries (cercle-cercle). Les coordonnées des centres des particules, $O1$ ($x1$, $y1$, $z1$) et $O2$ ($x2$, $y2$, $z2$) sont tirées aléatoirement. Afin de vérifier la condition de non collision des particules, nous recherchons deux points $p1$ et $p2$ de deux particules.

La particule 1 de coordonnées ($x1$, $y1$, $z1$) et la particule 2 de coordonnées ($x2$, $y2$, $z2$) doivent justifier la condition la distance entre les deux centres des particules soit :

$$D = \sqrt{(x2 - x1)^2 + (y2 - y1)^2 + (z2 - z1)^2}$$

Ainsi la condition de la collision d'une particule avec la paroi de la cellule cubique doit être justifiée, c.à.d. si le paramètre D, est inférieur au diamètre des sphères il y a collision. Si le paramètre D, est supérieur au diamètre des sphères il n'y a pas collision.

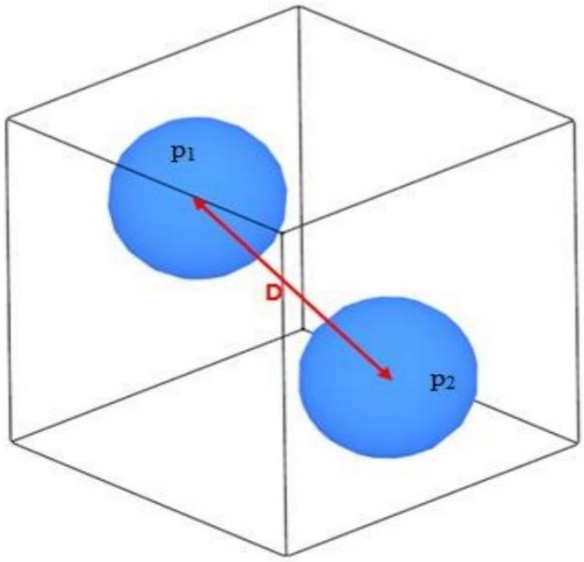


Figure III.3 Définition de la géométrie et du paramétrage des particules

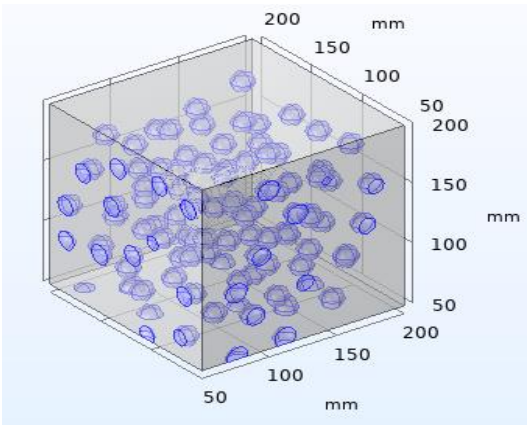
III.3 Matériaux et Méthodes

III.3.1 Description de la microstructure

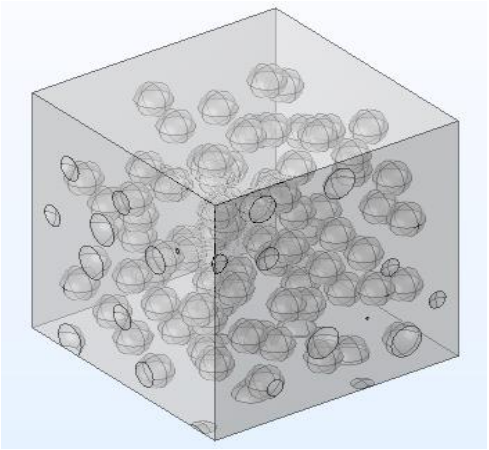
La microstructure utilisée dans ce travail est un cube constitué de 02 phases, une matrice et l'inclusion. Deux fractions volumiques différentes de matrice sont considérées 05%, 10%.

Les Volumes représentatifs pour différents fractions volumiques (05% et 10%) et pour différentes dimensions (200×200×200), (150×150×150), (100×100×100), (80× 80 ×80)

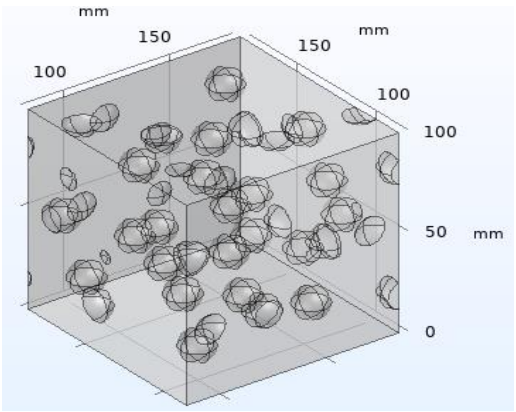
(50 ×50 × 50), (20×20×20), (10×10×10) sont comme suit :



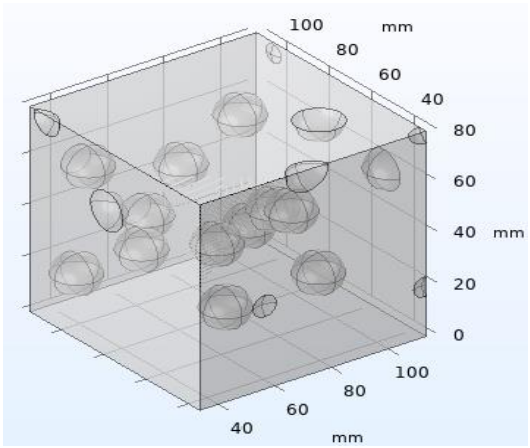
(200×200×200)



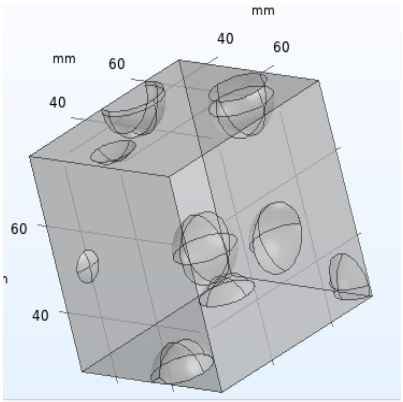
(150×150×150)



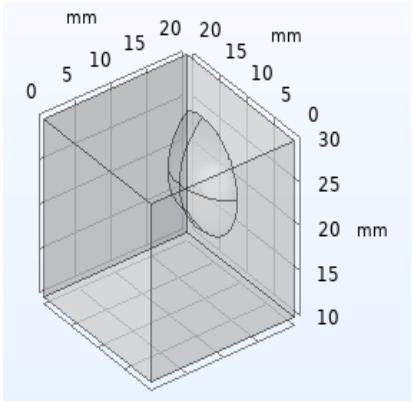
(100×100×100)



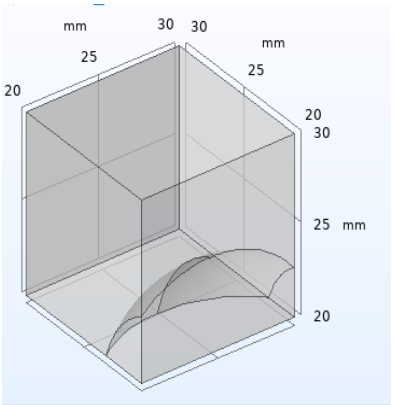
(80×80×80)



(50×50×50)



(20×20×20)



(10×10×10)

Figure III.4 Les tailles de volume de la microstructure 3D utilisé pour les fractions volumique 10% et 05%

III.3.2 Propriétés élastiques des phases

Les cellules représentent la microstructure d'un matériau poreux à étudier. Chaque phase est caractérisée par ces propriétés mécaniques (le module de Young (E) et le coefficient de Poisson (ν) qui seront utilisées dans les simulations numériques. Les propriétés élastiques du matériau étudié sont indiquées dans le Tableau suivant :

Tableau III. 1 Propriétés élastiques des composants

Constitution	E [Gpa]	ν
Matrice	74	0.3
Inclusion	12	0.26

III.4 Définition d'un maillage

Un maillage est une structure de données géométriques permettant de représenter des subdivisions d'une surface à l'aide d'un ensemble de polygones. Les maillages sont particulièrement utilisés en infographie, pour représenter des surfaces, ou en modélisation, pour discrétiser un espace continu (par exemple pour la méthode des éléments finis ou la mécanique des fluides numérique)

Dans ce travail, la représentation des modèles en 3D se fait en utilisant le script de génération des particules. Pour faire le maillage de ces modèles, on utilise le logiciel Comsol (Figure III.6).

Ce dernier est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie.

Les étapes suivre pour la modélisation de notre problème avec l'outil Comsol est les suivantes :

- Importer le modèle générer avec l'extension supporter par Comsol (extension STL).
- Ajouter une étude stationnaire.
- Ajouter un physique (Transfert de chaleur dans des solides).
- Introduire un matériau pour chaque phase.
- Ajouter un maillage pour la structure.
- Faire le calcul éléments finis (MEF).

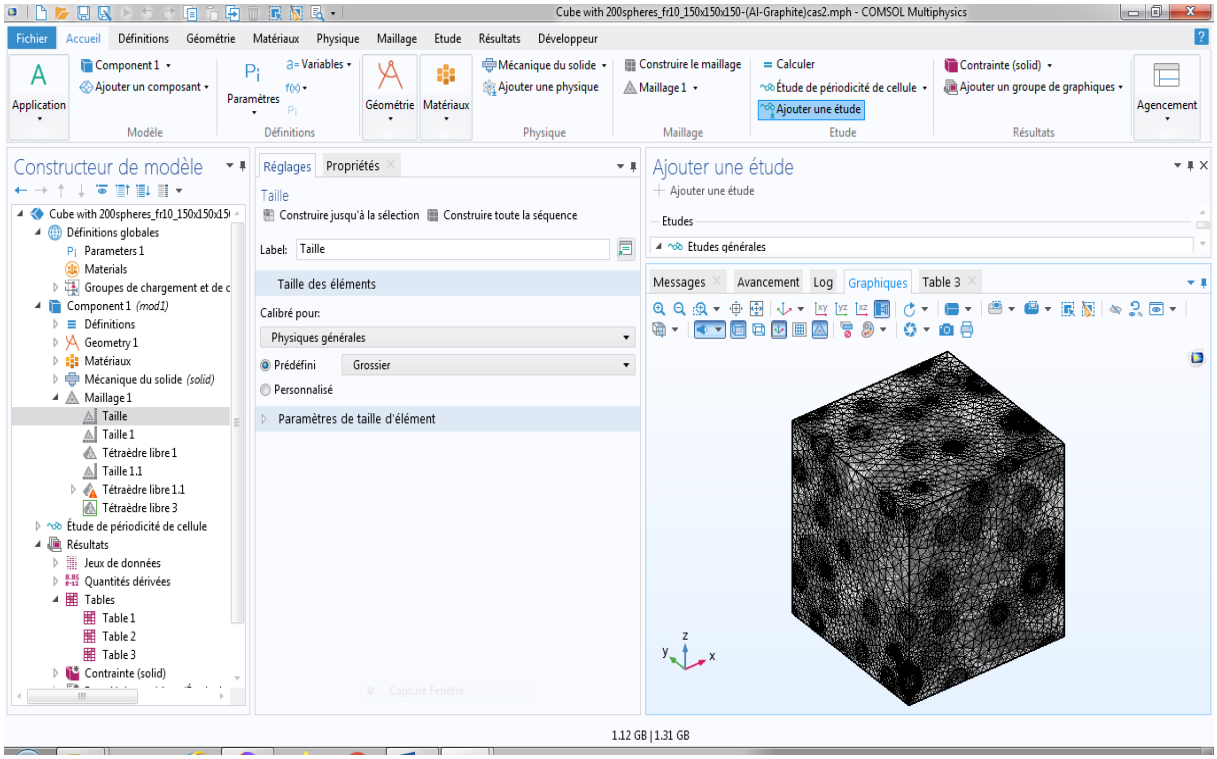
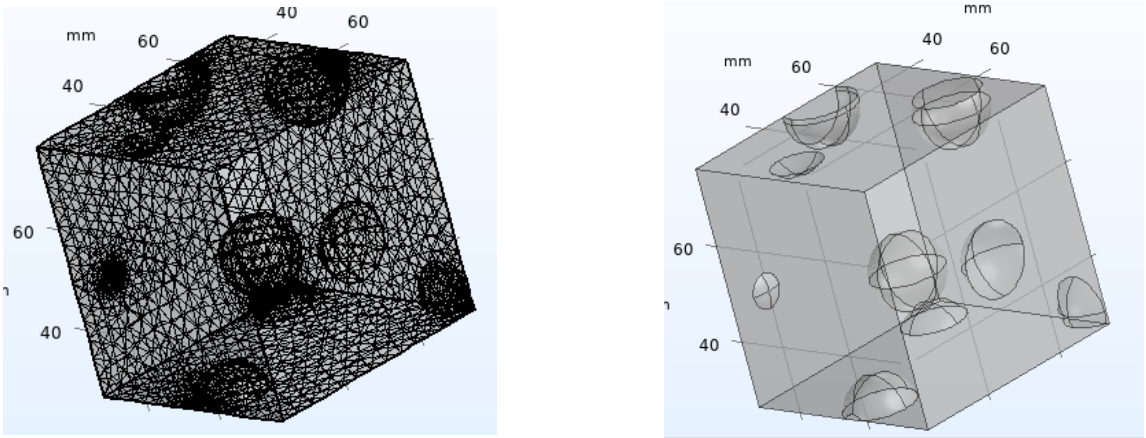


Figure III.5 Interface du logiciel Comsol

Le maillage EF associé pour chaque microstructure est obtenu à l'aide de la méthode des éléments multi phase, qui est présenté par Figure (III.7).



(a) (b)

Figure III.6 Maillage de microstructures hétérogènes :(a) maillage associé, (b) microstructure

III.5 Différentes méthodes de maillage

Il existe plusieurs types de maillage pour le cas des microstructures, parmi ces types on cite : le maillage régulier et le maillage adaptatif.

III.5.1 Maillage régulier

Il est constitué de polygones identiques et les compositions des polyèdres, donc la position des nœuds du maillage est définie implicitement par une règle de construction. Il permet notamment un gain de mémoire et de temps de calcul.

III.5.2 Maillage adaptatif

Est un maillage non-uniforme, qui évolue au cours du temps afin d'être plus fin aux endroits du domaine nécessitant d'avoir des calculs plus précis et plus grossier aux endroits nécessitant peu de précision afin de minimiser le temps de calcul.

III.6 Problématiques liées au maillage éléments finis

La modélisation des matériaux hétérogènes par des techniques numériques est basée sur la construction d'un maillage représentatif. Face à ce problème, l'approche la plus naturelle consiste à traiter en premier lieu les surfaces de la microstructure (c'est-à-dire de mailler des surfaces pour un problème tridimensionnel). Bien que de nombreux efforts aient été réalisés depuis plusieurs années dans le but de développer de nouveaux algorithmes, les temps de maillage et la mémoire demandée sont de l'ordre de plusieurs heures. Obtenir des estimations réelles avec la MEF nécessite une mémoire de RAM importante, divisée sur plusieurs processeurs.

III.7 Effet du nombre des éléments sur les valeurs du module de compressibilité k, module de cisaillement μ et module de Young E

La taille des éléments finis doit donc être adaptée si l'on souhaite obtenir une bonne précision du calcul. Une étude de vérification de nombre d'éléments en fonction des propriétés mécaniques (k, μ et E) dans le cas d'une cellule 3D ont été fait pour justifier le maillage Figure (III.8), Figure (III.9) et Figure (III.10)

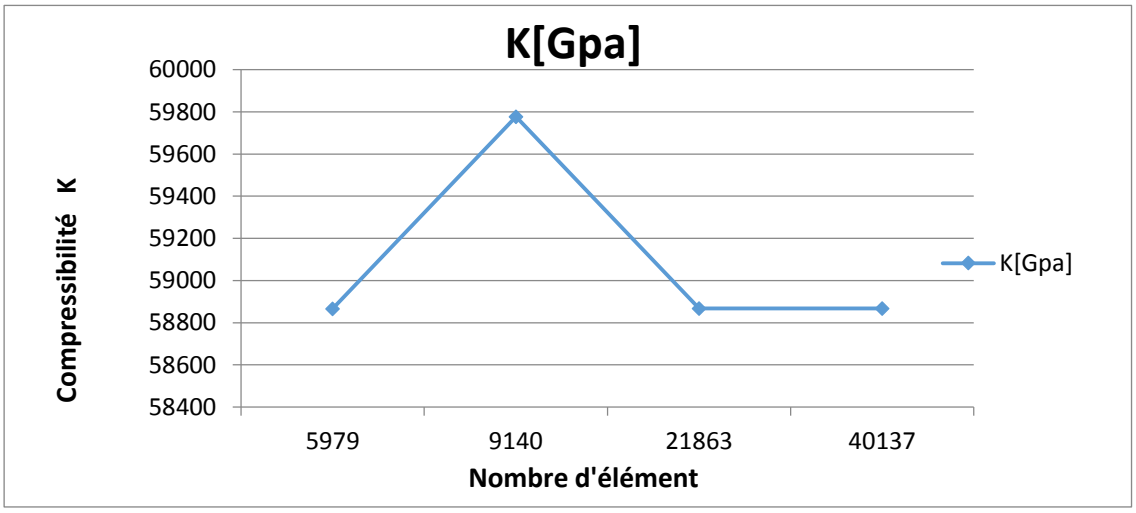


Figure III.7 module de compressibilité k en fonction de nombre d'élément.

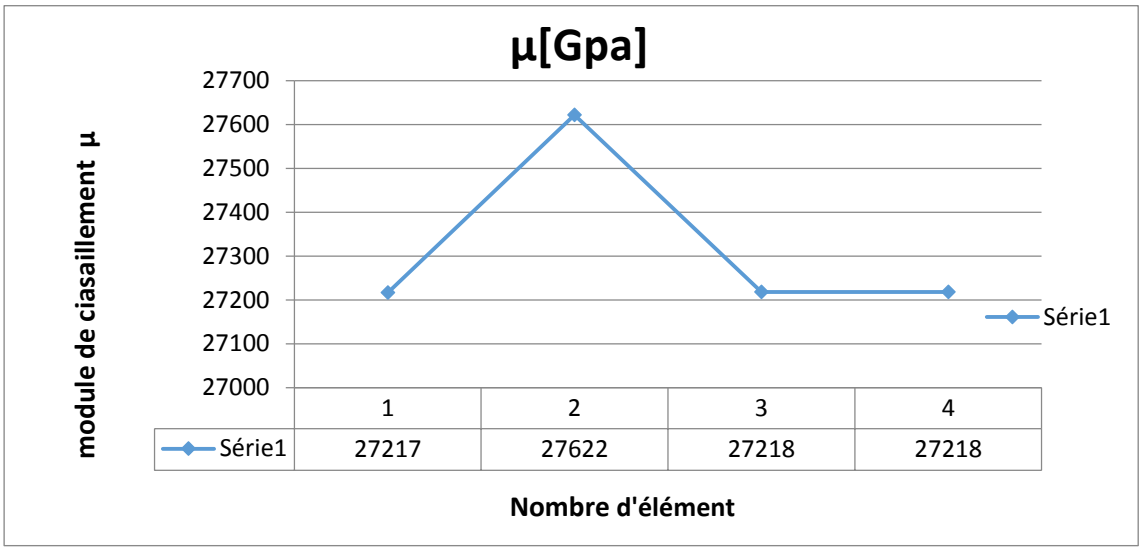
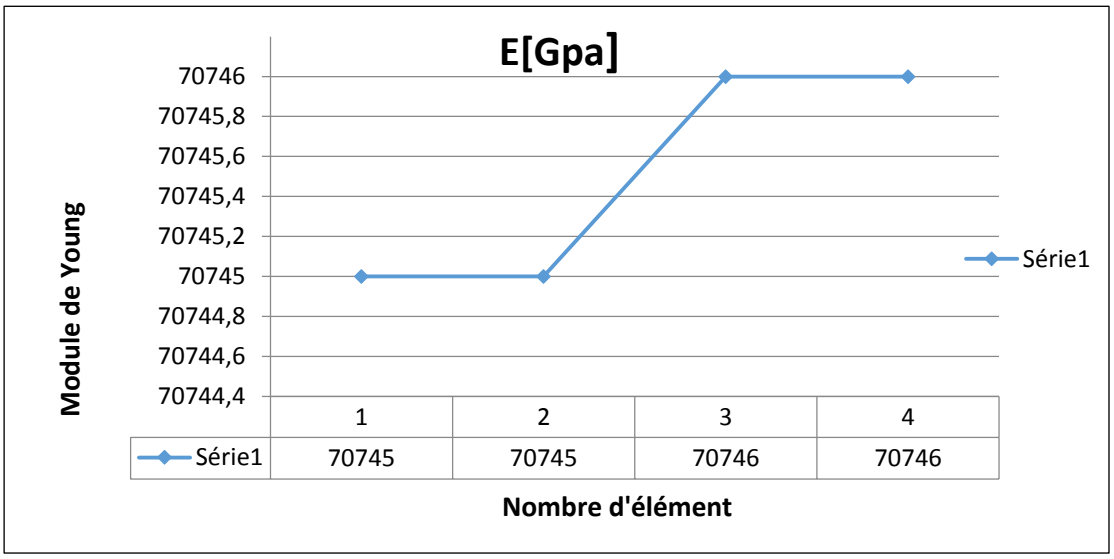


Figure III.8 module de cisaillement μ en fonction de nombre d'élément.



III.8

Figure III.9 Module de Young E en fonction de nombre d'élément.

III.8 Résultats et discussion

Dans cette partie, et pour la détermination du module de compressibilité et du module de cisaillement de tous les volumes représentatifs du matériau composite étudié, on a utilisé le logiciel de simulation numérique « Comsol multi physique ». Les résultats d'étude pour les deux fractions volumiques sont représentés dans les figures suivantes.

III.8.1 Fraction volumique 5%

Les graphes suivants représentent les résultats numériques des propriétés élastiques obtenues à partir de notre simulation dans le cas de fraction volumique 5%. Les résultats sont comparés aux bornes supérieur Hashin-Shtrikman hs+ et Voigt, déduit analytiquement en utilisant les résultats moyens de tous les volumes étudiés de module de compressibilité k, le module de cisaillement μ et module de Young E.

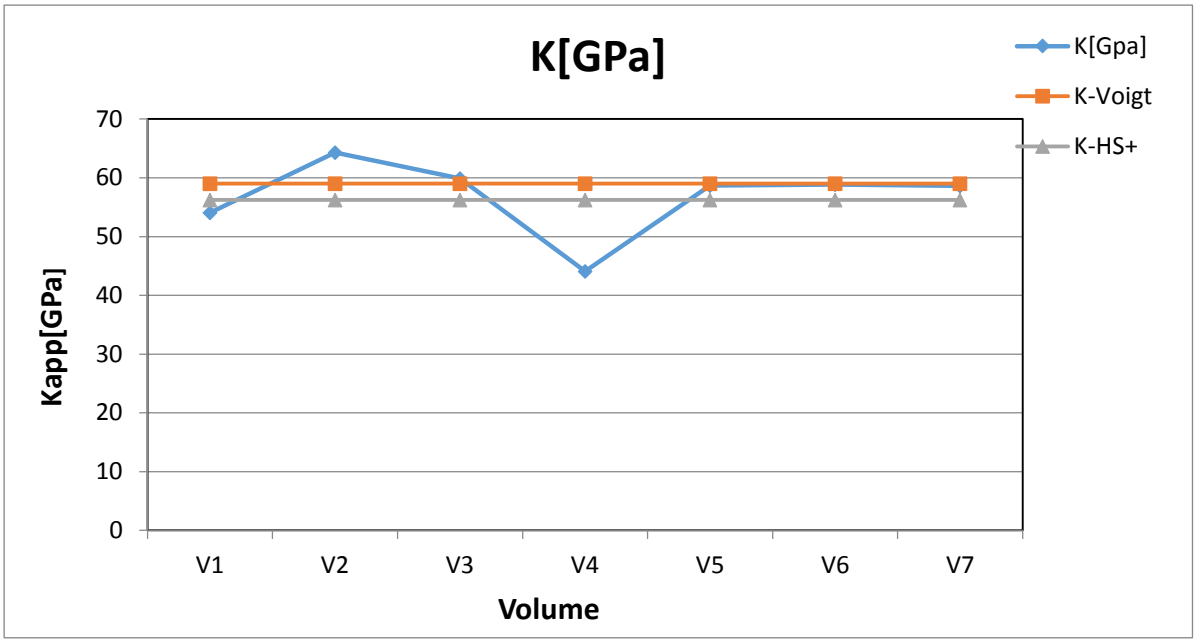


Figure III.10 Courbes de convergence de module de compressibilité apparent kapp en fonction de la taille du domaine V. Fr05%

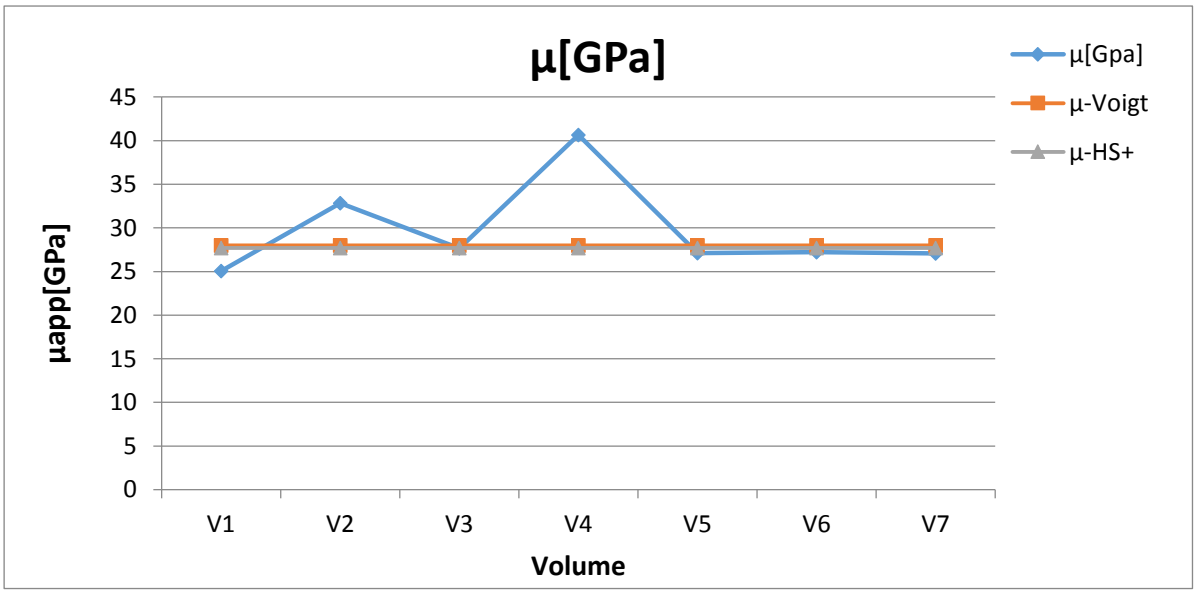


Figure III.11 Courbes de convergence de module de cisaillement apparent μapp en fonction de la taille du domaine V. Fr05%

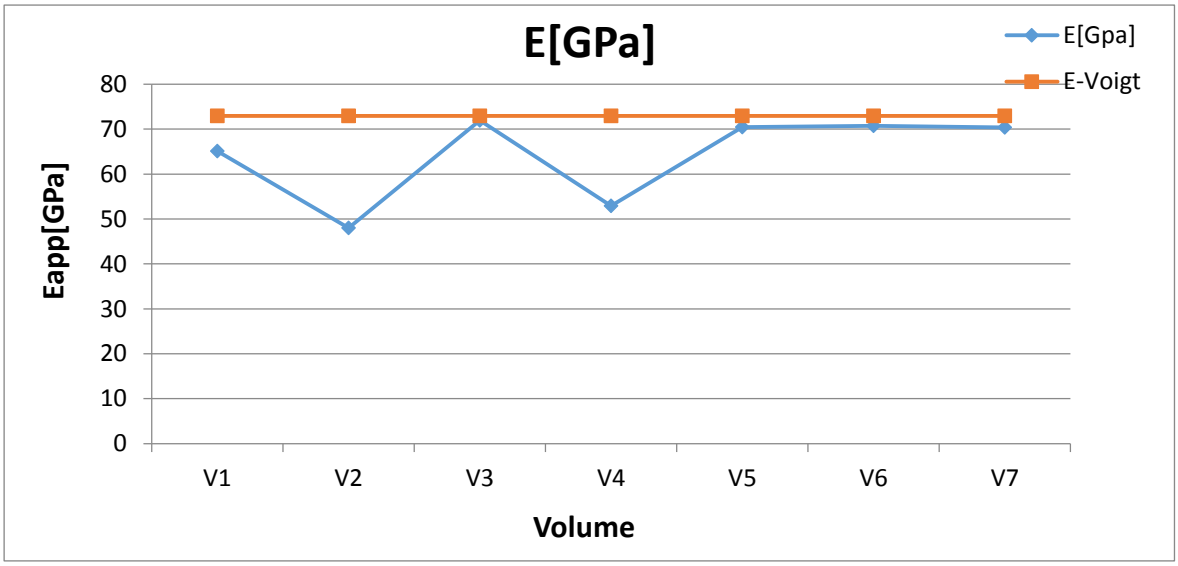


Figure III.12 Courbes de convergence de module de Young en fonction de la taille du domaine V. Fr05%

III.8.2 Fraction volumique 10%

Les graphes suivants représentent les résultats numériques des propriétés élastiques obtenues à partir de notre simulation dans le cas de fraction volumique 10%. Les résultats sont comparés aux bornes supérieur Hashin- Shtrikman hs+ et Voigt, déduit analytiquement en utilisant les résultats moyens de tous les volumes étudiés de module de compressibilité k, le module de cisaillement μ et le module de Young E.

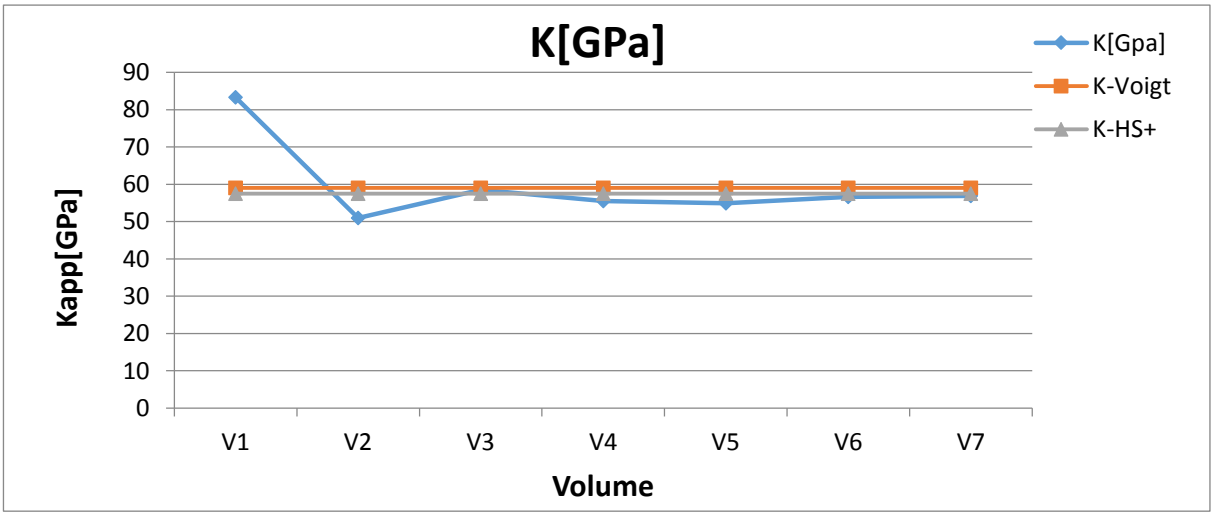


Figure III.13 Courbes de convergence de module de compressibilité apparent kapp en fonction de la taille du domaine V. Fr10%

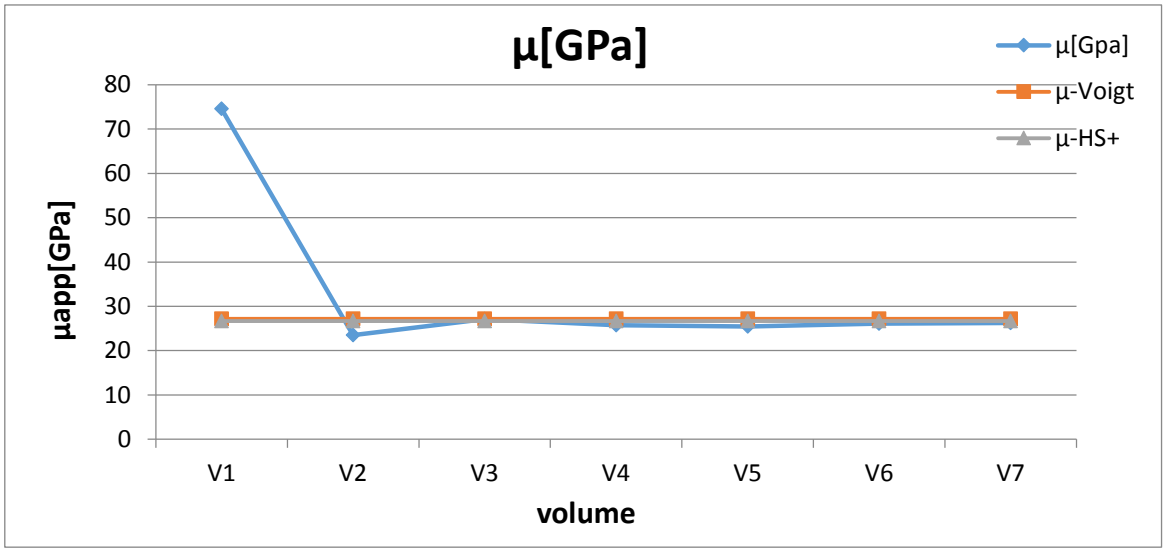


Figure III.14 Courbes de convergence de module de cisaillement apparent µapp en fonction de la taille du domaine V. Fr10%

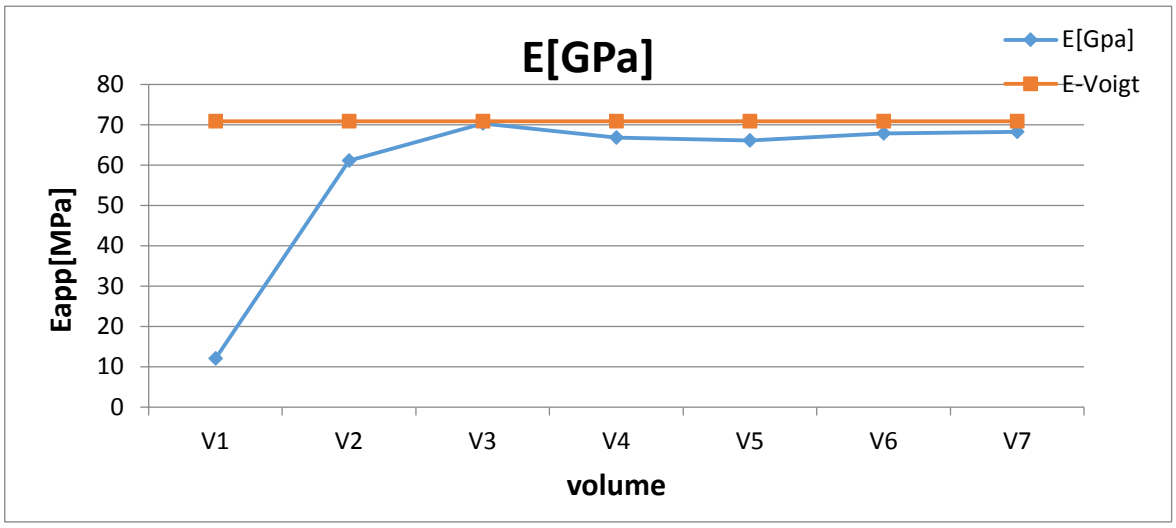


Figure III.15 Courbes de convergence de module de Young en fonction de la taille domaine V. Fr10%

III.9 Effet de la fraction volumique sur les propriétés élastiques

Afin d'étudier l'effet de la fraction volumique sur le module de compressibilité K, le module de cisaillement µ et le module de Young E, différentes fractions volumiques ont été prises (05% et 10%).

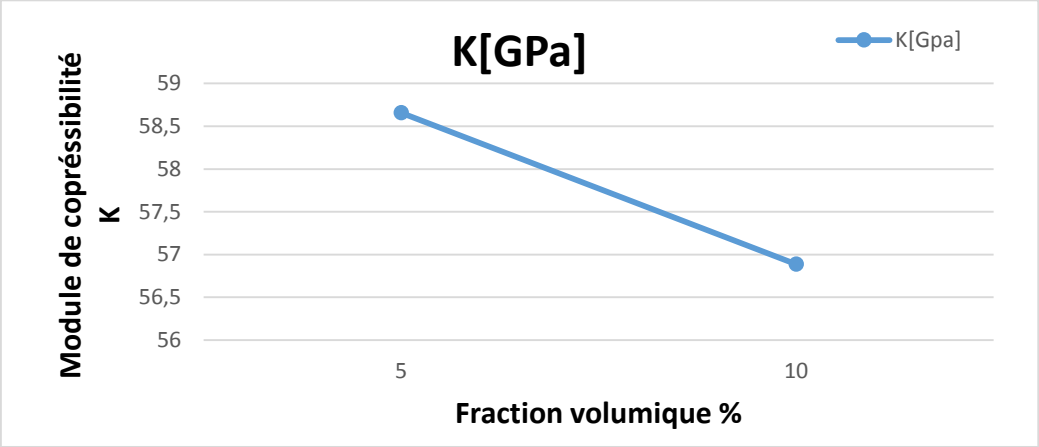


Figure III.16 Effet de la fraction volumique sur le module de compressibilité K.

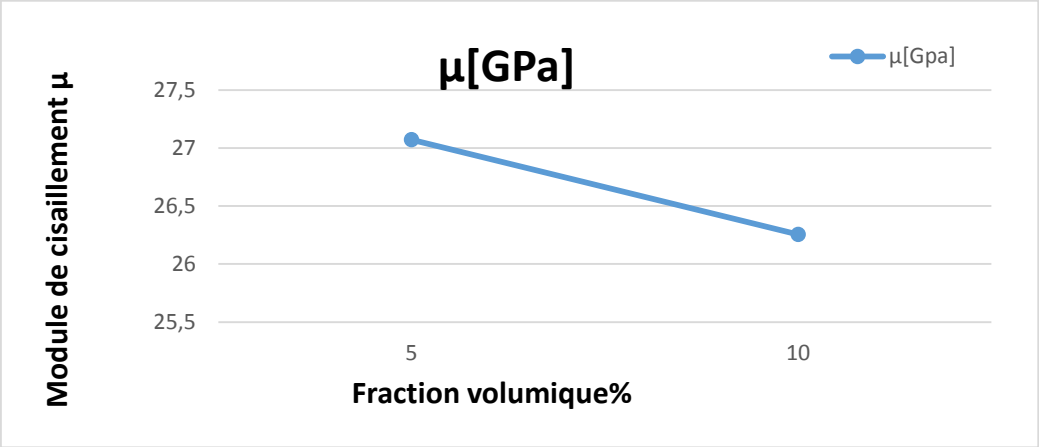


Figure III.17 Effet de la fraction volumique sur le module de cisaillement μ

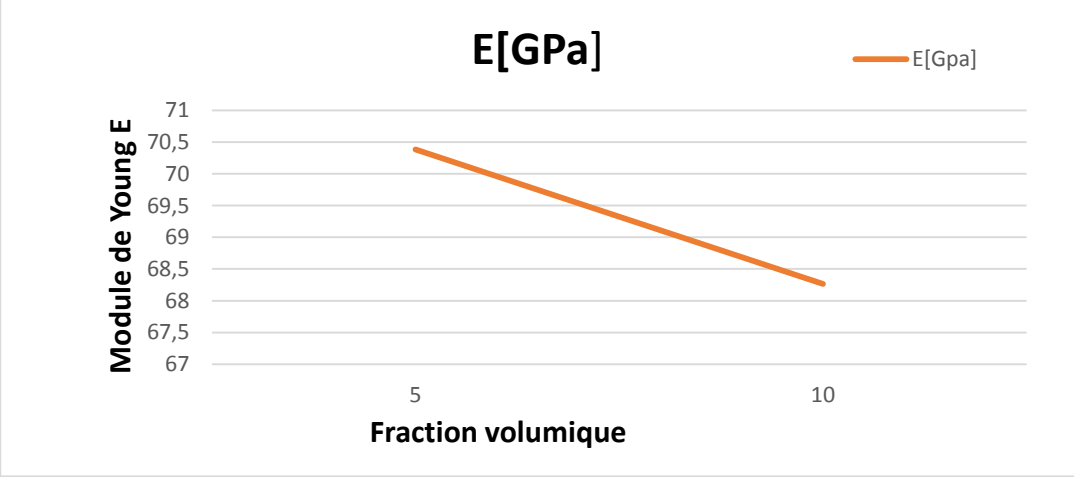


Figure III.18 Effet de la fraction volumique sur le module de Young E

III.10 Discussion des courbes

Les courbes des figures (III.8) (III.9) et (III.10) représentent les changements des 03 propriétés : compressibilité k, module de cisaillement μ et module de Young E, par rapport au nombre d'éléments. On remarque que les trois courbes sont stables à partir de troisième point, on dit qu'à partir de nombre d'élément numéro 03 les résultats sont convergés.

Les courbes des figures (III.11), (III.12), (III.13), (III.14), (III.15) et (III.16) représente les changements des trois propriétés (K, μ et E) en fonction des volumes en fraction volumique 05% et 10%, en l'ai comparant au bornes de Voigt et Hashine-Shtrikman hs+. La convergence est à partir de point V5 en fraction volumique 5% et à partir de V6 en fraction volumique 10%.

Les courbes des figure (III.17), (III.18) et (III.19) représente les changements de (K, μ et E) par rapport aux fractions volumiques 05% et 10%, on remarque que ces propriétés diminuent par rapport à l'augmentation des fractions volumique.

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre on a défini les étapes que nous avons suivis pour la simulation numérique du comportement élastique d'un matériau composite à 2 phases, en commençant par la première étape qu'est la génération des particules en 3D dans un volume cubique, ensuite on a décrit la microstructure utilisée et les propriétés élastique de chaque phase.

Ensuite on a représenté le maillage comme une opération obligatoire dans la simulation numérique.

La dernière étape est consacrée pour une étude sur le comportement élastique d'un matériau composite à 2 phases avec deux fraction volumiques (5% et 10%) est menée, le but est de déterminer les propriétés élastiques apparentes de ce matériau. Cette étude est basée sur la simulation à l'aide de logiciel Comsol, Les résultats obtenus sont comparés avec la borne supérieure de Hashin-Strikman (HS+) et le modèle autocohéren.

Chapitre III Comportement élastique d'un matériau hétérogène à 02 phases

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce thème était une étude de comportement élastique d'un matériau hétérogène à 2 phases dans le cas de 3 dimensions.

Premièrement, nous avons décrit une généralité sur les matériaux composites et particulièrement les matériaux choisi L'aluminium A2017 et le graphite. Ensuite on a défini l'étude bibliographique sur la micromécanique, cette dernière a mis en évidence la variation des propriétés élastique en fonction de taille de maillage ainsi l'intérêt d'une détermination rigoureuse de la taille du volume élémentaire représentatif (VER) d'une microstructure, celle-ci doit tenir compte de plusieurs paramètres comme : le nombre de phase, la fraction volumique, le type de la propriété et la morphologie des particules.

Ainsi que cette étude présente l'intérêt de l'utilisation des scripts de génération des structures aléatoires de particules avec des tailles du volume élémentaire représentatif (VER) variables, celle-ci doit tenir compte de plusieurs paramètres.

Finalement, nous avons touché la génération des particules en 3D dans un volume cubique, aussi nous avons déterminé la variation des propriétés élastiques apparentes du matériau composite. L'évaluation de ces propriétés est basée sur l'utilisation des approches numériques (logiciel Comsol). L'ensemble des résultats numériques obtenus ont été validés par les approches analytiques et statistiques (bornes de Voigt, borne de Reuss).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] : ean-M Berthelot mécanique et analyse des structure 5°édition 2012 Lavoisier Paris IB**J**BN : 978-2-7430-14507

[2] : Nadia bahlouli « Cours Matériaux composites /DESS Mécanique avancée et stratégie industrielle » IOST-ULP

[3] : A. BOUDENNE, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo physiques d'matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003.

[4] : CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006

[5] : JoelCugnoni, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005

[6] : L. Berreur, B. d. Maillard, and S. Nösperger, "L'industrie française des matériaux.

[7] : GURIT, « Guide to Composites, » 1 Janvier 2013.

[8] :https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/mineraux/mineraux-proprietes-graphite.jsp?fbclid=IwAR1pBIJBk-asPUDaMwyz0fhFthlsmmTjPUdqgQ5pZ3F4G8JhxX9Rb5Q9I2k

[9] : H. Leiris, METEAUX ET ALLIAGES AUTRES QUE LES ACIERS ET LES FONTS, Tome II, Masson et c Éditeurs. Pp.71-92-1971 ie

[10] : Michel Dequatremare et Thierry Devers, PRECIS DES ALLUMINIUM.

[11] : Métaux détail service, PROPRIETER PHYSIQUE DES MATERIAU, 2012, paris DUNOD.

[12] : Glossaire des Matériaux Composites. Centre d'Animation Régional en Matériau Actives CARMA

[13] : Dormieux, L., Kondo, D., & Ulm, F.-J. 2006. "Microporomechanics". John Wiley & Sons.

Référence bibliographique

[14] : Eshelby, J.D. 1957. "The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems." In Proc. R. Soc. Lond. A : The Royal Society, 376-396.

[15] : Ding, Y., 2012. Analyse morphologique de la microstructure 3D de réfractaires électrofondus à très haute teneur en zircone : relations avec les propriétés mécaniques, chimiques et le comportement pendant la transformation quadratique monocli-nique. Rapport de thèse.

Musielak, M., Marcoux, M., Quintard, M., 2013. Détermination des paramètres de transfert du TCE à travers le béton. Journées techniques.

[16] : I. Gitman, H. Askes, L. Sluys, 2007. Representative volume: Existence and size determination. Engineering fracture mechanics 74, 2518–2534.

- Aboudi, J., 1991. A unified micromechanical approach, mechanics of composite materials. Elsevier.

- Buryachenko, V., 2006. Micromechanics of heterogeneous materials. Springer. - Hashin, Z., Shtrikman, S., 1963. A variational approach to the theory of the elastic behavior of multiphase materials. J. Mech. Phys. Solids 11, 127–140. Zaoui, A., 1999. Matériaux hétérogènes et composites. Ecole Polytechnique, Paris.

- Minshnaevsky Jr, L. L., 2004. Three-dimensional numerical testing of microstruc-tures of particle reinforced composites. Acta Mater. 52, 4177–4188.

-Kanit, T., N'Guyen, F., Forest, S., Jeulin, D., Reed, M., Singleton, S., 2006. Apparent and effective physical properties of heterogeneous materials : Représentativité of semples of twa materials from food industry. Comput. Meth. Appl. Mech. Engng. 195, 3960–3982.

- Jean, A., 2009. Etude d'un élastomère chargé, de la nanostructure au macrocomportement. Thèse de doctorat.

- Altendorf, H., 2011. 3D morphological analysis and modelling of random fiber net-works. Rapport de thèse.

- Willot, F., Jeulin, D., 2009. Elastic behavior of composites containing boolean ran-dom sets of inhomogeneities. Int. J. Eng. Sci. 47, 313–324.

Référence bibliographique

-Michel, J. C., Moulinec, H., Suquet, P., 1999. Effective properties of composite ma-terials with periodic microstructure : A computational approach. Comput. Meth. Appl. Mech. Engng. 172, 109–143.

[17] : Détermination du volume élémentaire représentatif (VER) et les propriétés macroscopiques d'un matériau hétérogène à microstructure aléatoire.

Résumé

Résumé

Le matériau composite est constitué d'un moins de deux matériaux de nature déférente, des renforts prenant généralement la forme des fibres ou des particules et d'une matrice dans laquelle sont noyés les renforts. La microstructure est décrite dans le cadre de la mécanique par 03 échelles, l'échelle macroscopique, l'échelle mésoscopique et l'échelle microscopique .on peut remplacer le matériau hétérogène par un milieu homogène qui a les mêmes propriétés effectives par la technique d'homogénéisation, la taille de verre et la fraction volumique ont une influence sur les propriétés effectives. Pour générer un modèle 3D les particules doivent être de même taille, elles ne doivent pas chevaucher entre elle et ne doivent pas touché les parois de la cellule.