

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 : Construction mécanique

Par :

BELAID Kamal

OUAZENE Said

Thème

Détermination des propriétés effectives d'un matériau hétérogène à deux phases

Soutenu le 06 /10/2021 devant le jury composé de :

Mr.	BELAMRI	ABDELATIF	Président
Mlle.	ADJOUADI	NOURA	Examinatrice
Mr.	BOUTAANI	MOUHAMED SAID	Encadreur

Année Universitaire 2020-2021

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Populaire et Démocratique Algérienne République

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur

Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 933 du 28 juillet 2016(*) fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom :

Prénom :

Matricule :

Spécialité et/ou Option :

Département :

Faculté :

Année universitaire :/.....

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) :

Intitulé:

.....

.....

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le

...../...../.....

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

.....

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes règlementaires)

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour l'aide et l'encadrement de Mr BOUTAANI MOUHAMED SAID, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciement s'adresse également à tout nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges professionnelles.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à
Mes chers parents ma mère et mon père
Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs
Encouragements.
A mes frères.
A mes amis et mes camarades.
Sans oublié tous les professeurs que ce soit du
primaire,
Du moyen, du secondaire ou de l'enseignement
supérieur.*

KAMAL

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à
A mes chers parents ma mère et mon père
Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs
Encouragements.
A mes frères.
A mes amis et mes camarades.
Sans oublié tous les professeurs que ce soit du
primaire,
Du moyen, du secondaire ou de l'enseignement
supérieur.*

OUAZENE SAID

Sommaire

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Dédicaces	iii
Sommaire	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
NOMENCLATURE	viii
Introduction Générale.....	1
Généralités sur les matériaux composites	2
I.1. Introduction	2
I.2. Définition des matériaux composites	2
I.3 Constituant des matériaux composites.....	3
I.3.1 Matrice	4
I.3.2 Renfort	4
I.4 Différents types de matériaux composites	5
I.4.1 Matériaux composites de grande diffusion	5
I.4.2 Matériaux composites de haute performance	6
I.4.3 Domaine d'application.....	6
I.4.4 Avantages et inconvénients des matériaux composites	7
a. Avantages des matériaux composites.....	7
I.5 Généralités sur les techniques d'homogénéisation	10
I.6 Notions de volume élémentaire représentatif (VER) dans un matériau hétérogène	11
I.7 Conclusion	12
Génération de microstructure 3D	14
II.1 Introduction	14
II.2 Générations des particules en 3D dans un volume cubique	14
II.3 Homogénéisation numérique	17
II.4 Outils et méthodologie.....	17
II.4.1 Maillage et densité du maillage	17

II.4.2 Condition aux limites thermiques	17
II.4.2.1 Condition aux limites périodiques	18
II.5 Conductivité des matériaux hétérogènes	18
II.5.1 Génération des échantillons numériques du milieu hétérogène	18
II.6 Maillage des microstructures	20
II.7 Les calculs numériques mécanique/thermique	21
II.8 Conclusion	21
Homogénéisation en conductivité thermique.....	24
III.1 Introduction	24
III.1.2 Diffusion thermique	24
III.1.3 Modèle d'homogénéisation	25
III.1.3.1 Modèle de Maxwell.....	25
III.1.3.2 Modèle de Russell	26
III.2 Simulation avec le logiciel Eléments finis.....	26
III.2.1 Présentation de la géométrie	26
III.2.2 Maillage.....	26
III.2.3 Génération de bloc	27
III.3 Calcul de la conductivité thermique numérique.....	28
III.3.1 Pour une fraction volumique de 5%	28
• Cas $h=5.r$	28
• Cas $h=10.r$	29
III.3.2 Pour une fraction volumique de 10%	30
• Cas $h=5.r$	30
• Cas $h=10.r$	31
III.4 Comparaison de la conductivité thermique calculé analytiquement et numériquement pour les deux fractions de volume.....	32
III.4.1 Pour la fraction volumique de 5%	32
III.4.2 Pour la fraction volumique de 10%	35
III.4.3 Discussion des résultats.....	37
III.5 Conclusion.....	37
Conclusion Générale	38
Références Bibliographiques.....	39

Liste des figures

Figure I-1 : Schématisation des renforts noyés	3
Figure I-2 : Matériaux composites	4
Figure I-3 : Principaux matériaux de renforts	5
Figure I-4 : Principe de l'approche d'homogénéisation des matériaux hétérogènes.....	10
Figure I-5 : Approche et principe de l'homogénéisation numérique.....	11
Figure I-6 : Exemple de VER d'une microstructure hétérogène.....	12
Figure II-7 : Génération des particules en 3D dans un volume cubique	14
Figure II-8 : Propriétés géométrique de la cellule cubique	15
Figure II-9 : Définition de la géométrie et du paramétrage des particules.....	16
Figure II-10 : Organigramme de Poisson	19
Figure II-11: Maillage de la microstructure	20
Figure III-12 : Modélisation du modèle étudié en 3D.....	26
Figure III-13: Modèle maillé.....	27
Figure III-14 : Génération de bloc.....	27
Figure III-15 : Conductivité thermique du solide composite	28
Figure III-16 : Courbe représentative de la conductivité thermique pour les différents volumes	29
Figure III-17 : Courbe représentative de la conductivité thermique pour les différents volumes	30
Figure III-18 : courbe représentative de la conductivité thermique pour les différents volumes	31
Figure III-19 : courbe représentative de la conductivité thermique pour les différents volumes	32
Figure III-20 : Comparaison de λ_{num} , λ_{Max} , λ_{Rus}	33
Figure III-21 : Comparaison de λ_{num} , λ_{Max} , λ_{Rus}	34
Figure III-22 : Comparaison de λ_{num} , λ_{Max} , λ_{Rus}	35
Figure III-23 : Comparaison de λ_{num} , λ_{Max} , λ_{Rus}	36

Liste des tableaux

Tableau 1 : Conductivité thermique numérique pour $h=5.r$	28
Tableau 2 : Conductivité thermique numérique pour $h=5.r$	29
Tableau 3 : Conductivité thermique numérique pour $h=5.r$	30
Tableau 4 : Conductivité thermique numérique pour $h=5.r$	31
Tableau 5 : valeur de $\lambda_{num}, \lambda_{Max}, \lambda_{Rus}$	33
Tableau 6 : valeur de $\lambda_{num}, \lambda_{Max}, \lambda_{Rus}$	34
Tableau 7 : valeur de $\lambda_{num}, \lambda_{Max}, \lambda_{Rus}$	35
Tableau 8 : valeur de $\lambda_{num}, \lambda_{Max}, \lambda_{Rus}$	36

NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité (SI)
D	: la distance entre les deux centres des particules	m
q	: le vecteur de flux de chaleur	W .m ⁻²
λ	: La conductivité thermique	W. m ⁻¹ .K ⁻¹
∇T	: Gradient de température	K
D	: La diffusivité thermique	m ² .S ⁻¹
ρ	: La masse volumique	Kg. m ⁻³
C_p	:La capacité calorifique a pression constant	J .K ⁻¹
λ_c	: Conductivité thermique des particule	W. m ⁻¹ .K ⁻¹
λ_m	: Conductivité thermique de la matrice	W. m ⁻¹ .K ⁻¹
λ_{eff}	: Conductivité du milieu effectif	W. m ⁻¹ .K ⁻¹
λ_f	: La conductivité thermique des particule	W. m ⁻¹ .K ⁻¹
φ	: La fraction volumique des particules	%

Abréviations

VE	: Volume élémentaire
UV	:Ultra violet
EF	:Eléments finis
VER	:Volume élémentaire représentative
RSA	: Randon séquentiel adsorption

Introduction Générale

Introduction Générale

Un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de nature différente, Ils se complètent et permettent d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément ». Un matériau composite est constitué est appelée d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase continue et appelée la matrice. La phase discontinue présent usuellement des propriétés mécaniques (rigidités et résistances) supérieures à celle de la matrice et est notée renfort. Les propriétés des matériaux composites résultent des propriétés des matériaux le constituant de la distribution géométrique des renforts du taux volumique de renfort, de la nature des interfaces renfort de la matrice, du procédé de fabrication

Dans le premier chapitre nous parlerons sur les généralités et techniques d'homogénéisations des matériaux composites.

Dans le deuxième chapitre nous discuterons sur des généralités des microstructures aléatoires 3D dont les particules dans un volume cubique, la conductivité thermique des matériaux hétérogènes.

Enfin en troisième chapitre nous avons présenté le logiciel de simulation EF, les simulations et résultats obtenu numériquement, dont la fiabilité est démontrée analytiquement par les deux méthodes (maxwell, Russell) que nous avons effectué sur ce dernier.

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites

Généralités sur les matériaux composites

I.1. Introduction

Les matériaux composites sont des matériaux à très hautes performances mécaniques, Ils peuvent être façonnés à volonté au gré du concepteur, de manière à obtenir des propriétés souhaitées en faisant un choix approprié des constituants. Ainsi, la possibilité de façonner à la carte les matériaux composites modifie considérablement l'approche conventionnelle du dimensionnement des structures habituellement utilisées pour les matériaux traditionnels.

Les matériaux composites se développent aujourd'hui pratiquement tous les domaines et sont l'origine des formidables challenges dans diverses réalisations de hautes technologies.

Le développement de l'utilisation des matériaux composites dans les structures nécessite de mettre en place les outils nécessaires à la modalisation de comportement mécanique des matériaux composites et à l'analyse des structures stratifiées au sandwich.

I.2. Définition des matériaux composites

Un matériau composite peut être défini comme une combinaison d'au moins deux matériaux différents, à l'échelle macroscopique ou plusieurs matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion), l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les renforts qui sont noyés dans une *matrice* dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible (figure I-1). La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont très *hétérogènes* et *anisotropes*.

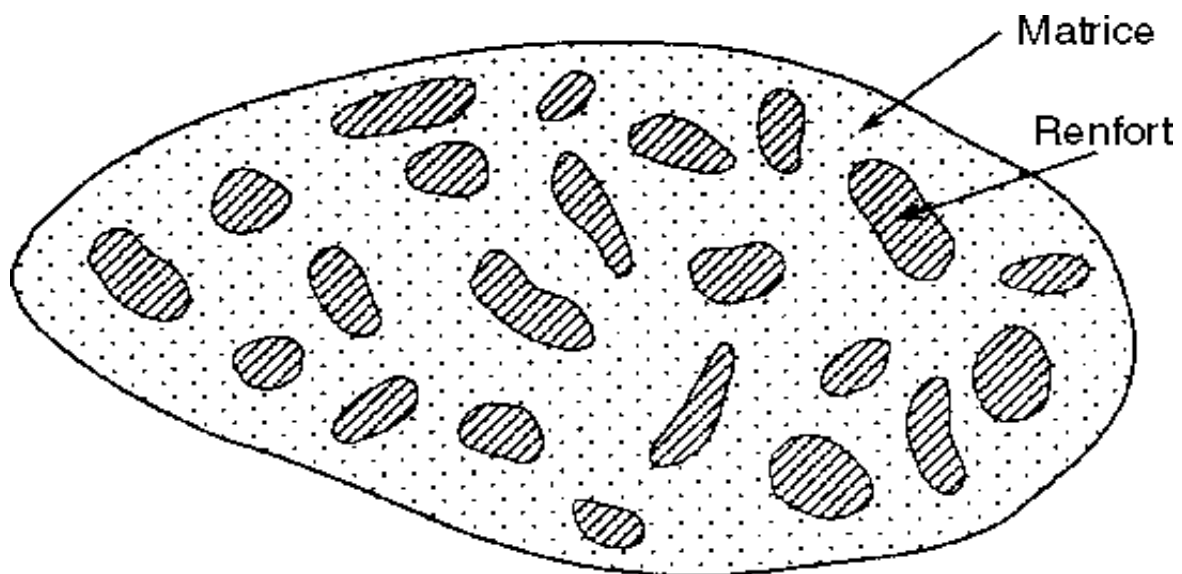


Figure I-1 : Schématisation des renforts noyés[1]

Il faut différencier charges et renforts. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, Contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

I.3 Constituant des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites, des charges
- D'un renfort
- D'une interface.

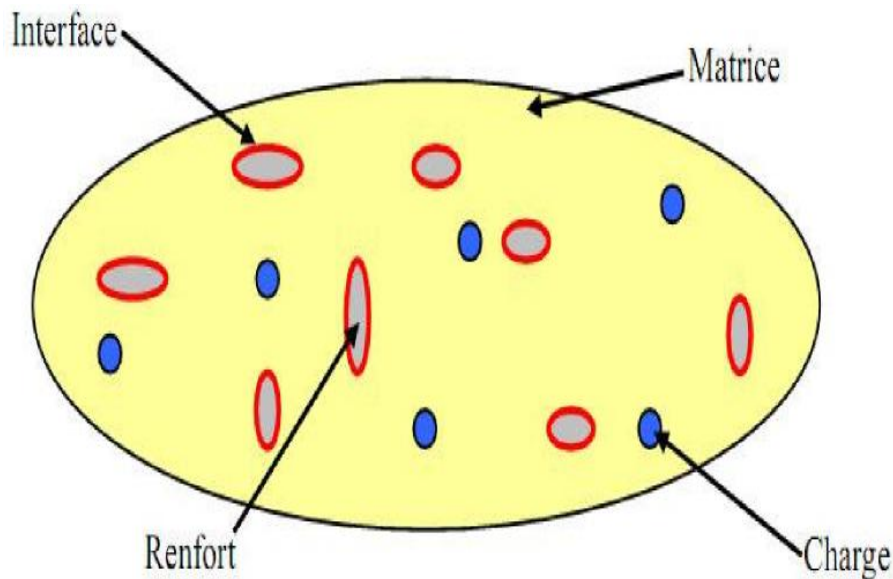


Figure I-2 : Matériaux composites [2]

I.3.1 Matrice

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion), et elle assure la protection contre les éléments extérieurs. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique, comme elle peut être elle-même une déjà une matrice comme le béton.

En plus de ces deux constituants de base, il existe : une interface qui assure la compatibilité renfort-matrice, qui transmettant les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Des produits chimiques entrent aussi dans la composition du composite, l'interphase etc. ...

Qui peuvent jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite [3].

I.3.2 Renfort

Ils peuvent se présenter sous de nombreuses formes : fibres courtes ou fibres continues (tissus ou textures multidirectionnelles) en fonction de l'application envisagée. Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance à la compression faible. Les composites artificiels sont souvent renforcés soit par des fibres, soit par des composants fabriqués à base de fibres (assemblage de fibres tordues ensemble ; tissus ; mats, ou nappes). Chacune d'entre elles s'impose dans une application particulière en raison de ses propriétés spécifiques et de son prix [3].

Les principaux matériaux de renforts, sont résumés dans l'organigramme suivant :

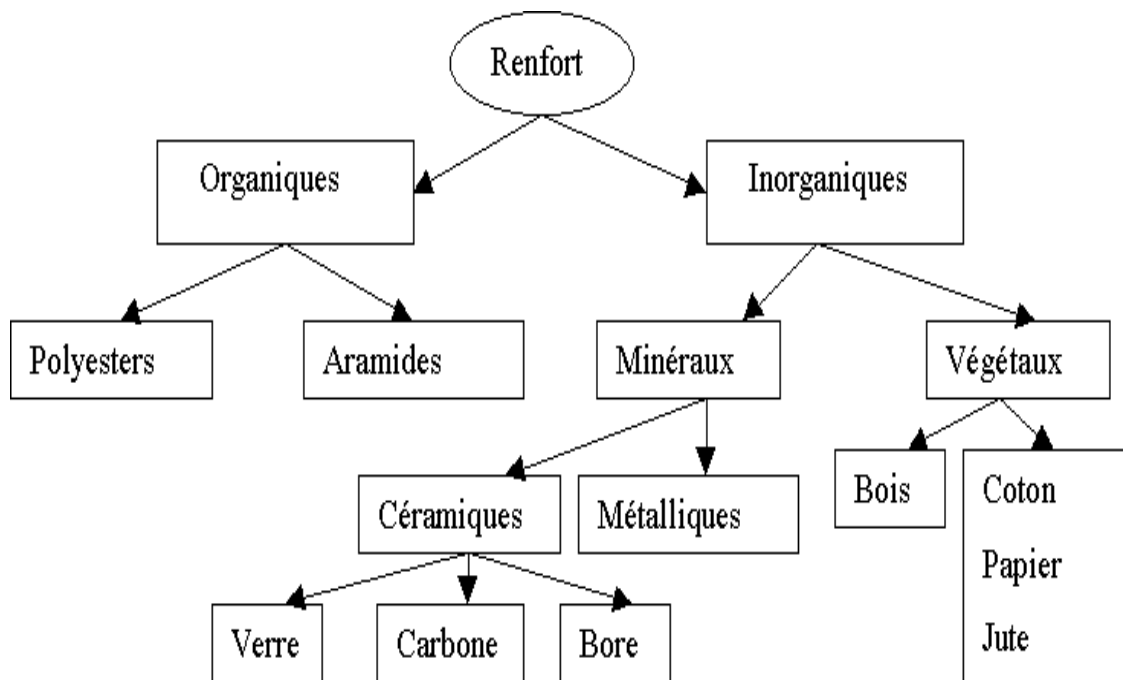


Figure I-3 : Principaux matériaux de renforts [3]

I.4 Différents types de matériaux composites

On distingue deux types de composites : les composites de grandes diffusions et les Composites hautes performances.

I.4.1 Matériaux composites de grande diffusion

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : Optimisation des coûts par diminution des prix de revient, leur composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration du matériau (moulage par contact, injection).

I.4.2 Matériaux composites de haute performance

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.

Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes [4] :

- Drapage autoclave, enroulement filamentaire.
- Beaucoup de procédés encore manuelle

I.4.3 Domaine d'application

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en terme de caractéristiques spécifique en font des matériaux attrayants pour l'utilisation des structures.

En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer.

Leurs domaines d'application sont :

- Électricité et électronique,
- Bâtiment et travaux publics,
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- Santé (instrumentation médicale),
- Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf, aviron...).

Ainsi on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial.

I.4.4 Avantages et inconvénients des matériaux composites

a. Avantages des matériaux composites

- **Facilité de mise en forme :**

Le matériau durcit et prend un aspect de surface définitif alors qu'il est positionné sur le moule.

Il est ainsi possible de réaliser en une seule opération des formes qui auraient nécessité plusieurs étapes en utilisant d'autres matériaux (exemple : découpe, formage, soudure, polissage pour des tôles métalliques). La réalisation de pièces par moulage au contact nécessite un matériel d'application peu onéreux.

La réalisation des moules pour ce procédé est également simple et permet donc une grande liberté dans la création des formes qui est notamment mise en œuvre dans les applications liées à la carrosserie (voitures, camions, bateaux, ferroviaire, ...) [4].

- **Légèreté :**

Pour des propriétés mécaniques équivalentes, l'utilisation de matériau composite à la place de métaux permet un gain de poids de près de 50 %. Cette propriété est notamment mise à profit dans le secteur automobile.

- **Adaptabilité :**

Les caractéristiques mécaniques du composite peuvent être ajustées en jouant globalement sur le taux de fibres mais aussi localement en adaptant la quantité et le positionnement des fibres dans des zones soumises à de plus fortes contraintes mécaniques.

- **Isolation électrique et thermique :**

Le bon Niveau de dissolution que procurent les matériaux composites pourrait conduire à une utilisation plus importante dans le bâtiment. Toutefois, leur emploi massif est freiné à cause des couts élevé par rapport aux matériaux de construction traditionnels.

b. Inconvénients

Les composites présentent également quelques inconvénients qui limitent leurs applications [4] :

- La tenue en température et au feu est limitée.
- Les résines dégagent des vapeurs de solvant notamment en phase de fabrication,
- La fin de vie de matériaux composés d'un mélange quasi indissociable de résine organique et de fibres de verre pose des problèmes de recyclage. Il faut noter par ailleurs que les résines courantes sont fabriquées à partir de dérivés du pétrole et consomment donc une matière non renouvelable,
- Les caractéristiques mécaniques dépendent du positionnement des fibres et ne sont donc pas homogènes dans toutes les directions,
- Les composites sont difficilement usinables avec précision

Bien que les avantages des matériaux composites soient impressionnants, ces matériaux ne sont pas une solution miracle pour toutes les applications. Des inconvénients ou des problèmes existent et peuvent empêcher leur usage. Les inconvénients les plus courants sont les suivants :

- **Coût**

Les matériaux composites hauts performances ont été développés principalement pour répondre aux besoins de la communauté aérospatiale où le coût élevé peut être toléré en échange de matériaux plus performants. Par conséquent, le transfert de la technologie des composites aux produits de grande consommation est lent, à quelques exceptions comme les équipements de sports où la performance prime également sur le coût[4].

- **Conception et analyse**

Les matériaux composites sont souvent à la fois hétérogènes et anisotropes. Ces deux caractéristiques sont différentes des celles de la plupart des matériaux conventionnels. Elles nécessitent de nouvelles approches, généralement plus compliquées, pour la conception et l'analyse des structures.

L'hétérogénéité impose l'analyse selon au moins deux points de vue. La micromécanique examine l'interaction des constituants à l'échelle microscopique. La macro-mécanique suppose que le composite est homogène et s'intéresse aux propriétés apparentes du matériau.

Les matériaux anisotropes nécessitent plus de propriétés mécaniques que les matériaux isotropes pour établir les relations contrainte-déformation (les lois de comportement). Ces propriétés sont déterminées selon les directions principales du pli élémentaire (directions parallèle et perpendiculaire à l'orientation des fibres).

Pour les stratifiés composites, les rigidités sont déterminées à l'aide de la théorie

classique des stratifiés. La rupture des stratifiés composites se produit de plusieurs façons très complexes. Il est donc difficile d'établir une théorie de résistance qui Tienne compte de tous les modes de rupture et de leurs interactions. Par conséquent, la détermination des résistances est plus compliquée et nécessite des vérifications expérimentales. De plus, la résistance d'un stratifié peut être influencée par les contraintes inter laminaires au voisinage des bords libres. La séquence d'empilement du stratifié doit être soigneusement déterminée afin de minimiser ces contraintes.

- **Assemblage**

Les matériaux composites sont généralement plus fragiles que les matériaux métalliques conventionnels. Par conséquent, la redistribution des contraintes autour des sites de concentration telle que le trou est moins efficace. La résistance et la rigidité d'un stratifié ne peuvent pas toujours être entièrement transférés par un joint. Le trou est donc souvent renforcé par des inserts métalliques ou par l'augmentation de l'épaisseur du stratifié dans la partie trouée. De tels renforcements entraînent du poids supplémentaire pour la structure. Le problème d'assemblage est donc critique pour le succès de l'emploi des matériaux composites.

- **Tolérance aux dommages**

Un des points faibles les plus importants des matériaux composites est la tolérance aux dommages. Des dommages de diverses natures peuvent se produire dans la vie d'une structure, par exemple l'impact, soit en service ou pendant la maintenance, est inévitable. En règle générale, plus un matériau est ductile, plus il est capable de tolérer l'impact car la ductilité fournit la capacité d'absorber de l'énergie. Par conséquent, les structures métalliques ont tendance de se déformer plutôt que de se fracturer sous l'impact. Le caractère fragile des matériaux composites ne permet pas, par contre, de subir l'impact sans avoir d'endommagement.

Les dommages sont souvent des fissurations internes de la matrice, indétectables sur la surface de la structure. Ce type de dommages diminue considérablement la résistance en compression de la pièce endommagée. Les dommages des fibres diminuent la résistance en compression ainsi qu'en traction. Les outils pour évaluer la tolérance aux dommages des structures sont le programme d'inspection, l'analyse de la résistance résiduelle, et l'analyse de la propagation des dommages.

I.5 Généralités 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 (thermique, 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 lequel sont calculées les propriétés effectives [5].

Un autre terme utilisé est la « localisation » pour déterminer la déformation et la contrainte locale ; ils peuvent être calculés en employant le rapport entre la contrainte moyenne et locale obtenue de l'analyse locale [6].

Les figures (I.4) et (I.5), 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 (MITE), qui répond globalement à un chargement quelconque de la même façon. Bien sûr, 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.

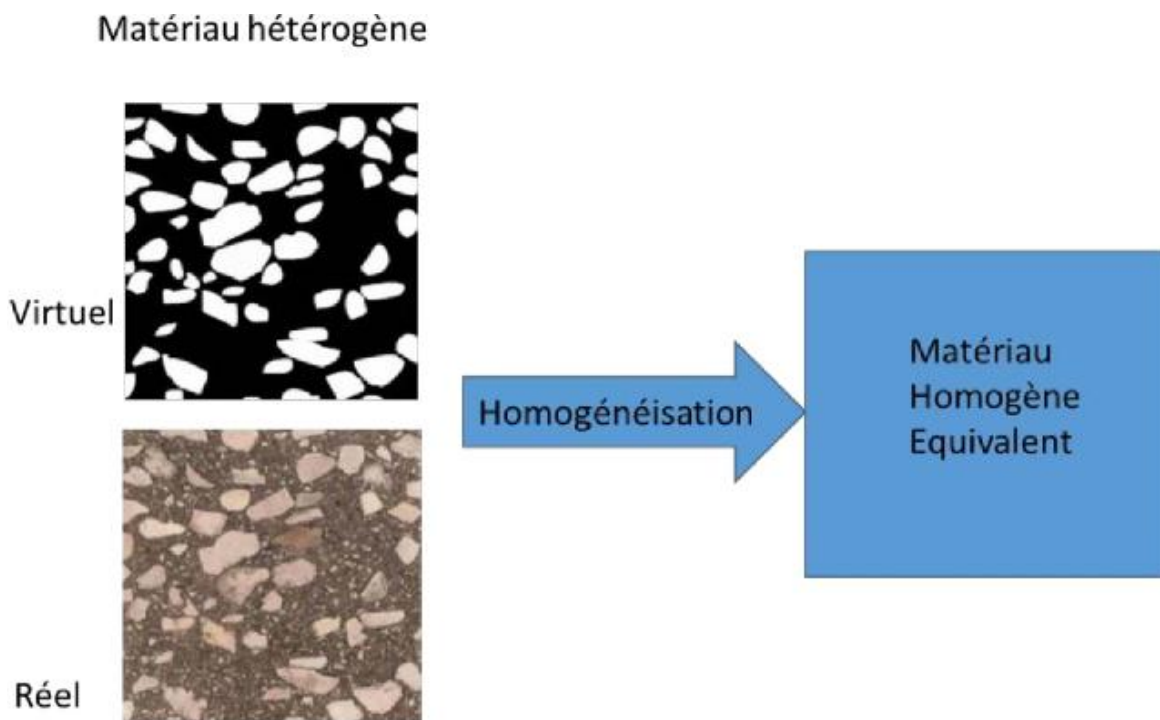


Figure I-4 : Principe de l'approche d'homogénéisation des matériaux hétérogènes. [4]

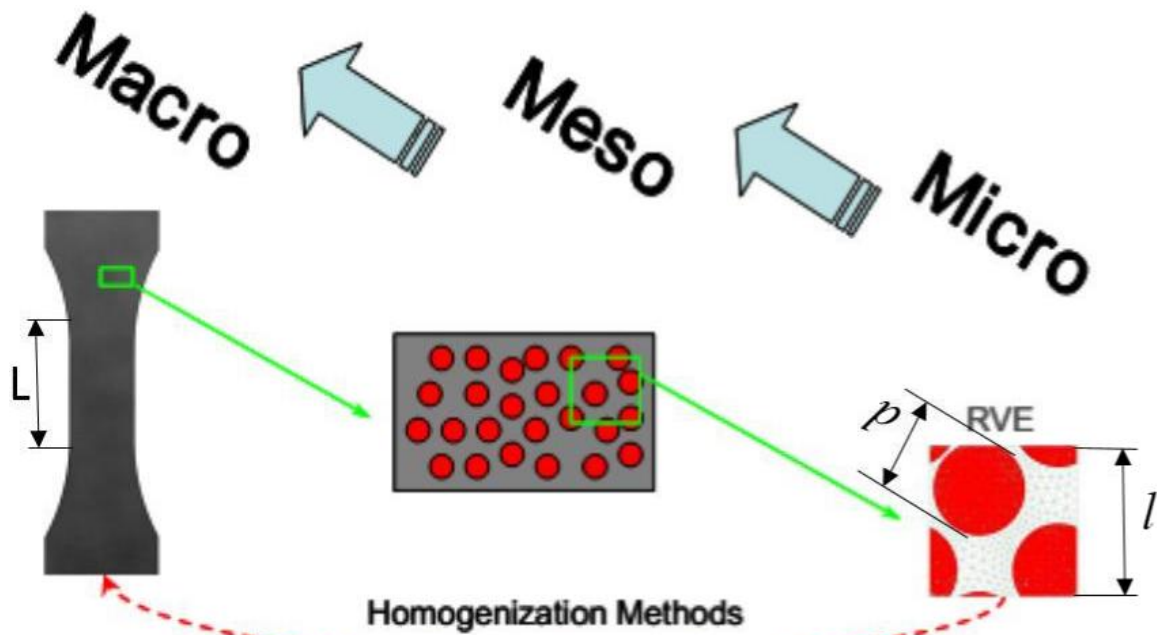


Figure I-5 : Approche et principe de l'homogénéisation numérique [6]

Ce volume est appelé volume élémentaire représentatif (VER), qui est décrit selon les conditions d'échelles suivantes, figure I-5 :

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

- $l \ll L$: 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.
- $l \gg d$: c'est la condition nécessaire pour pouvoir affecter au volume élémentaire représentatif un comportement macroscopique homogène malgré son hétérogénéité méso/microscopique.

I.6 Notions de volume élémentaire représentatif(VER) dans un matériau hétérogène

La description d'un matériau doit être suffisamment riche et réaliste pour estimer correctement les comportements macroscopiques. Pour cela, on doit définir une taille optimale pour la description

géométrique suffisante de la microstructure représentative pour la propriété que l'on souhaite estimer. On parle ici de volume élémentaire représentatif volume élémentaire représentatif.

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

Dans la littérature, Plusieurs définitions sont proposées pour le concept volume élémentaire représentatif, il suffit de consulter le travail . La taille du volume élémentaire représentatif 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 volume élémentaire représentatif [6].

La figure (I.6) montre des exemples de volume élémentaire représentatif dans une microstructure à 2-phases. Dans le même exemple de microstructure, on distingue différentes situations, dites réalisations, pour représenter la taille d'un volume élémentaire représentatif. 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 leurs natures.

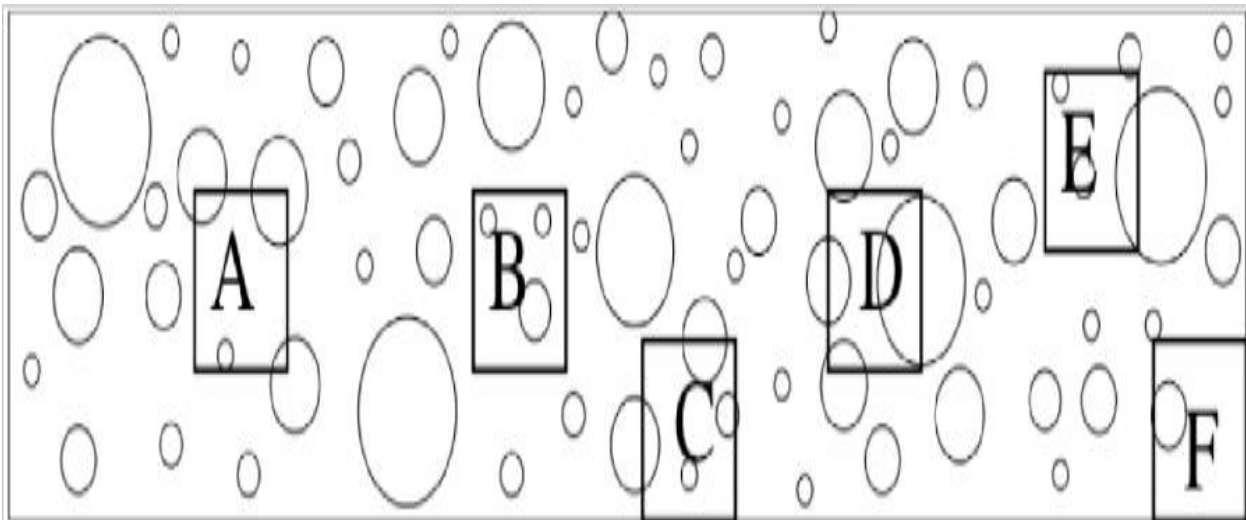


Figure I-6 : Exemple de VER d'une microstructure hétérogène [6]

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit succinctement les composites, leur types et leur généralités et les techniques d'homogénéisation, nous avons exposé leur domaine d'applications principale. De ce fait, nous avons acquis les notions générales sur les matériaux composites.

Chapitre II

Génération de

microstructure 3D

Génération de microstructure 3D

II.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter, les notions de bases à la génération des particules en 3D dans un volume cubique qui constitue le fièvre de notre étude. Pour cela des méthodes sur l'homogénéisation numérique seront exposer et les méthodologies de maillage et les conditions aux limites thermiques.

II.2 Générations 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 II.7). [7]

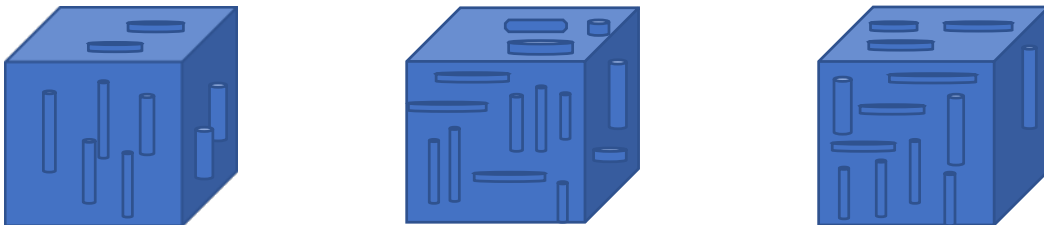


Figure II-7 : Génération des particules en 3D dans un volume cubique

Afin de pouvoir générer un modèle de répartition aléatoire de particules 3D dans une cellule élémentaire VE cubique nous avons développé par la suite l'algorithme permettant un tirage pseudo-aléatoire du centre des particules en prenant en compte l'utilisation des contraintes de répartition et non collision de ces particules entre elles et entre les parois de cette cellule.

La génération de cet algorithme permet de créer des cellules en 3D pour des modèles représentatifs. Le concept de génération de particules dans les cellules qui sont distribuées aléatoirement dans cette cellule, consiste à introduire les contraintes géométriques suivantes :

- Les particules sont de même taille (diamètre) ;

- Les particules ne doivent pas chevaucher entre elles ;
- Les particules ne doivent pas toucher les parois de la cellule ;

L'algorithme est basé aussi sur le paramètre de la cellule qui est sa taille. Le volume de la cellule et le volume des particules sont reliés entre elles en fonction de la fraction volumique des particules avec la relation

$$f_{particul} = N_{particul} \cdot S_{particul} / S_{cellule}$$

Avec: $f_{particul}$ est la fraction volumique des particules

$S_{particul}$ et $S_{cellule}$ représentant l'aires de particule et de la cellule

Le nombre de particule N_p , la taille de la particule d_p et la fraction volumique des particules f_p 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 (II.8).

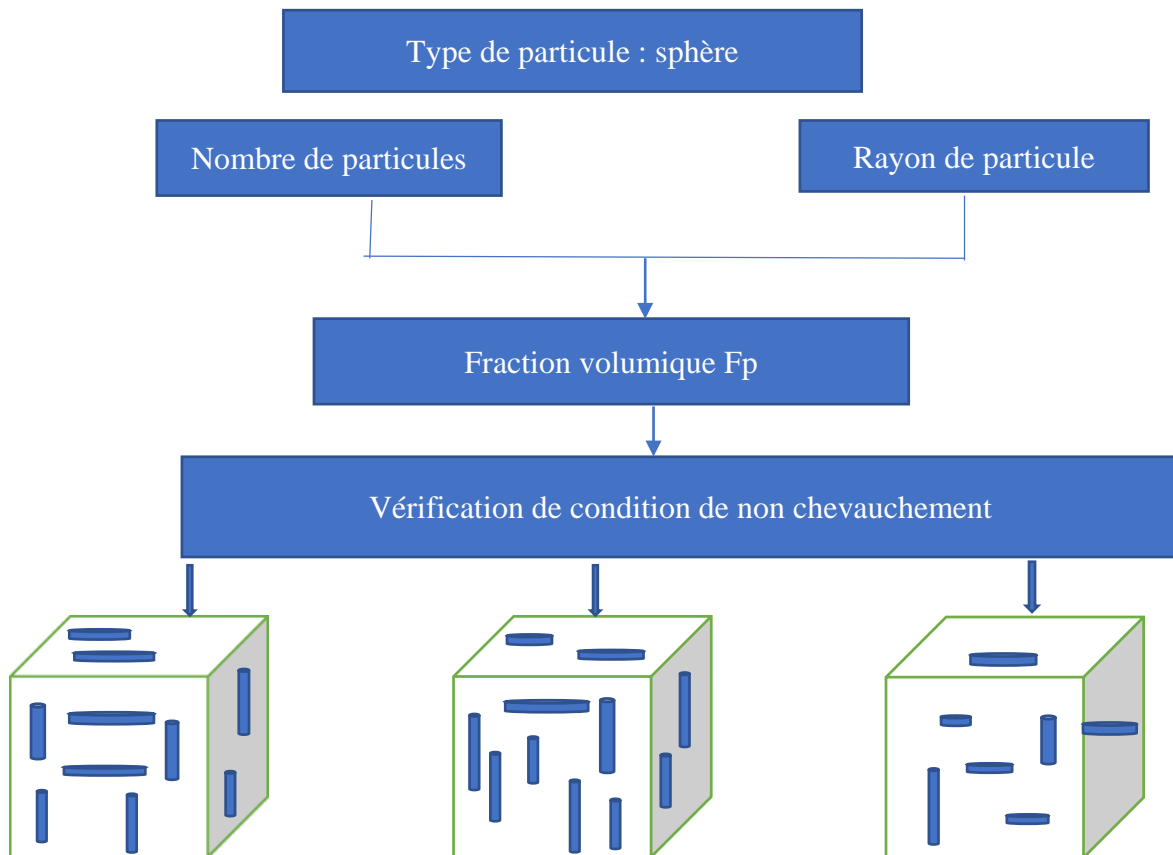


Figure II-8 : Propriétés géométrique de la cellule cubique [7]

La Figure (II.9) donne un schéma sur les particules et la distance entre deux géométries (Cercle-cercle). Les coordonnées des centres des particules, 1(1, 1, 1) et 2(2, 2, 2) sont tirées aléatoirement. Afin de vérifier la condition de non collision des particules, nous recherchons deux points 1 et 2 de deux particules.

La particule P1 de coordonnées (1, 1, 1) et la particule P2 de coordonnées (2, 2, 2) doivent justifier la condition la distance (D) entre les deux centres des particules soit :

$$D = \sqrt{(2 - 1)^2 + (2 - 1)^2 + (2 - 1)^2} \quad (\text{II1})$$

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 est inférieur au diamètre des sphères il y a collision. Si le paramètre est supérieur au diamètre des sphères il n'y a pas collision.

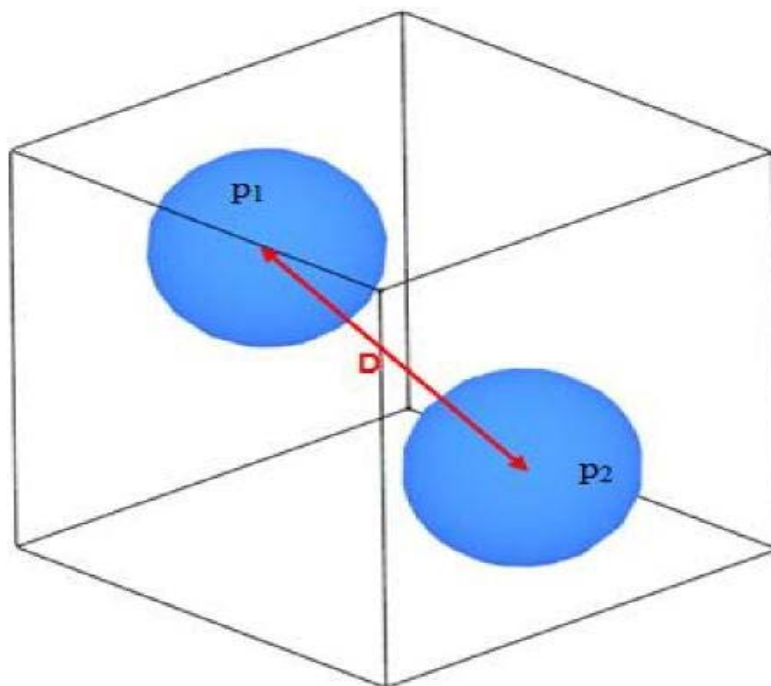


Figure II-9 : Définition de la géométrie et du paramétrage des particules [7]

Pour la génération des modèles de répartition aléatoire de particules (sphères, cubes et ellipsoïdales) dans une cellule cubique nous avons développé un algorithme (Figure II.9) permettant un tirage pseudo-aléatoire du centre des sphères en prenant en compte un paramètre de non collision entre les particules afin d'éviter toute interférence des particules entre elles, et la condition de non collision de ces particules avec la cellule. La dispersion de nos particules dans le VER étant considérée aléatoire, la création géométrique du VER est faite avec le code Python.

La dispersion des particules dans la cellule élémentaire VE étant considérée aléatoire, la création géométrique du VE qui contient ces particules est basée sur la programmation d'un script comme dans le cas d'une cellule à deux dimensions, mais avec quelques changements dans

l'algorithme. Les données initiales de la génération sont ; la taille de la cellule L, la taille de la particule et leur orientation pour les formes ellipsoïdales et cubiques, et la fraction volumique des particules.

II.3 Homogénéisation numérique

La mécanique des matériaux hétérogènes s'est longtemps limitée aux approches analytiques. Les progrès considérables des capacités en espace de stockage mémoire et puissance des moyens de calcul ont boosté l'utilisation de la simulation numérique. Le principe de l'homogénéisation numérique est basé sur l'utilisation de la notion du volume élémentaire représentatif. On remarque que la première étape consiste au choix du volume élémentaire représentatif puis la définition de la géométrie globale du matériau et finalement vient le maillage et la simulation numérique du comportement thermique ou mécanique. [8]

II.4 Outils et méthodologie

Cette partie présente une description de la méthodologie de génération et de maillage des microstructures multi-phases 2D/3D. Ces microstructures multi-phases, contenant une distribution aléatoire d'inclusions de forme circulaire/sphérique.

- L'homogénéisation numérique des matériaux hétérogènes passe par trois étapes principales :
- La génération des échantillons numériques du milieu hétérogène considéré 2D/3D ;
- Le maillage des images/volumes ;

II.4.1 Maillage et densité du maillage

Le maillage est réalisé par le code Consol. Plusieurs possibilités de taille et types de Maillage sont disponibles dans ce code. En raison de la convergence des calculs, une bonne Densité de maillage doit être adoptée pour les simulations. Les calculs numériques mécaniques/thermiques.

II.4.2 Condition aux limites thermiques

Pour le problème thermique, la température, son gradient et le flux de chaleur sont notés par $T, \nabla T$ et q respectivement. Le vecteur de flux de chaleur et le gradient de température sont donnés par la loi de Fourier, comme suit : [10]

$$q = -\lambda \cdot \nabla T \quad (\text{II2})$$

q : le vecteur de flux de chaleur

λ : le coefficient de conductivité thermique

∇T : le gradient de température

II.4.2.1 Condition aux limites périodiques

Dans les cas aux limites périodiques on applique sur les nœuds de la surface extérieure d'un volume V une température périodique T qui s'écrit de la manière suivante

$$T = G \cdot x + t, \forall x \in \mathcal{V} \quad (\text{II3})$$

La fluctuation de température t est périodique.

Nous notons ici que les conditions aux limites périodiques convergentes plus rapidement en termes de taille, à la conductivité thermique effective globale moyenne. [10]

II.5 Conductivité des matériaux hétérogènes

Le transfert de chaleur dans les matériaux hétérogènes est fortement dépendu de leur microstructure. La définition et le calcul d'une conductivité thermique équivalente nécessite une modélisation de la microstructure et parfois des hypothèses simplificatrices sur le transfert de chaleur. Cette grandeur permet d'une part l'interprétation des résultats expérimentaux et d'autre part l'utilisation d'un nombre réduit de paramètre dans les codes de calcul. Différentes méthodes de calcul publiées dans littérature sont analysées et leurs conditions d'application discutées. Les microstructures complexes peuvent être prises en compte à partir d'images de coupes d'échantillons.

II.5.1 Génération des échantillons numériques du milieu hétérogène

Dans ce travail, les exemples de microstructures 2D/3D sont générés suivant le processus de Poisson. Ce dernier est bien adapté aux microstructures aléatoires et isotropes. C'est le fondement de la majorité des modèles probabilistes de génération des structures. Ce processus a été utilisé par plusieurs auteurs, [7] pour la génération des microstructures aléatoires des mosaïques de Voronoï, puis par Jean [9] pour la génération des microstructures des élastomères renforcés par le noir de carbone. L'intérêt des modèles aléatoires est de permettre facilement la création de nouveaux exemples de matériaux sans passer par les morphologies des matériaux réels, complexes des microscopes ou de la tomographie.

La distribution des particules dans le domaine 2D/3D de la microstructure est générée de la façon suivante :

Les centres M_i des sphères sont générés aléatoirement dans l'espace 2D selon un processus de Poisson. Pour notre cas d'étude, il n'y a ni contact ni interpénétration entre les particules, une distance de répulsion est imposée afin de satisfaire cette condition. Si la position M_i de l'inclusion ne satisfait pas la distance minimale de répulsion, elle est remplacée de nouveau jusqu'à ce que la condition soit vérifiée dans une autre position du volume. Des nouvelles inclusions sont rajoutées par la même façon jusqu'à ce qu'on obtient la fraction volumique souhaitée, voir figure (II.10)

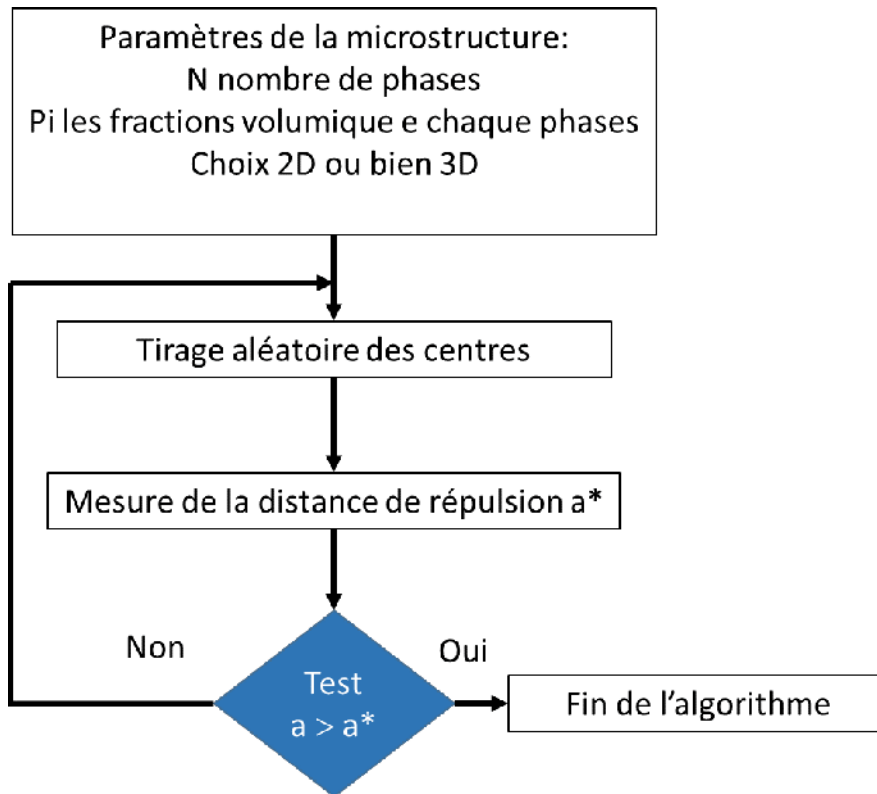


Figure II-10 : Organigramme de Poisson [11]

Parmi les algorithmes existant les plus utilisés pour la génération et la simulation des matériaux hétérogènes on cite aussi, le Randon Séquentiel Adsorption (RSA). Celui-ci consiste à générer de façon aléatoire des particules sphériques et identiques d'une manière séquentielle, on peut citer Segurado et Llorca [5], Kari [6] pour les particules sphériques, puis Pirard [6] pour le cas des ellipses.

II.6 Maillage des microstructures

Le choix des méthodes numériques pour résoudre le problème de microstructure nous oblige à utiliser la méthode des éléments finis. Cela nécessite la génération d'un maillage discrétisant la géométrie ou bien la microstructure 2D/3D. La technique de création et maillage d'un matériau hétérogène s'appuie sur deux phases : représentation surfacique de matériau ; maillage surfacique. La première phase est la représentation des microstructures : elle est obtenue en utilisant les outils de conception assistée par ordinateur (CAO). Les microstructures 2D/3D obtenues sont finalement introduites dans des logiciels pour une discrétisation réaliste, voir figure II-14.

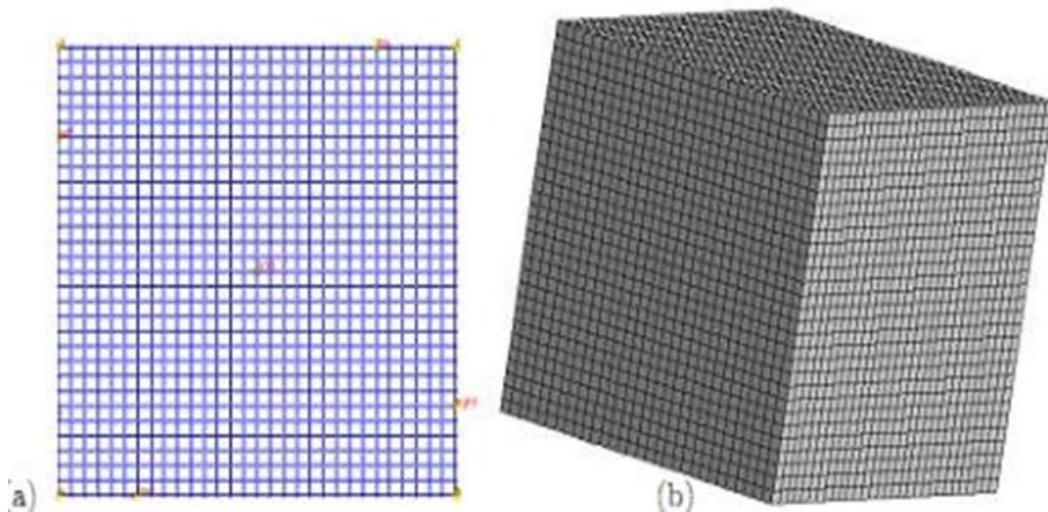


Figure II-11 : Maillage de la microstructure [11]

La phase suivante consiste à superposer le maillage sur des images de microstructure 2D/3D générées par le processus de Poisson. Deux méthodes de maillage existent, la technique de maillage multi-phase et la technique de maillage libre. La méthode des éléments multi-phases est déjà utilisée par plusieurs chercheurs, voir Barbe [9] pour une étude élasto-plastique des matériaux hétérogènes, pour le maillage des images réelles d'un composite obtenues par microscope à transmission [11].

Dans cette méthode, le comportement mécanique ou thermique associé aux phases est attribué à chaque point d'intégration de chaque élément. L'utilisation de cette méthode dans le cadre de ce travail vient du fait que dans les travaux précédents, une comparaison entre cette méthode et d'autres types de maillage a été effectuée.

La deuxième méthode est le maillage libre qui se base sur le maillage de chaque phase de la microstructure 2D/3D séparément, ce qui engendra une taille très importante en ce qui concerne l'espace mémoire. L'utilisation de cette technique nécessite les moyens de calcul puissants donc un coût élevé.

Par comparaison entre les deux techniques et selon les résultats finaux, les valeurs des grandeurs macroscopiques sont identiques dans les deux cas du maillage, sachant que le nombre des EF utilisé dans le cas d'un maillage multiphasique est inférieur au cas du maillage libre. Cette différence au niveau du nombre des EF influence le temps de compilation ainsi que la mémoire des machines demandée. Il est à noter que la méthode des éléments multi-phases nécessite peu de mémoire et peu du temps de convergence par rapport à la méthode de maillage libre.

Le maillage EF associé pour chaque microstructure est obtenu à l'aide de la méthode des éléments multi-phases, qui est présentée par la figure II.1. On rappelle que ces microstructures sont générées selon une distribution poissonnienne, puis implémentées dans le code Zabulon pour les calculs EF.

II.7 Les calculs numériques mécanique/thermique

Une fois la phase de génération et de maillage des microstructures 2D/3D achevée, l'étape de calcul numérique de la résolution du problème thermique ou mécanique est entamée. Le matériau est sollicité par des efforts mécaniques ou bien thermiques suivant le cas des propriétés effectives voulues. Dans ce cas des conditions aux limites spéciales dans le monde de l'homogénéisation des matériaux hétérogènes sont imposées et utilisées.

II.8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'acquérir, en premier lieu les notions principales sur l'homogénéisation et les techniques d'homogénéisation numérique on était exposé. En second lieu les éléments nécessaires à la simulation numérique à l'aide de l'outil EF finis à était présenté, en l'occurrence le maillage et ses paramètres et comment poser ses conditions aux limites. Et enfin une familiarisation avec la conductivité thermique des matériaux hétérogènes.

Chapitre III

Homogénéisation en conductivité thermique

Homogénéisation en conductivité thermique

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons déterminer la conductivité thermique d'un matériau composite hétérogène, à travers divers essais numériques pour différente fraction volumique, puis nous allons les déterminer analytiquement grâce en modèles de Maxwell Russell et ainsi les comparais résultat numérique.

III.1.2 Diffusion thermique

La diffusivité thermique est définie comme la vitesse à laquelle un matériau répond à un changement de température. La diffusivité thermique notée D est définie par l'équation :

$$D = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (\text{III.1})$$

Avec C_p la capacité calorifique a pression constant, ρ et la masse volumique. D exprimé en $\frac{m^2}{s}$. Pour un matériau avec une diffusivité thermique élevée, la propagation de chaleur est plus rapide.

La diffusivité thermique est évaluée à partir de l'évolution de température. Temps en utilisant un schéma différentiel unidirectionnel (c'est-à-dire en limitant le calcul de données à une seule direction x) ce qui permet d'évaluer les pertes radiatives de surfaces. Le calcul de la diffusivité à partir de cette méthode devient

$$\frac{dT}{dt} = D \left(\frac{d^2T}{dx^2} \right) \quad (\text{III.2})$$

Ou t est le temps, D la diffusivité thermique, x la distance comprise entre 0 et L (l'épaisseur) et T la température. [9]

III.1.3 Modèle d'homogénéisation

Compte tenu des différentes échelles à considérer, il est nécessaire d'adopter une méthode d'homogénéisation pour traiter la conduction thermique dans un composite dont la matrice est un polymère semi-cristallin. Nous avons vu précédemment que les approches plus élaborées décrivent déjà un polymère semi-cristallin comme un système tri phasique. L'introduction de particules dans un polymère semi-cristallin ajoute une échelle aux problèmes. De nombreux modèles ont été élaborés, les plus simples tiennent compte de la fraction volumique de constituants et de la morphologie des phases, des plus élaborés intègrent l'influence de facteur de formes et de l'orientation des charges ainsi que les interactions matrice /charges. [9]

III.1.3.1 Modèle de Maxwell

Ce modèle dérive de l'approximation de Clausius-Mossotti qui lie la permittivité diélectrique d'un matériau et les polarisabilités de ses entités mobiles. [9]

Pour la fraction volumique x_c d'ellipsoïdes de demi-axes $a_1=a_2$ et $a_3 > a_1$ de conductivité λ_c dispersées de façon aléatoire dans une matrice continue de conductivité λ_m .

La conductivité thermique λ_{MG} du composite selon le modèle de Maxwell s'écrit :

$$\lambda_{MG} = \lambda_m \frac{3+x[2\beta_{11}(1-L_{11})+\beta_{33}(1-L_{33})]}{3-x(2\beta_{11}L_{11}+\beta_{33}L_{33})} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Où : } \beta_{ii} = \frac{\lambda_c - \lambda_m}{\lambda_m + L_{ii}(\lambda_c - \lambda_m)} \quad (\text{III.4})$$

$$L_{11} = \frac{a_3^2}{2(a_3^2 - a_1^2)} - \frac{a_3 a_1^2}{(a_3^2 - a_1^2)^{3/2}} \cosh^{-1}\left(\frac{a_3}{a_1}\right) \quad (\text{III.5})$$

$$L_{33} = 1 - 2L_{11} \quad (\text{III.6})$$

Dans le cas de sphères ; $a_1 = a_2 = a_3$ et $L_{11} = L_{22} = L_{33} = 1/3$, l'équation se simplifie telle que :

$$\lambda_{MG, \text{sphère}} = \lambda_m \frac{\lambda_c + 2\lambda_m + 2x(\lambda_c - \lambda_m)}{\lambda_c + 2\lambda_m + x(\lambda_m - \lambda_c)} \quad (\text{III.7})$$

III.1.3.2 Modèle de Russell

Suivant la théorie de Russell, la conductivité thermique du matériau est donnée par :

$$\lambda_{eff} = \lambda_m \left[\frac{\varphi^{2/3} + \frac{\lambda_m}{\lambda_f} (1 - \varphi^{2/3})}{\varphi^{2/3} - \varphi + \frac{\lambda_m}{\lambda_f} (1 + \varphi - \varphi^{2/3})} \right]$$

λ_{eff} : Représente la conductivité thermique effective du composite

λ_m : La conductivité thermique de la matrice

φ : La fraction volumique des particules

λ_f : La conductivité thermique des particules

III.2 Simulation avec le logiciel Eléments finis

III.2.1 Présentation de la géométrie

La présentation de la géométrie du matériau composite et de l'inclusion.

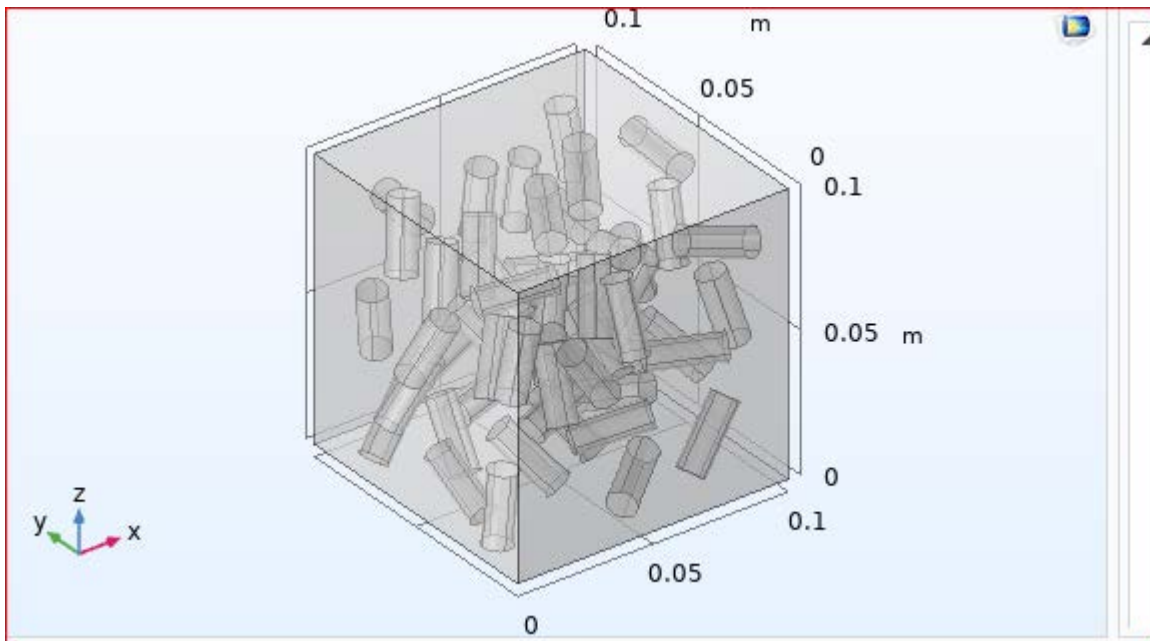


Figure III-1 : Modélisation du modèle étudié en 3D

III.2.2 Maillage

La résolution par la méthode des éléments finis d'un problème physique formulé en termes d'équation aux dérivées partielles s'appuie sur une discrétisation spatiale, ou maillage, du

domaine étudié. Nous avons considéré une modélisation 3D avec un maillage de type triangulaire à trois nœuds et une taille d'éléments de 0,008 mm.

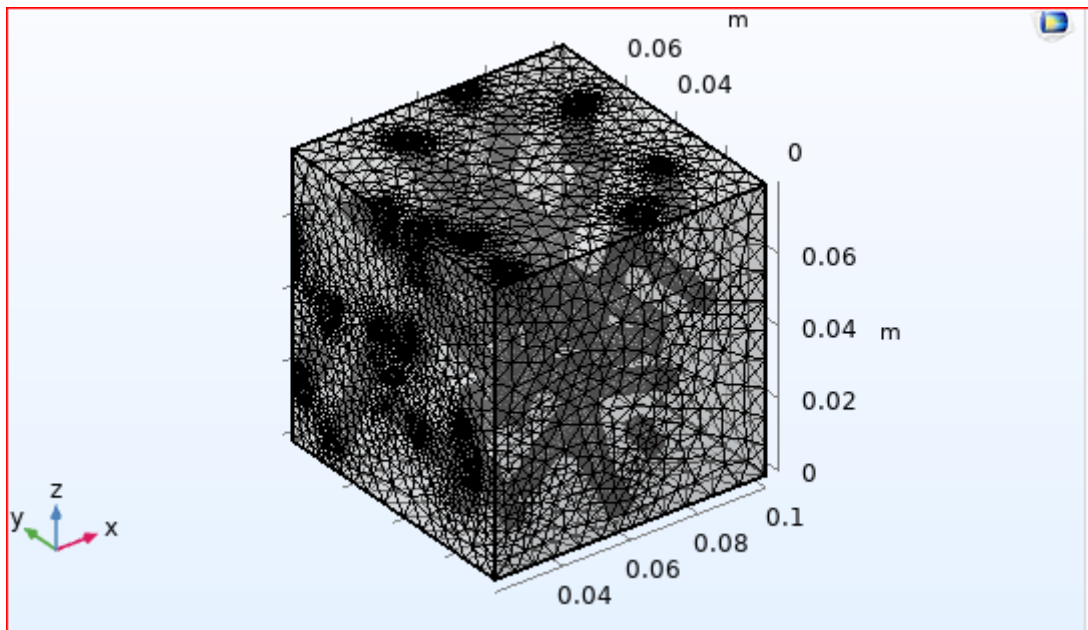


Figure III-2 : Modèle maillé

III.2.3 Génération de bloc

Pour les différents volumes d'essais qui vont être réalisés à l'intersection est générer à partir des blocs.

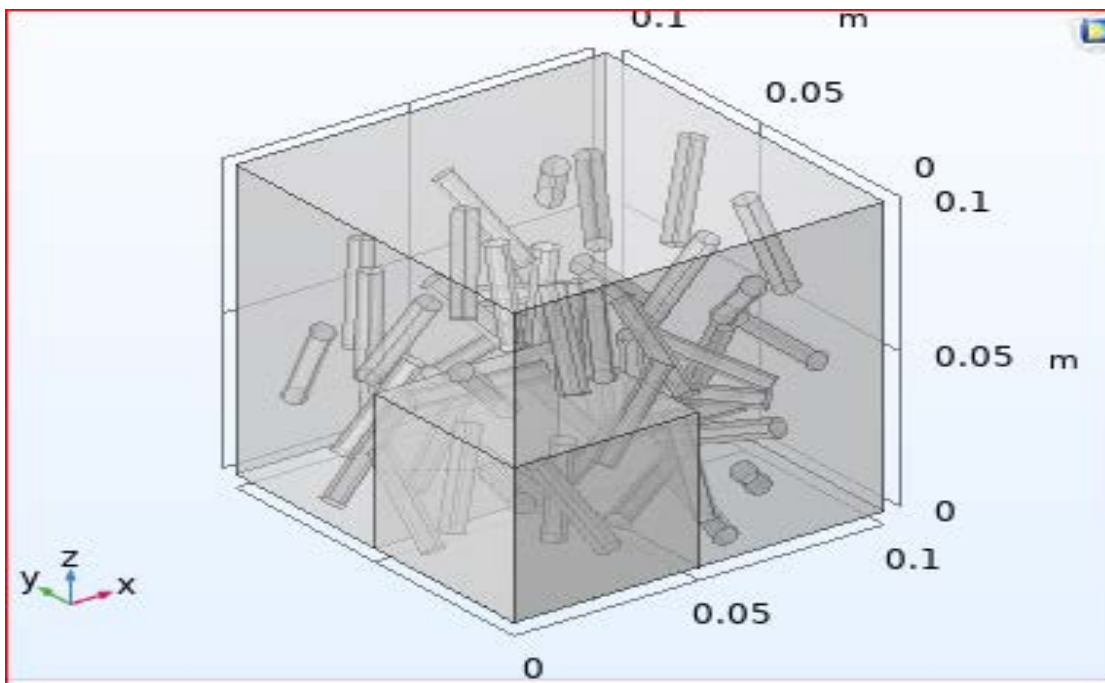


Figure III-3 : Génération de bloc

III.3 Calcul de la conductivité thermique numérique

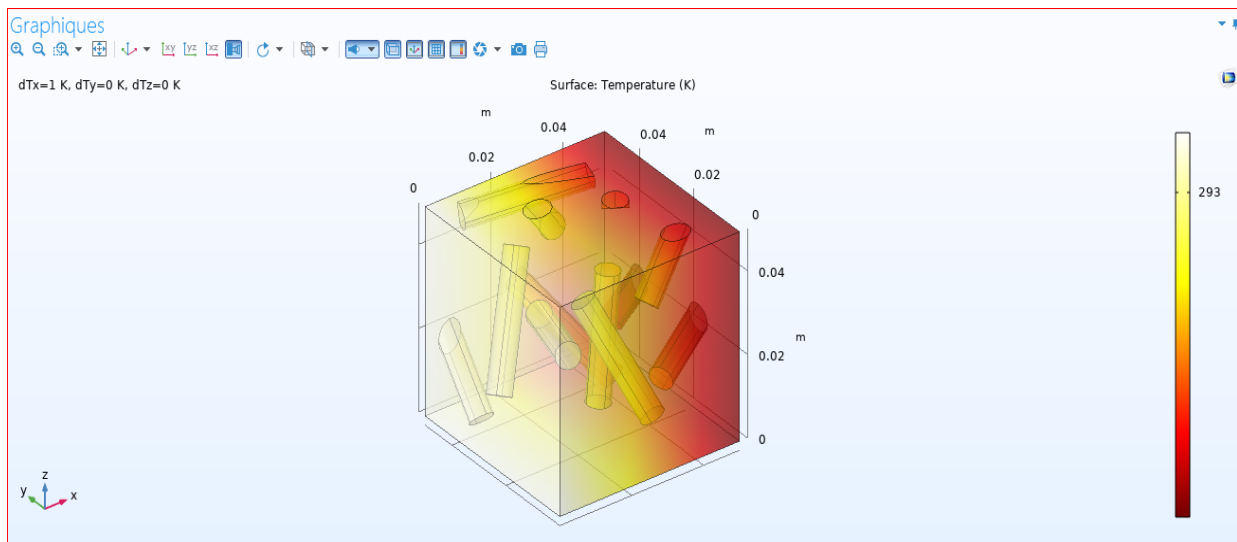


Figure III-4 : Conductivité thermique du solide composite

III.3.1 Pour une fraction volumique de 5%

- Cas h=5.r

Fraction 05%		
Dimensions (mm^3)	Volume (mm^3)	λ (W/(m.K))
10x10x10	V1	1,492
20x20x20	V2	1,4999
50x50x50	V3	1,4992
80x80x80	V4	1,6645
100x100x100	V5	1,6846

Tableau III.1 : Conductivité thermique numérique pour h=5.r

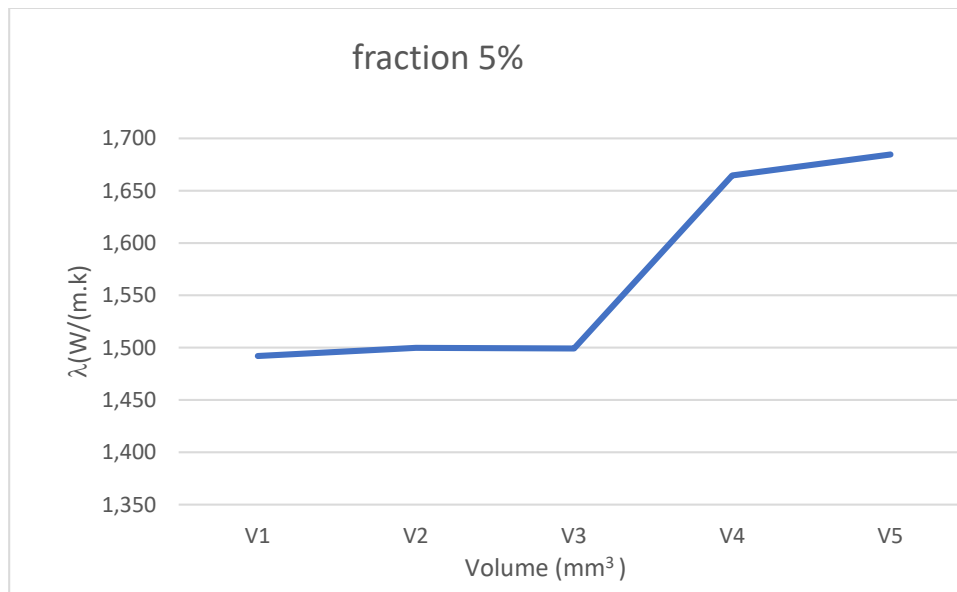


Figure III-1 : Courbe représentative de la conductivité thermique pour les différents volumes

La courbe représente une progression continue en fonction du volume, pour un volume donné la conductivité augmente avec l'augmentation du volume.

- **Cas h=10.r**

Fraction 05%		
Dimensions (mm ³)	Volume (mm ³)	λ (W/(m.K))
10x10x10	V1	1,3906
20x20x20	V2	1,3949
50x50x50	V3	1,4185
80x80x80	V4	1,6619
100x100x100	V5	1,6971

Tableau III. 2 : Conductivité thermique numérique pour h=5.r

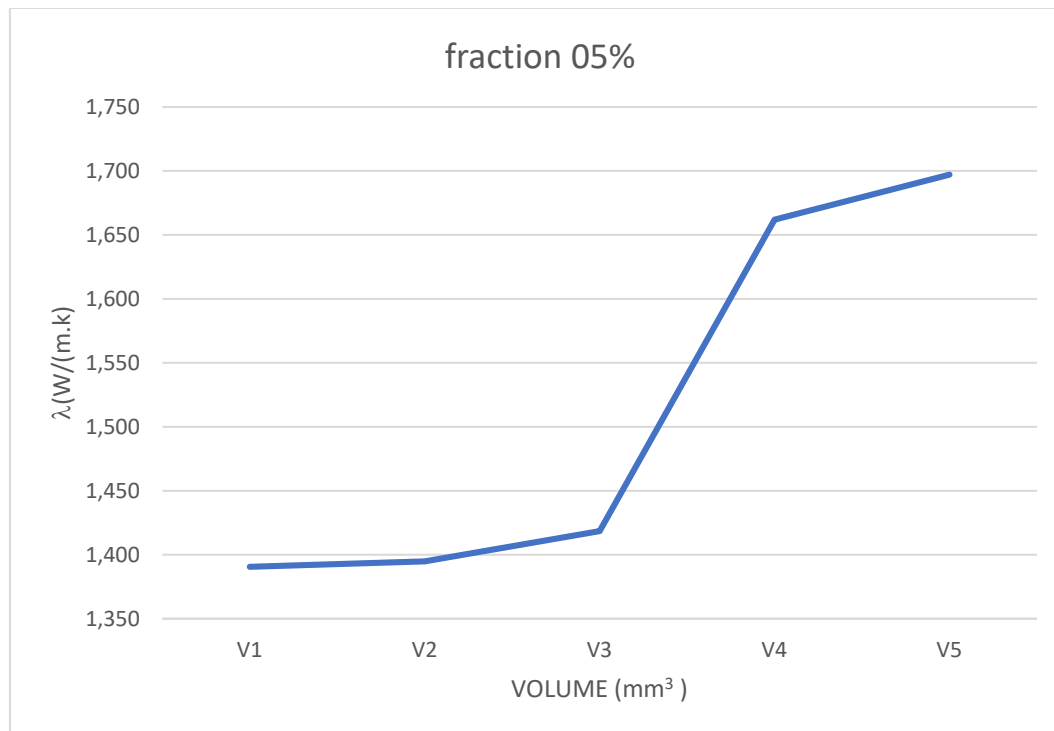


Figure III-2 : Courbe représentative de la conductivité thermique pour les différents volumes

La courbe représente la conductivité thermique pour les différents volumes, dans le cas $h=10.r$. On remarque que la courbe est une fonction linéaire, la valeur de la conductivité thermique dépend essentiellement de la taille de la matrice.

III.3.2 Pour une fraction volumique de 10%

- **Cas $h=5.r$**

Fraction 10%		
Dimensions (mm ³)	Volume (mm ³)	λ (W/(m.K))
10x10x10	V1	1,2801
20x20x20	V2	1,2813
50x50x50	V3	1,3555
80x80x80	V4	1,5506
100x100x100	V5	1,584

Tableau III. 3 : Conductivité thermique numérique pour $h=5.r$

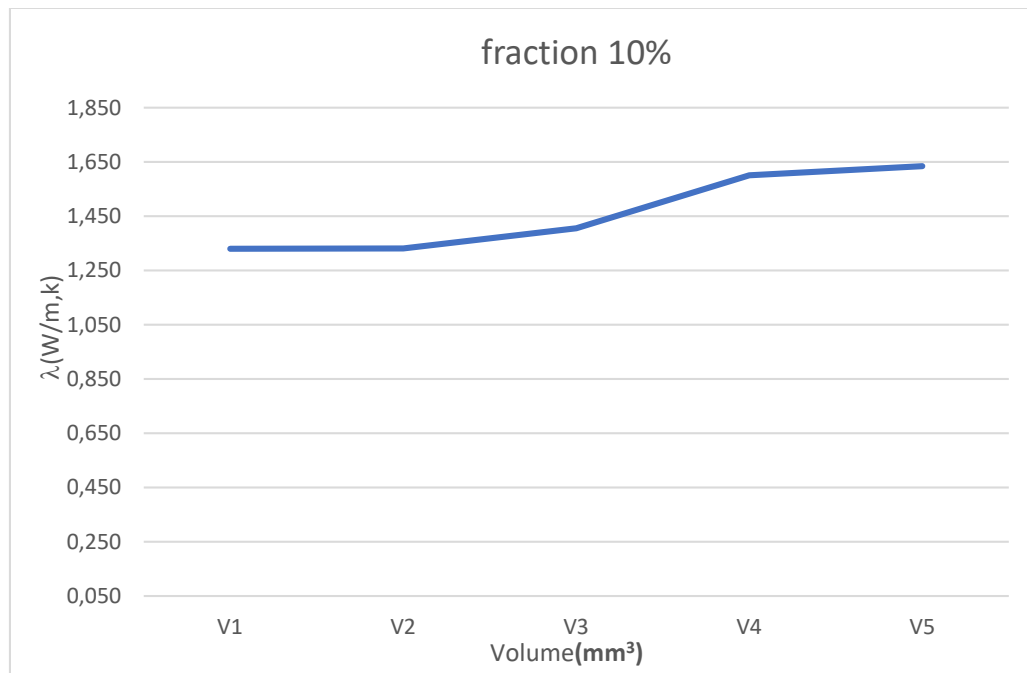


Figure III-3 : courbe représentative de la conductivité thermique pour les différents volumes

La courbe décrit une évolution de la conductivité en fonction du volume de la matrice dans le cas $h=5.r$

- **Cas $h=10.r$**

Fraction 10%

Dimensions (mm ³)	Volume (mm ³)	λ (W/(m.K))
10x10x10	V1	1,2902
20x20x20	V2	1,2965
50x50x50	V3	1,3425
80x80x80	V4	1,5283
100x100x100	V5	1,5751

Tableau III. 4 : Conductivité thermique numérique pour $h=5.r$

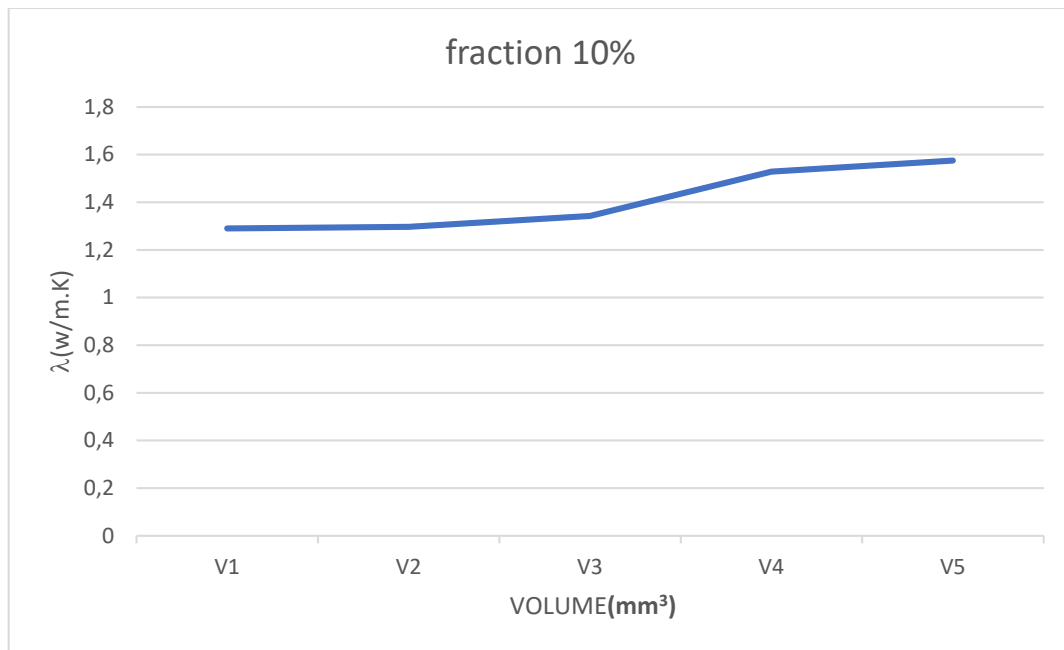


Figure III-4 : courbe représentative de la conductivité thermique pour les différents volumes

La courbe représente la conductivité thermique pour les différents volumes, dans le cas $h=10.r$. On remarque que la courbe est une fonction linéaire, la valeur de la conductivité thermique dépend essentiellement de la taille de la matrice.

III.4 Comparaison de la conductivité thermique calculé analytiquement et numériquement pour les deux fractions de volume

III.4.1 Pour la fraction volumique de 5%

- Cas $h=5.r$

Fraction 5%				
Dimensions (mm^3)	Volume (mm^3)	λ (W/(m.K))	$\lambda^{Max}(\frac{W}{m} \cdot k)$	$\lambda^{Rus}(\frac{W}{m} \cdot k)$
10x10x10	V1	1,492	1,41	1,62
20x20x20	V2	1,4999	1,41	1,62
50x50x50	V3	1,4992	1,41	1,62
80x80x80	V4	1,6645	1,41	1,62
100x100x100	V5	1,6846	1,41	1,62

Tableau III. 5 : valeur de λ^{num} , λ^{Max} , λ^{Rus}

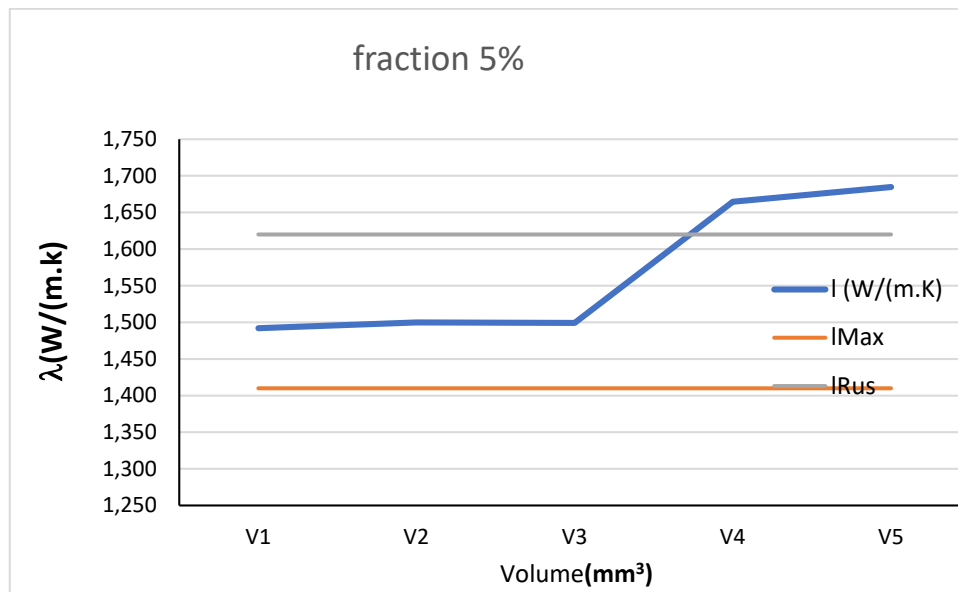


Figure III-5 : Comparaison de λ^{num} , λ^{Max} , λ^{Rus}

• Cas h=10.r

Fraction 5%				
Dimensions (mm^3)	Volume (mm^3)	λ (W/(m.K))	$\lambda^{Max}(\frac{W}{m} \cdot k)$	$\lambda^{Rus}(\frac{W}{m} \cdot k)$
10x10x10	V1	1,3906	1,41	1,62
20x20x20	V2	1,3949	1,41	1,62
50x50x50	V3	1,4185	1,41	1,62
80x80x80	V4	1,6619	1,41	1,62
100x100x100	V5	1,6971	1,41	1,62

Tableau III- 6 : valeur de λ^{num} , λ^{Max} , λ^{Rus}

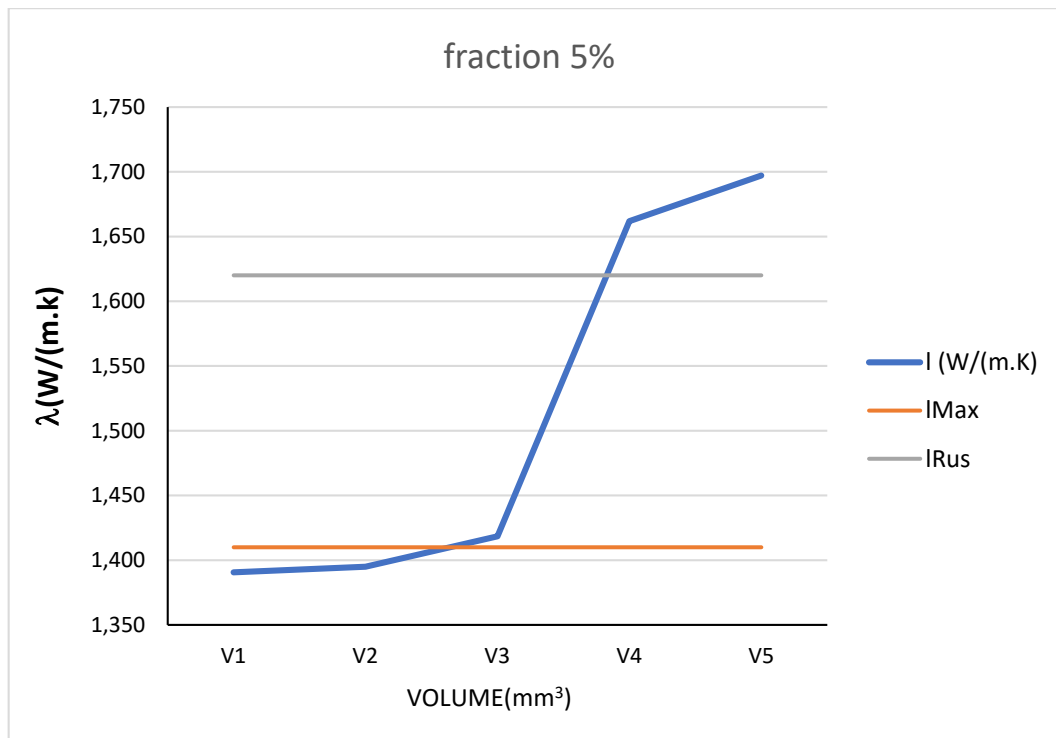


Figure III-6 : Comparaison de λ^{num} , λ^{Max} , λ^{Rus}

III.4.2 Pour la fraction volumique de 10%

- Cas h=5.r

Fraction 10%				
Dimensions (mm³)	Volume (mm³)	λ (W/(m.K))	λ^{Max} ($\frac{W}{m} \cdot k$)	λ^{Rus} ($\frac{W}{m} \cdot k$)
10x10x10	V1	1,2801	1,33	1,53
20x20x20	V2	1,2813	1,33	1,53
50x50x50	V3	1,3555	1,33	1,53
80x80x80	V4	1,5506	1,33	1,53
100x100x100	V5	1,584	1,33	1,53

Tableau 7 : valeur de λ^{num}, λ^{Max}, λ^{Rus}

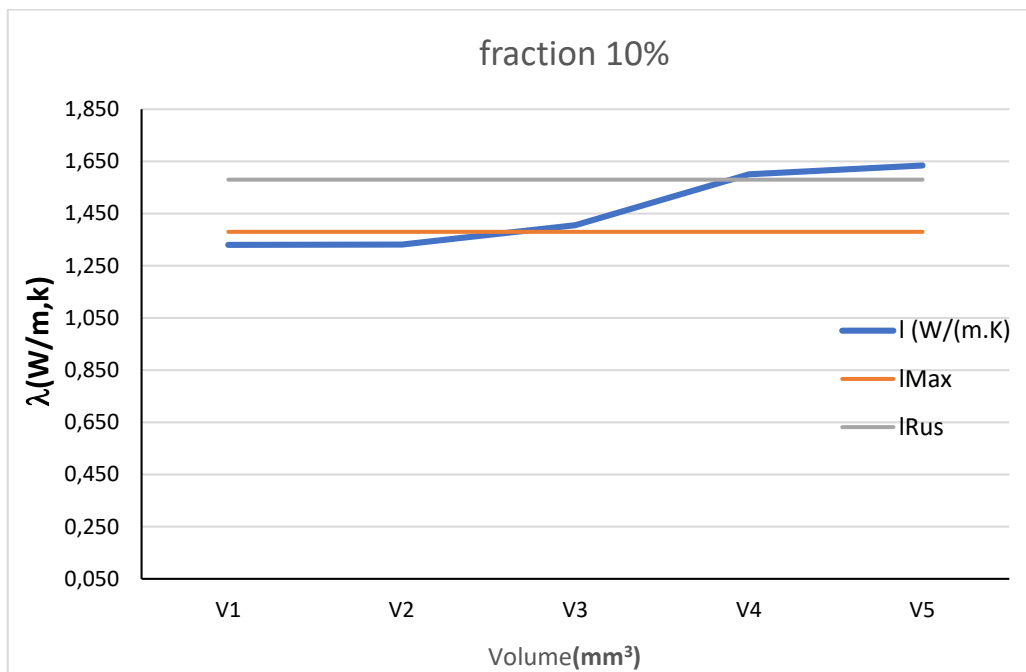


Figure III-7 : Comparaison de λ^{num}, λ^{Max}, λ^{Rus}

- Cas h=10.r

Fraction 10%				
Dimensions (mm³)	Volume(mm³)	λ (W/(m.K))	$\lambda^{Max}(\frac{W}{m} \cdot k)$	$\lambda^{Rus}(\frac{W}{m} \cdot k)$
10x10x10	V1	1,2801	1,33	1,53
20x20x20	V2	1,2813	1,33	1,53
50x50x50	V3	1,3555	1,33	1,53
80x80x80	V4	1,5506	1,33	1,53
100x100x100	V5	1,584	1,33	1,53

Tableau 8 : valeur de λ^{num} , λ^{Max} , λ^{Rus}

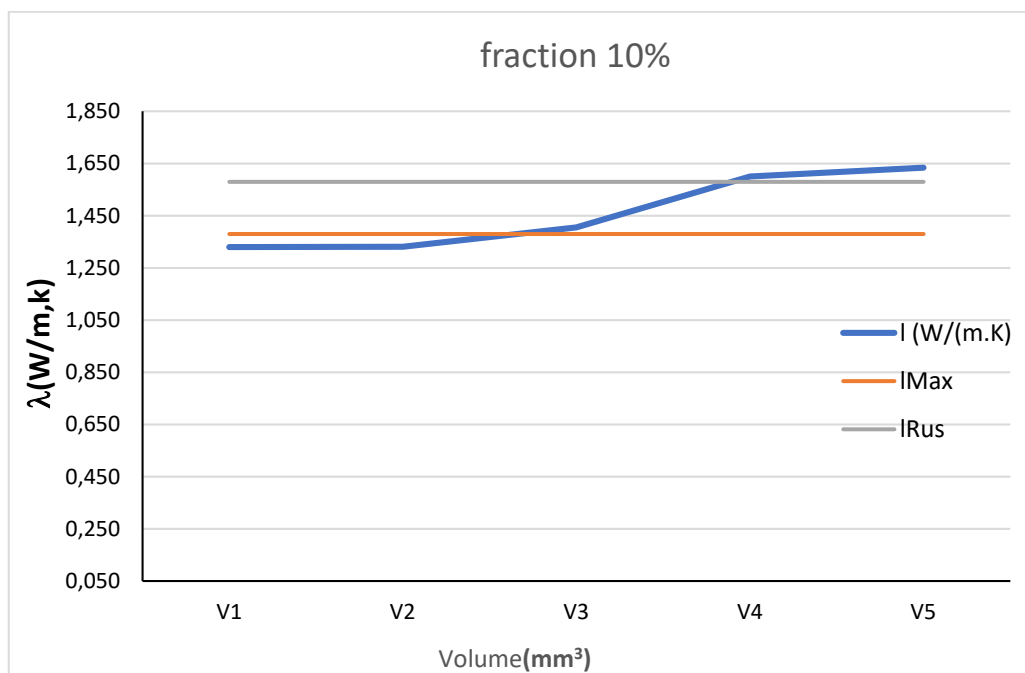


Figure III-8 : Comparaison de λ^{num} , λ^{Max} , λ^{Rus}

Pour les différents prélèvements de volume des deux fractions dans le cas $h=5.r$, on constate que la conductivité thermique calculé numériquement de la fraction de 5% est nettement supérieur à celle de 10% en volume.

Pour les différents prélèvements de volume des deux fractions dans le cas $h=10.r$, on constate que la conductivité thermique calculé numériquement de la friction de 5% est aussi constablement supérieur à celle de 10% en volume.

III.4.3 Discussion des résultats

A travers les nombreux résultats nous pouvons constater que les résultats de notre simulation numérique sont valides, ce qui a été vérifié par le calcul analytique, en effet on peut remarquer plus la fraction est faible plus la conductivité thermique augmente, chose constatable numériquement et analytiquement. Donc les résultats concordent.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé des essais à travers un logiciel de calcul EF pour déterminer l'influence de l'inclusion « Téflon » d'un matériau composite constitué d'une matrice en « béton » sur la conductivité thermique. Les résultats obtenus montrent l'influence de l'inclusion sur la conductivité thermique du matériau composite.

Nos résultats ont été appuyé par un calcul analytique grâce aux modèle de Maxwell et Russell, qui a travers leur résultats la crédibilité de nos résultats est démontré.

Conclusion Générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude du matériau composite « béton téflon », le principe étant de réaliser divers essais pour déterminer la conductivité thermique du matériau. Pour différentes fractions de l'inclusion nous avons déterminé la conductivité thermique et nous avons pu déterminer que le facteur majeur qui affecté la conductivité du matériau était régit par le téflon, du fait que plus le volume occupé par l'inclusion à l'intérieur de la matrice plus la conductivité du matériau diminuait, donc nous pouvons admettre que le téflon détermine la valeur conductivité dans le matériau hétérogène.

La crédibilité de nos résultats de simulation est déterminer grâce à l'étude numérique réaliser, qui nous a permis de calculer la conductivité thermique du matériau hétérogène et ainsi les comparer aux études numérique réalisé, notamment grâce aux modèle de Maxwell et Russell qui concorde avec les valeurs numériques.

Enfin, nous pouvons dire que le matériau composite hétérogène constitué du béton+Téflon est un matériau usuel qui peut être utilisé pour diminuer la conductivité thermique dans les secteurs où il est nécessaire de la contrôler, telle l'isolation thermique dans les centrales thermique ou bien nucléaire.

Pour conclure le matériau Téflon est un matériau qui peut être recyclé de bien des façons, comme le démontre notre étude. Ce qui peut avoir deux impacts majeurs :

- L'un étant de réduire le gaspillage des chutes de Téflon qui pourront être re-déstitner à bon usage
- Le second étant directement lié à l'environnement, la pollution à cause des déchets d'origine polymères est minimisée.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Berthelot J.M., Matériaux composites - Comportement mécanique et analyse des structures, Ed Tec Doc, Lavoisier, Paris,2005.
- [2] Glossaire des Matériaux Composites. Centre d'Animation Régional en Matériau Actives - CARMA.
- [3] PASTOR J, OHAYON J et DISDIER C 6, Homogénéisation périodique et composites à fibres actives, Laboratoire LaMaCo, ESIGEC, Thèse de doctorat, université de Savoie, Bourget-du-Lac, France, 2002.
- [4] J.W. Ju, L.Z. Sun, Effective elastoplastic behavior of metal matrix composites containing randomly located aligned spheroidal inhomogeneities, Part I : Micromechanicsbased formulation, International Journal of Solids and Structures 38, 183-201, 2001
- [5] J. Chaboche, P. Suquet, Endommagement, interfaces. Ecole d'été méthodes d'homogénéisation en mécanique des matériaux. La Londe-les-Maures, 1998
- [6] I. Gitman, H. Askes, L. Sluys, Representative volume : Existence and size détermination, Engineering fracture mechanics 74,2518-2534 , 2007.
- [7] LENE.F.et LEGUILLOND, Etude L'influence d'un glissement entre les Constituait d'un Matériaux composite sur ses coefficients de comportement effectifs. F de mécanique théorique et appliquée (F) vol.20 n° 31981 L 509-363
- [8] O. Pierard, C. Gonzalez, J. Segurado, J. LLorca, I. Doghri. Micromechanics of elastoplastic materials reinforced with ellipsoidal inclusions. International Journal of Solids and Structures 44, 6945-6962.
- [9] Lisa Rivière, Analyse mécaniques de conduction thermique dans les composites structuraux PEEK/particules submicroniques d'argent. Université Toulouse 3Paul Sabatier, Thèse doctorat, 15/11/2016.

- [10] F. Barbe, L. Decker, D. Jeulin and G. Cailletaud,. Inter-granular and intra-granular behavior of poly-crystalline aggregates. Part 1 : Finite element model, *International Journal of Plasticity*, (17) 513–536, 2001.
- [11] A. El Moumen, T. Kanit, A. Imad, H. El Minor . Effect of overlapping inclusions on effective elastic properties of composites. *Mechanics Research Communications*. 53, 24–30 2013.
- [12] J. Segurado, J. Llorca . Computational micromechanics of composites : The effect of particle spatial distribution. *Mechanics of Materials* 38, 873–883, 2006.
- [13] S. Kari, H. Berger, U. Gabbert . Numerical evaluation of effective material properties of randomly distributed short cylindrical fibre composites. *Computational Materials Science* 39, 198–204, 2007.
- [14] IKOP^o+ O. Pierard, C. Gonzalez, J. Segurado, J. Llorca, I. Doghri . Micromechanics of elasto-plastic materials reinforced with ellipsoidal inclusions. *International Journal of Solids and Structures* 44, 6945-6962, 2007.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude du matériau composite « béton téflon », le principe étant de réaliser divers essais pour déterminer la conductivité thermique du matériau. Pour différentes fractions de l'inclusion nous avons déterminé la conductivité thermique et nous avons pu déterminer que le facteur majeur qui affecté la conductivité du matériau était régi par le téflon. Enfin, nous pouvons dire que le matériau composite hétérogène constitué du béton+Téflon est un matériau usuel qui peut être utilisé pour diminuer la conductivité thermique dans les secteurs où il est nécessaire de la contrôler, telle l'isolation thermique dans les centrales thermiques ou bien nucléaire

Abstract

This work is part of the study of the composite material "Teflon concrete", the principle being to perform various tests to determine the thermal conductivity of the material. For different fractions of the inclusion we determined the thermal conductivity and we were able to determine that the major factor that affected the conductivity of the material was governed by Teflon. Finally, we can say that the heterogeneous composite material consisting of concrete + Teflon is a common material that can be used to reduce thermal conductivity in sectors where it is necessary to control it, such as thermal insulation in thermal power stations or else nuclear