



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE « Abbès LAGHROUR » DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Mécanique

N° de série :.....

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Génie Des Matériaux

Thème

**ETUDE DE L'EFFET DE LA FORME DES
PARTICULES SUR LE COMPORTEMENT
MECANIQUE D'UN COMPOSITE**

Réalisé par : - HAOUES Cheima
- BENLEULMI Awatef

Dirigé par : Mr. MANSOURI khelifa M,C.B

Membres de jury :

Mr. Hannachi Bouzid

M.A.A

Université de Khenchela

Président

Mr. Himeur Nabil

M.A.A

Université de Khenchela

Examineur

Présenté le 19/06/2022

Remerciements

*Grâce soit rendue à dieu que nulle expression ne saurait
Glorifier ou dénombrer les bienfaits ou lui rendre l'hommage requis.*

*Nous voudrions profiter de cette soutenance pour remercier
tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail; en commençant
d'abord par notre encadreur le Dr. **MANSOURI KHELIFA**,
qui n'a cessé de croire en nos compétences et nous a encouragé, Mille merci
en espérant être toujours à la hauteur.*

*Nous remercions également les membres du jury :
Mr. **HANNACHI BOUZID** pour sa patience et qui nous a fait
l'honneur de présider ce jury, Mr **HIMEUR NABIL** qui a pris la
peine de lire avec soin ce mémoire pour juger son contenu.*

*Le chef du département de génie mécanique et ces adjoints,
On tient également à exprimer nos remerciements et notre gratitude au
Dr. **Halim ALLAOUI** vis-doyen chargé de la pédagogie
Nos remerciements vont également à tous les enseignants du département
de Génie mécanique de l'université Abbes Laghrour Khenchela
Ainsi que tous mes collègues.*

Merci

*Haoues Cheima
Beneulmi Awatef*

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A mes chers parents qui m'ont toujours soutenu et m'ont donné un amour sans limite.

*À mes chers frères : **Amir, waïl**. À mes sœurs : **zineb, malak**.*

*À la femme de mon frère bien-aimé **Nour elhouda**,*

*Aux enfants de notre famille **owais, tamim, ahmed rami**.*

*À toute la famille **Haoues***

*A ma copine et Binôme **Awatef**, À ma meilleure amie **Nariman**,*

A tous mes amis.

A mes anciens collègues dans le domaine de la Physique des Matériaux.

À tous mes chers élèves.

*Sans oublier mon institutrice **Rehabi mounira** et tous les professeurs*

À toute la promotion 2022. . .

HAOUES cheïma



Dédicace

Je dédie ce travail à :

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amour, leurs tendresse, leurs soutien et leurs prières tout au long de mes études,

*À mon cher frère **ABD ELWEHAB,***

*A mes sœurs **AHLAM, NEDJELA et YASMIN...***

*À ma belle amie et Binôme **Cheïma***

Et Tout mes amis

*À tout la famille **BENLEULMI***

À tous mes professeurs de l'école primaire à l'université

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin...

À toute la promotion 2022. . .

BENLEULMI awatef



Liste des figures

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

Figure I-1 : Schématisation des renforts noyés dans une matrice	5
Figure I- 2 Constituants d'un matériau composite	5
Figure I-3 Différentes familles de matrice	6
Figure I-4 Structures moléculaires (a) D'un polymère thermoplastique (b) D'un polymère thermodurcissable	8
Figure 1-5 Les différents types de renfort de base	10
Figure 1-6 Fibres de verre	10
Figure 1-7 Fibre de carbone.....	11
Figure 1-8 Fibre d'Aramide.....	12
Figure 1-9 Différentes formes de particules	15
Figure 1-10 Composite monocouche	17
Figure I-11 Exemples de tissus plans courants	17
Figure 1-12 Exemples de tissus tridimensionnels	18
Figure I-13 composite stratifié	18
Figure I-14 Composite sandwichs	19
Figure I-15 Classification des matériaux composites	20
Figure I-16 Application industrielle des thermoplastiques chargés de fibres	23
Figure I-17 Cycle d'injection : les différentes phases	23
Figure I-18 Schématisation d'une extrudeuse double vis.....	24

Chapitre II Etude analytique

Figure II-1 Distance entre particules, (a) hexagonale et (b) carré	28
Figure II-2 Composite renforcés par Neuf particules circulaires.....	36
Figure II-3 Composite renforcés par Neuf particules carrées.....	37
Figure II-4 Composite renforcés par Neuf particules rectangulaires.....	38

Figure II-5 Composite renforcés par Neuf particules triangulaires	38
Figure II-6 Composite renforcés par Neuf particules pentagonales	39
Figure II-7 Composite renforcés par Neuf particules hexagonales.....	40
Figure II-8 Composite renforcés par Neuf particules forme 1 et forme 2.....	40

Chapitre III Simulation numérique

Figure III-1 <i>Modèle par éléments finis pour un composite renforcé par des particules</i>	45
Figure III-2 Différentes formes utilisées en simulation (disposition en carré).....	46
Figure III-3 Maillage de la matrice	47
Figure III-4 Maillage des particules	48
Figure III-5 Maillage du composite (particules carrées).....	48
Figure III-6 Conditions aux limites pour un composite renforcé avec 9 particules carrées (a) Disposition carrée, (b) Disposition hexagonale, (c) Disposition aléatoire.....	49
Figure III-7 Distribution des contraintes Von Mises (arrangement carré).....	49
Figure III-8 Distribution des contraintes longitudinales (arrangement carré).....	49
Figure III-9 Distribution des contraintes Von Mises (arrangement aléatoire).....	50
Figure III-10 Distribution des contraintes longitudinales (arrangement aléatoire).....	50
Figure III-11 Distribution des contraintes Von Mises (arrangement hexagonale).....	51
Figure III-12 Distribution des contraintes longitudinales (arrangement hexagonale).....	51
Figure III-13 Distribution des contraintes Von Mises (arrangement carré) a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, circulaire, g) Forme 1, h) Forme 2.....	52
Figure III-14 Distribution des contraintes longitudinales (arrangement carré) a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, f) circulaire, g) Forme 1, h) Forme 2.....	53
Figure III-15 Distribution des contraintes Von Mises (arrangement hexagonale) a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, circulaire, g) Forme 1, h) Forme 2.....	54
Figure III-16 Distribution des contraintes longitudinales (arrangement hexagonale) a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, f) circulaire, g) Forme 1, h) Forme 2.....	55

Figure III-17 Distribution des contraintes Von Mises (arrangement aléatoire)	
a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, circulaire, g) Forme1, h) Forme 2.....	56
Figure III-18 Distribution des contraintes longitudinales (arrangement aléatoire)	
a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, f) circulaire, g) Forme1, h) Forme 2.....	57
Figure III-19 Évolution des contraintes de Von Mises en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement carré).....	58
Figure III-20 Évolution des contraintes longitudinales en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement carré).....	59
Figure III-21 Évolution des contraintes de Von Mises en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement aléatoire).....	59
Figure III-22 Évolution des contraintes longitudinales en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement aléatoire).....	60
Figure III-23 <i>Évolution des contraintes de Von Mises en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement hexagonale)</i>	60
Figure III-24 Évolution des contraintes longitudinales en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement hexagonale).....	61

liste des tableaux

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

<i>Tableau I-1</i> Caractéristiques des thermoplastiques.....	7
<i>Tableau I-2</i> Caractéristiques des thermodurcissables	8

Chapitre II Etude analytique

<i>Tableau II-1</i> Dimension des particules circulaires.....	37
<i>Tableau II-2</i> Dimension des particules carrées.....	37
<i>Tableau II-3</i> Dimension des particules rectangulaires.....	38
<i>Tableau II-4</i> Dimension des particules circulaires.....	39
<i>Tableau II-5</i> Dimension des particules pentagonales.....	39
<i>Tableau II-6</i> Dimension des particules hexagonales.....	40
<i>Tableau II-7</i> Dimension des particules Forme 1 et Forme 2.....	41

Chapitre III Simulation numérique

<i>Tableau III-1</i> Caractéristiques mécaniques des verres types E, A, R, S et D mesurées sur filament vierge	44
<i>Tableau III-2</i> Propriétés du PA66.....	45

Nomenclature

l_p : longueur de la particule

l_m : longueur de la matrice

d_p : Diamètre de la particule

R_f : rayon de la particule

V_f : fraction volumique

s : Distance entre particule

ρ_p : Densité des particules

E_p : Module de Young de la particule

E_m : Module de Young de la matrice

E_c : Module de Young du composite

N_p : Nombre de particules dans le composite

Sommaire

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	iv
Nomenclature.....	v
Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralités sur les composites	
I.1 Introduction	4
I.2 Historique.....	4
I.3 Définition des composites	4
I.4 Constituants des matériaux composites.....	5
I.4.1 Matrice	6
I.4.1.1 Les matrices polymères.....	6
I.4.1.2 Les matrices céramiques.....	8
I.4.1.3 Les matrices métalliques	9
I.4.2 Les renforts	9
I.4.2.1 Fibre de verre	10
I.4.2.2 Fibre de carbone.....	11
I.4.2.3 Fibre d'aramide	11
I.4.2.4 Fibre de bore	12
I.4.2.5 Fibre de silice (ou de quartz).....	12
I.4.2.6 Fibres céramiques	12
I.5 Relation matrice/renfort	13
I.6 Les additifs.....	13
I.7 Charges	14
I.8 Classification des matériaux composites	14
I.8.1 Classification suivant la forme des constituants	14

I.8.1.1 Composites à fibres.....	14
I.8.1.2 Composites à particules.....	15
I.8.2 Classification suivant la nature des constituants.....	15
I.8.2.1 Composites à matrice organique (CMO).....	15
I.8.2.2 Composites à matrice métallique (MMC).....	16
I.8.2.3 Composites à matrice céramique (CMC).....	16
I.8.3 Classification suivant la structure des matériaux composites.....	16
I.8.3.1 Monocouches.....	16
I.8.3.2 Composites tissés.....	17
I.8.3.3 Stratifiés.....	18
I.8.3.4 Les sandwichs	19
I.8.4 Classification suivant le type de matériau composite.....	19
I.8.4.1 Matériaux composites de grande diffusion.....	20
I.8.4.2 Matériaux composites de hautes performances.....	20
I.9 Avantage des matériaux composites	20
I.10 Inconvénients des matériaux composites.....	21
I.11 Mise en œuvre des matériaux composites.....	21
I.11.1 L'injection	22
I.11.2 L'extrusion.....	23
I.11.3 La pultrusion.....	24
I.12 Domaines d'application.....	25
I.12 Conclusion	25

Chapitre II Etude analytique

II.1 Introduction.....	28
II.2 Arrangement des particules	28
II.2.1 Arrangement hexagonale.....	28
II.2.2 Arrangement carré.....	29
II.3 Théories du module élastique	30
II.4 Calcul des dimensions des particules.....	36

II.4.1	Forme circulaire.....	36
II.4.2	Forme Carrée	37
II.4.3	Forme rectangulaire	37
II.4.4	Forme Triangulaire.....	38
II.4.5	Forme Pentagonale.....	39
II.4.6	Forme Hexagonale.....	40
II.4.7	Forme 1 et Forme 2.....	40

Chapitre III Simulation numérique

III.1	Introduction.....	43
III.2	Matériau du composite.....	43
III.2.1	Les renforts de verre.....	43
III.2.2	La matrice polyamide.....	44
III.3	Modélisation par élément finis	45
III.3.1	Propriété du composite.....	47
III.3.2	Condition aux limites.....	48
III.4	Résultats et discussion.....	49
	Conclusion générale.....	63
	Référence bibliographique.....	65

Introduction générale

Introduction générale

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Le renfort se présente sous forme de fibres continues et discontinues, le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres et leurs orientations permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure.

Les composites renforcés par des particules ont été développés en grande partie pour combler l'écart de propriété entre les stratifiés (des fibres continues) utilisées comme structures primaires par l'industrie aéronautique et aérospatiale et matériaux non renforcés utilisés principalement dans les applications non porteuses. À certains égards, les renforts discontinus couplent les avantages de chacun de ces matériaux. Ainsi, les particules ont trouvé leurs places dans les structures légèrement chargées, dans lequel la rigidité domine la conception, mais dans lequel il doit être également une augmentation notable de la force sur le matériau non renforcé [1]. L'augmentation de la surface de contact peut aider à compenser la liaison imparfaite entre l'interphase particule-matrice. Par conséquent, les matériaux composites constitués de nanoparticules devraient offrir une résistance supérieure à celle d'un composite classique préparé avec la même fraction volumique [2].

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de la forme des particules de verre sur le comportement mécanique d'un matériau composite à matrice thermoplastique polyamide 66. Pour cela on a pris des formes différentes : triangulaire (équilatérale), carrée, pentagonale, hexagonale, circulaire, rectangulaire (horizontale et verticale) et deux autres formes. La recherche proposée étudiera les avantages possibles de l'utilisation des formes de particules.

Pour cela, on a commencé notre travail par un premier chapitre consacré au différent type de matériaux composites, ainsi que les techniques de leur mise en œuvre en basant sur les composites renforcés par des particules. Ensuite, un deuxième chapitre consacré à une étude analytique pour la détermination du module de Young et le calcul des dimensions de ces particules pour pouvoir être utilisées dans la simulation numérique. Le troisième et dernier chapitre, on a enchaîné avec une simulation numérique en utilisant le logiciel Castem

INTRODUCTION GENERALE

tout on utilisant les différentes formes de particules renforçant une plaque soumise a la traction. Enfin, on a terminé notre étude par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les composites

I.1 Introduction

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues.

Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. La nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application finale visée.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents types de matériaux composites employés dans l'industrie. Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques [3].

I.2 Historique

L'idée de combiner plusieurs composants pour produire de nouveaux matériaux (matériaux composés) avec de nouvelles propriétés n'est pas nouvelle, car la première utilisation de ces matériaux remonte à 1500 avant JC lorsque les Égyptiens et les premiers Mésopotamiens ont utilisé un mélange d'argile et de paille pour créer des bâtiments solides et durables plus tard et en 1200 après JC, inventé Premier arc à poulies des Moghols. Utilisant une combinaison de bois, d'os et de colle animale, ces bretelles sont très solides et très précises et compactes grâce à la technologie, ce fut l'arme la plus puissante de l'arme au sol jusqu'à l'invention de la poudre à canon [4].

Bien que les matériaux composites soient connus sous diverses formes à travers l'histoire de l'humanité, l'histoire des composés modernes est apparue au XVIIIe siècle, lorsque l'utilisation des matériaux composites s'est étendue à la plupart des domaines industriels.

I.3 Définitions des 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 [5].

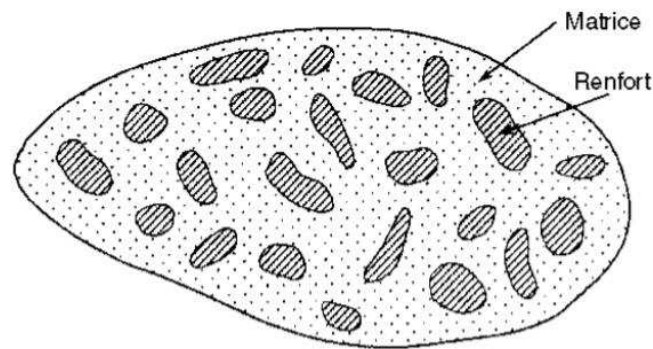


Figure I-1 Schématisation des renforts noyés dans une matrice [5].

I.4 Constituants des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement par les renforts et la matrice (la résine). Les renforts se présentent sous plusieurs formes : armature, squelette, fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la tenue mécanique aux efforts ainsi, la résistance à la traction et à la rigidité. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts, la répartition des efforts, la résistance à la compression ou à la flexion et assure la protection chimique [6].

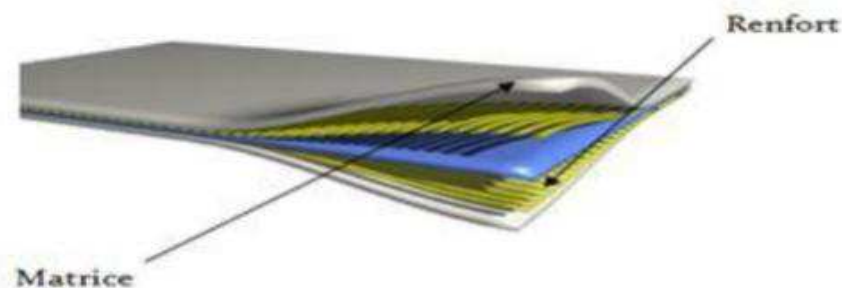


Figure I-2 Constitution d'un matériau composite [6].

I.4.1 Matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes. On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement.

Ces deux types de résines ont la propriété de pouvoir être moulés ou mis en forme, pour obtenir un produit fini ou semi fini dont la forme peut être modifiée. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la Figure I-3 [7].

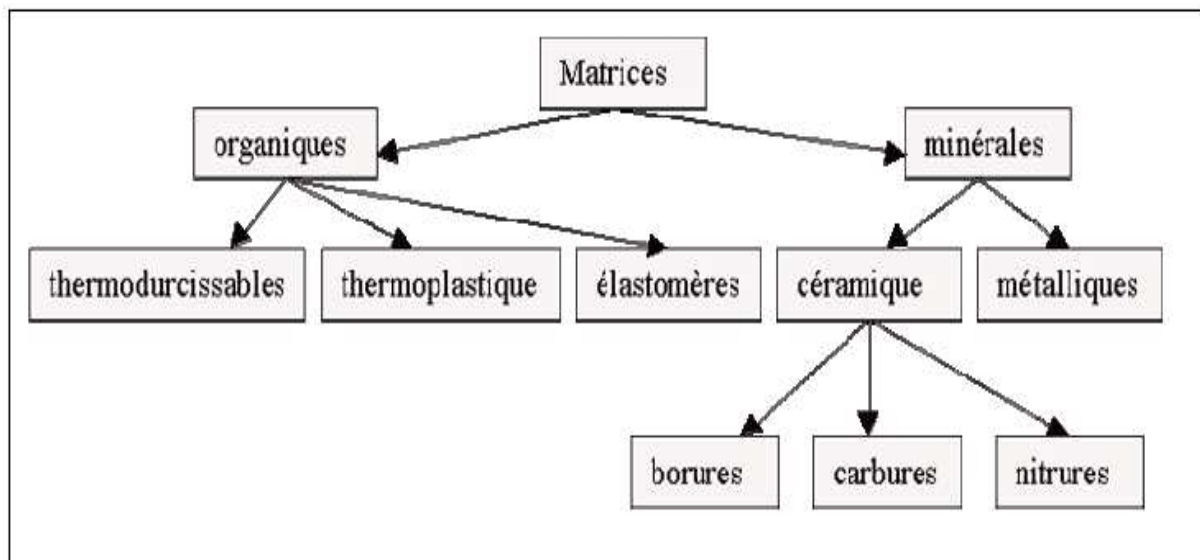


Figure I-3 Différentes familles de matrice [6].

I.4.1.1 Les matrices polymères

a) Les résines thermoplastiques

Les composites à matrice thermoplastique occupent une place de plus en plus importante dans certains secteurs comme l'aéronautique. En effet, ils offrent de nombreux avantages par rapport à leurs homologues thermodurcissables. Les résines thermoplastiques présentent le gros avantage de pouvoir être alternativement ramollies par chauffage et durcies par refroidissement ce qui permet de faciliter leur moulage par viscoplasticité. Cette transformation est par ailleurs réversible, ce qui permet de recycler ce matériau. Les

thermoplastiques sont mis en œuvre lorsque la température est voisine de leur température de transition vitreuse pour les thermoplastiques amorphes, et jusqu'à la température de fusion pour les thermoplastiques semi-cristallins. Renforcée avec des fibres courtes ou avec des fibres longues, l'utilisation de ces résines se développe fortement notamment comme matrice des composites structuraux.

Tableau I-1 Caractéristiques des thermoplastiques [8]

Matrices TP	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
	Mv	E	G	k	C _r	A	α
PP	900	1 200		0.4	30	20 à 400	9*10 ⁻⁵
PPS	1 300	4 000			65	100	5*10 ⁻⁵
PA	1 100	2 000		0.35	70	200	8*10 ⁻⁵
PES	1 350	3 000			85	60	6*10 ⁻⁵
PEI	1 150	3 300			105	60	6*10 ⁻⁵
PEEK	1 300	4 000			90	50	5*10 ⁻⁵

b) Les résines thermodurcissables

Lorsque l'on soumet certains polymères constitués de substances organiques ou semi-organiques à une élévation de température, il se crée des réactions chimiques au cours desquelles les monomères s'associent pour former un réseau tridimensionnel rigide : cette réaction de polymérisation particulière est appelée réticulation. Le matériau final se présente sous la forme d'un corps solide et infusible. La polymérisation étant irréversible ces matériaux ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois (non recyclable). En règle générale, ces résines possèdent une faible résistance à l'impact et une faible tenue en température. Les quatre types de résines couramment utilisées dans l'industrie aérospatiale sont : les époxydes, les bismaléimides, les polyimides et les phénoliques [9].

Les thermodurcissables sont des molécules en forme de réseaux tridimensionnels, maintenus par des liaisons chimiques de forte énergie (liaisons covalentes) établies de manière irréversible lors de la polymérisation.

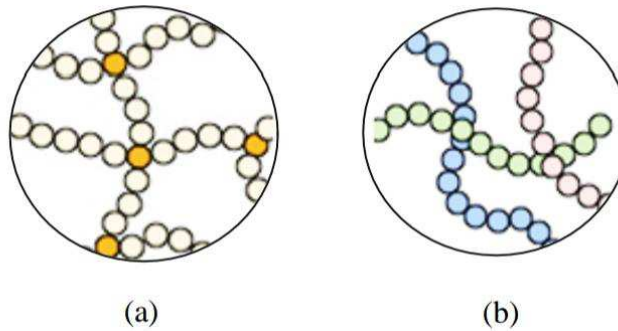


Figure I-4 Structures moléculaires (a) D'un polymère thermoplastique (b) D'un polymère thermodurcissable [9].

Tableau I-2 Caractéristiques des thermodurcissables [10]

Matrices TD	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
	Mv	E	G	k	C _r	A	α
Epoxyde	1 200	4 500	1 600	0,4	130	2	11*10 ⁻⁵
Phénolique	1 300	3 000	1 100	0,4	70	2,5	1*10 ⁻⁵
Polyester	1 200	4 000	1 400	0,4	80	2,5	8*10 ⁻⁵
Polycarbonate	1 200	2 400		0,35	60		6*10 ⁻⁵
Vinylester	1 150	3 300			75	4	5*10 ⁻⁵
silicone	1 100	2 200		0,5	35		
Uréthane	1 100	700 à 7 000			30	100	
Polyimide	1 400	4 000 à 19 000	1 100	0,35	70	1	8*10 ⁻⁵

I.4.1.2 Les matrices céramiques

Pour de plus hautes températures d'utilisation (> 800° C), en raison de leur excellente réfractarité, leurs hauts modules d'élasticité, leurs duretés élevées et leurs bonnes inerties chimiques combinés à leurs masses volumiques relativement faibles (par rapport à celles des métaux), les céramiques apparaissent comme les matériaux de matrice les mieux adaptés.

Leurs associations avec un renfort fibreux (au sein d'un composite) permettent de pallier à leurs principal inconvénient : leurs fragilités. Ainsi, les composites à matrice céramique (CMC) peuvent être envisagés à terme pour la fabrication de pièces de moteur thermique ou d'engins spatiaux, voire pour des applications nucléaires civiles et militaires. Les premiers matériaux combinant des renforts et matrices céramiques sont les matériaux carbone-carbone

qui ont vu le jour dans les années 1960 pour des applications de haute technicité et haute température (aéronautique militaire ou spatial). Ces applications sont coûteuses en raison des budgets importants alloués à ces domaines d'applications. Les Composites à matrice Céramique (CMC) ont connu une évolution majeure en 1969 lorsque une société les a utilisés pour les applications qui auparavant utilisaient des superalliages (à base de cobalt ou de nickel) ou des matériaux monolithiques aux propriétés limitées (poids du tungstène ou fragilité du graphite), toujours pour des applications coûteuses et non « grand public ». C'est en 1986 que ces matériaux ont été introduits pour la première fois dans des structures aéronautiques civiles (les disques de freins sur l'Airbus A310®) [11].

I.4.1.3 Les matrices métalliques

Les composites à matrice métallique ont été développés pour améliorer certaines caractéristiques des métaux ainsi que pour pallier certains inconvénients des composites à matrice organique (température d'utilisation limitée, vieillissement). Le renforcement des métaux et de leurs alliages par des fibres permet une amélioration de la rigidité, de la résistance mécanique et de la tenue à la fatigue à température ambiante (pour les métaux mous comme le plomb) mais également à température élevée (aluminium, titane) [11]. Les métaux les plus souvent utilisés sont : l'aluminium, le magnésium et le titane, pour les hautes températures c'est le cobalt (parfois allié avec du nickel). La matrice métallique donne au matériau composite de nouvelles propriétés. Les plus communes sont : des meilleures propriétés mécaniques, une meilleure résistance au feu et à la température, une meilleure conductivité électrique et thermique, une résistance aux radiations, une imperméabilité au gaz et à l'humidité. Ils sont utilisés dans des domaines très variés : du foret de perceuse (tungstène) à l'aérospatial en passant par l'automobile.

Cependant le facteur qui limite leur exploitation est le coût, bien supérieur à celui des matériaux plus conventionnels. Les recherches sur ces matériaux sont assez récentes (environ une vingtaine d'années) mais ils ont très vite remplacé les matériaux conventionnels dans certaines applications précises : automobile (moteur, frein...) et aéronautique (empennage, train d'atterrissage, turbine...) [2].

I.4.2 Les renforts

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de

fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan [12]. La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la Figure I-5.

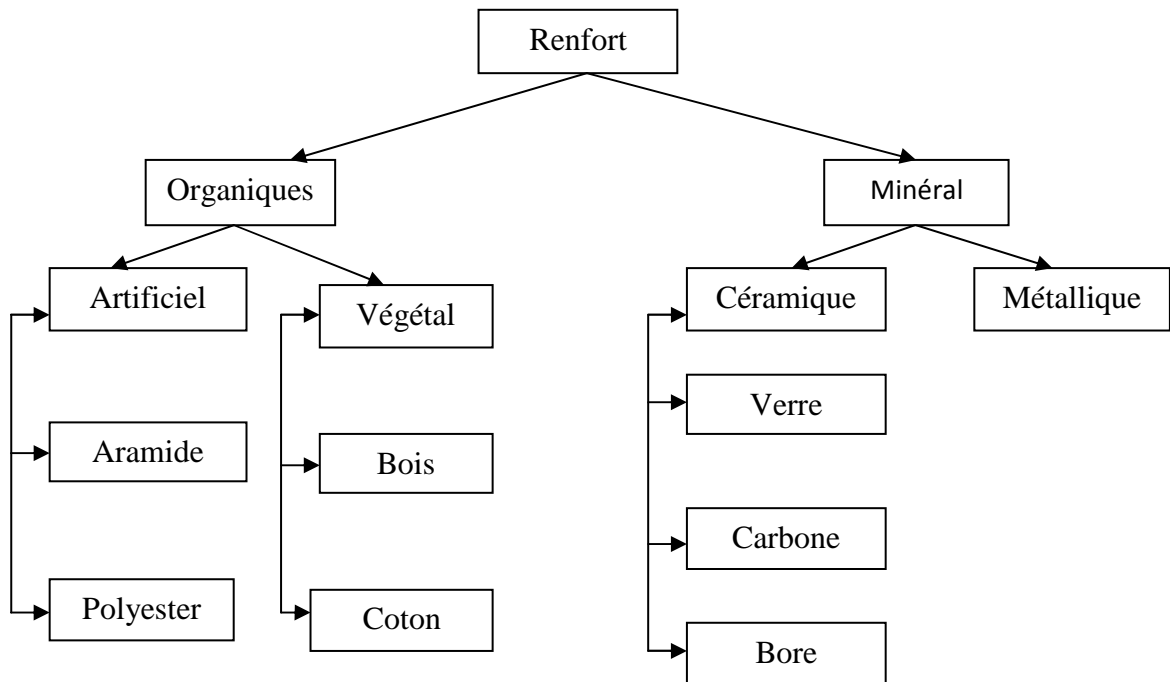


Figure I-5 Les différents types de renfort de base [12].

I.4.2.1 Fibres de verre

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



Figure I-6 Fibres de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande 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:

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

I.4.2.2 Fibres de carbone

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur actuellement, les fibres précurseurs utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir, du polyacryl nitrrique (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur.



Figure I-7 Fibres de carbone

Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitassions. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone.

C'est la fibre la plus utilisées dans les applications de 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 combustion de 1800 à 2000 °C.

I.4.2.3 Fibre aramide

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite.



Figure I-8 *Fibres aramides*

Pour y remédier, des ensimages des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis).

Quelques exemples de fibres aramides : KEVLAR (Dupont de mours, TWARON (Akzo, Allemagne-Hollande), TECHNORA (Teijin, Japon). 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 :

- les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- les fibres haut module: employées dans le renforcement pour les composites hautes performances [13].

I.4.2.4 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.

I.4.2.5 Fibre de silice

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 [7].

I.4.2.6 Fibres céramiques

Les fibres céramiques sont des fibres de type carbure, borure et nitrure. Elles élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Elles sont les plus chères de toutes, en raison de leur difficulté de fabrication (de l'ordre de 1000 euros/kg). Elles sont utilisées dans des applications très spécifiques travaillant à haute température et sous atmosphère oxydante (spatial et nucléaire). Les plus couramment produites sont : les fibres de bore, les fibres

carbure de silicium, les fibres de bore–carbure de bore (B4C) et les fibres de bore–carbure de silicium (BorSic) [4].

I.5 Relation matrice/renfort

Les performances d'un composite sont conditionnées par les propriétés intrinsèques des matériaux constitutifs et dépendent également très étroitement de l'adhésion, donc des interactions échangées entre le renfort et la matrice. Les paramètres responsables de l'adhésion sont nombreux et ont des origines très différentes, ils se répartissent en trois classes :

1. ceux concernant le renfort (nature et composition du renfort, influence du taux et de la taille du renfort) ;
2. ceux concernant la matrice ;
3. et enfin ceux relatifs à l'interface (épaisseur, forces interfaciales renfort matrice, mouillabilité du renfort par la matrice, influence des impuretés).

La diversité des paramètres pousse à ne pas définir un seul modèle d'adhésion mais plusieurs, correspondant chacun à un cas particulier. Il existe deux types de modèles :

- **l'adhésion mécanique**, consiste en un phénomène d'ancrage, d'accrochage mécanique de la matrice dans les pores et aspérités du renfort.
- **l'adhésion spécifique**, qui permet de décrire différents types d'adhésion ; on peut distinguer différents modèles :
 - le modèle électrostatique ;
 - le modèle de la diffusion interfaciale ;
 - le modèle d'adsorption ;
 - le modèle de liaison chimique ;
 - le modèle de Bikerman [7].

I.6 Les additifs

Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques (charges renforçant, ex : charges sphériques creuses 5 à 150 µm). Des charges non renforçant peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices en résine. Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites [6].

I.7 Charges

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé. A l'inverse des matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables ont toujours contenu des charges de nature et de forme variée, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse. Pour un polymère donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini, soit d'améliorer les propriétés mécaniques, soit d'en faciliter la mise en œuvre. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Compatibilité avec la résine de base ;
- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;
- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient [7].

I.8 Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composant, suivant la nature des composant et suivant le type de matériau composite

I.8.1 Classification suivant la forme des constituants

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

I.8.1.1 Composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibre si le renfort se trouve sous forme de fibre. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc.

L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotrope à des matériaux isotropes dans un plan.

I.8.1.2 Composites à particules

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres ne possède pas de dimensions privilégiées.



Figure I-9 Différentes formes de particules

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charge pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques. Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées.

Par exemple, les particules d'élastomères peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragile, de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration [14].

I.8.2 Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature des constituants (nature de la matrice), les composites peuvent être divisés en trois grandes classes, considérées ici par ordre croissant de tenue en température : Composites à matrice organique (pour une utilisation $T < 300\text{ C}^\circ$), Composites à matrice métallique (pour une utilisation à $T < 600\text{ C}^\circ$) et Composites à matrice céramique (pour une utilisation à $T < 1000\text{ C}^\circ$) [4].

I.8.2.1 Composites à matrice organique (CMO)

Les composites à matrice organique sont les plus courants à l'échelle industrielle, se constitués d'une résine polymère renforcée par des fibres (fibre de verre, de carbone, de d'aramide, etc.). Ils sont caractérisés par une faible densité, une résistance mécanique relativement faible, et une grande déformation à rupture. Ce type de composites a été développé surtout pour les applications aéronautiques où la réduction de poids est essentielle.

I.8.2.2 Composites à matrice métallique (MMC)

Dans ces composites, la matrice est un métal ou un alliage léger tel que l'aluminium, le magnésium ou le titane sont renforcés par des renforts généralement non-métalliques, souvent des céramiques. Les composites à matrice métallique ne sont pas aussi largement utilisés que leurs homologues en organiques, très coûteux, ils caractérisés par une haute résistance, fracture la ténacité, résister à une température élevée. Leurs applications dans les moteurs d'automobile sont bien établies.

I.8.2.3 Composites à matrice céramique (CMC)

S'agit d'une matrice de céramique renforcée de fibres courtes ou de filaments. Matrice et renforts sont tous deux constitués de matériaux tels que le carbure de silicium, le carbone ou l'alumine. Ce type des composites sont caractérisé par un points de fusion élevés, bon résistance à la corrosion, stabilité aux températures élevées et haute résistance à la compression, beaucoup plus coûteux, utilisé dans des environnements sévères et réservé aux applications de très haute technicité comme dans les moteurs de fusées, les boucliers thermiques, ou les turbines à gaz [4].

I.8.3 Classification suivant la structure des matériaux composites

I.8.3.1 Monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes [15].

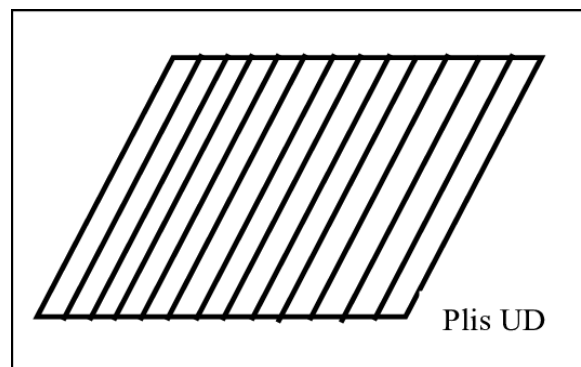


Figure I-10 composite monocouche [15].

I.8.3.2 Composites tissés

Beaucoup de pièces en matériaux composites sont fabriqués à l'aide de tissus. Dans ces structures, les fibres sont alignées en fils et formés suivant des motifs.

Après la mise en forme finale, la matrice se présente à deux niveaux :

- au sein des fils,
- au sein du tissu.

Les motifs utilisés dans le tissage des composites peuvent avoir des formes variés.

- Une couche de fils ;
- L'épaisseur est obtenue en cousant plusieurs couches entre elles ;
- En empilant des couches pour former un stratifié.

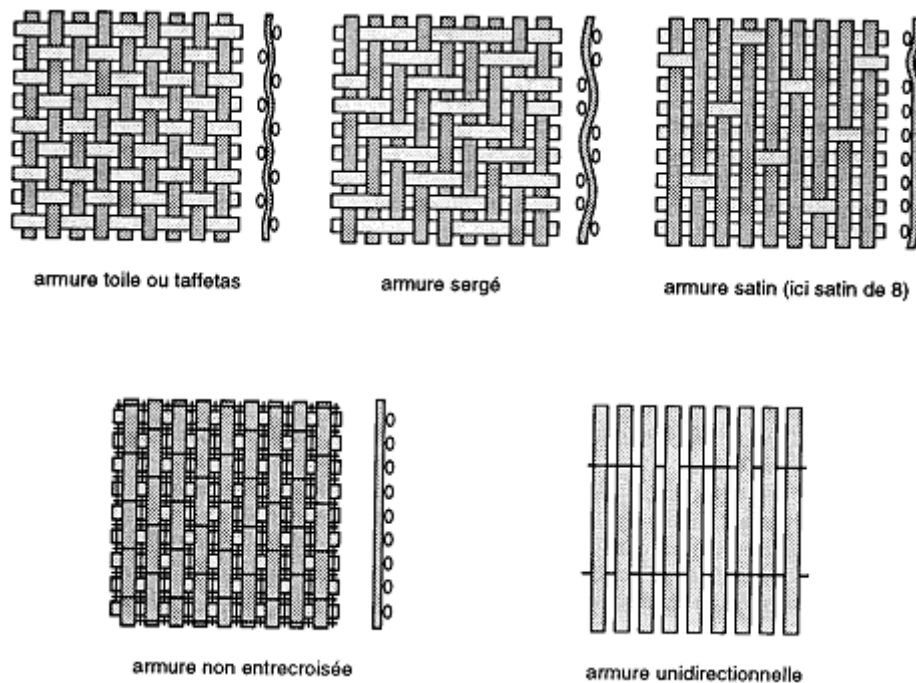


Figure I-11 Exemples de tissus plans courants

Il existe d'autres tissus en forme tridimensionnels qui possèdent des fils dans plusieurs directions. Ce type de tissage permet de réaliser des pièces avec des épaisseurs variables qui résistent mieux à l'arrachement, Mais ce type de fabrication est plus complexe.

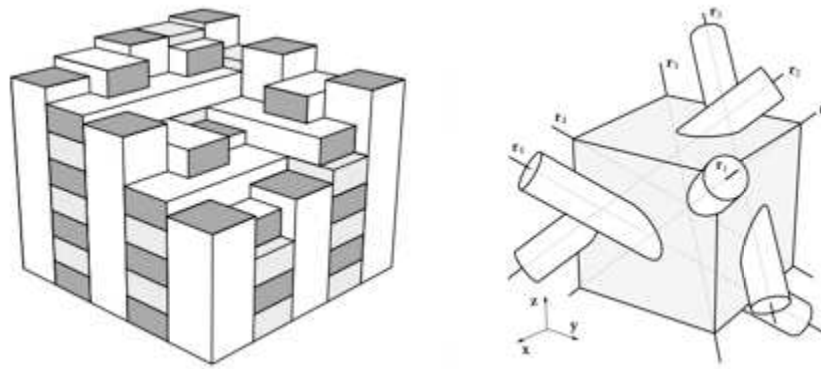


Figure I-12 Exemples de tissus tridimensionnels

I.8.3.3 Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. La figure ci-après représente un matériau composite stratifié.

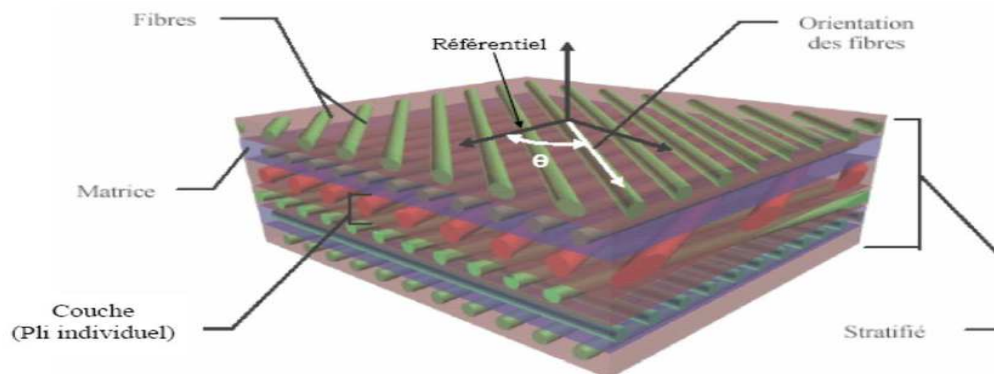


Figure I-13 composite stratifié [15].

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. Un stratifié possédant l'empilement $(0, +45, +90, -45)_2s$ est un stratifié avec quatre couches dans les directions 0° , -45° , 90° et $+45^\circ$, l'orientation 0° coïncidant avec la direction une du repère principal du composite. Ces plans seront réparties symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié.

On pourra avoir des stratifiés de type :

- Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientée suivant la direction $+\theta$ que de couches orientée suivant la direction $-\theta$;
- Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen ;

- Orthogonal : stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches 90° .

I.8.3.4 Les sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou noyau) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique. La figure ci-après représente un matériau composite sandwichs [14].

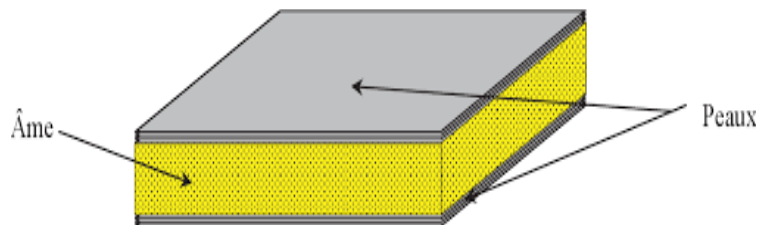


Figure I-14 Composite sandwichs [15].

- **Le noyau :** Il existe un grand nombre de matériaux qui peuvent être utilisés comme noyau. Ces matériaux sont divisés en trois classes :
 - Matériaux solides à faible densité : balsa et d'autres types de bois ;
 - Matériaux à haute densité augmentés en forme cellulaire : nid d'abeilles ;
 - Matériaux à haute densité augmentés sous la forme ondulée : feuilles ondulées.
- **La peau :** Une large variété de matériaux est utilisée comme peau, par exemple : les feuilles de métaux comme l'aluminium, le titane, etc. Le choix des matériaux utilisés comme peau est important du point de vue de l'environnement de travail, car la présente partie entre en contact direct avec ce dernier [15].

I.8.4 Classification suivant le type de matériau composite

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

I.8.4.1 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, SMC et injection).

I.8.4.2 Matériaux composites de 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. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%. Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- Drapage autoclave, enroulement filamentaire.
- Beaucoup de procédés encore manuels [16].

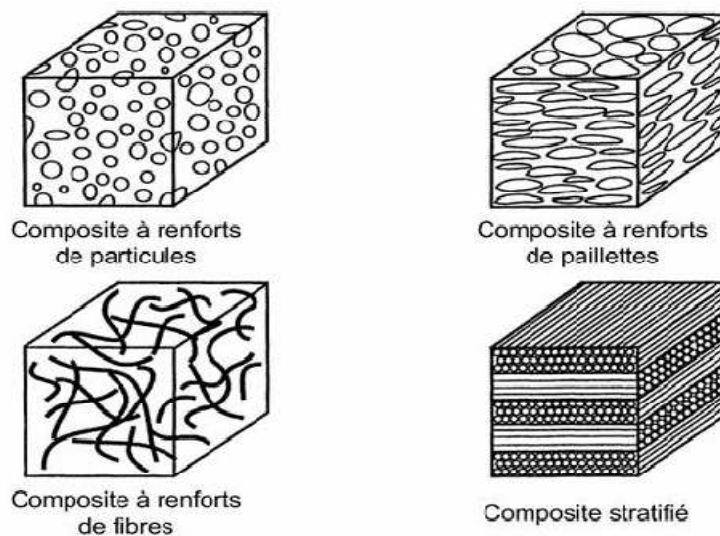


Figure I-15 Classification des matériaux composites [17].

I.9 Avantage des matériaux composites

- Bon rapport résistance/poids;
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage);
- Grande résistance à la fatigue;
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone) [18].

I.10 Inconvénients des matériaux composites

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température;
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes;
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques;
- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries [18].

I.11 Mise en œuvre des matériaux composites

Le but de ce paragraphe est de présenter les différentes techniques de mise en œuvre des composites dans leur globalité et de préciser dans quels cas elles sont utilisées. Il existe plusieurs méthodes pour élaborer et mettre en forme les composites qui peuvent être regroupées en catégorie :

- par extrusion, très utilisée avec les thermoplastiques ;
- par imprégnation, utilisée souvent avec les tissus et les fils ;
- par dépôt pour les composites en sandwichs.

Ces techniques sont souvent suivies d'un moulage qui définit les formes du matériau. Le moulage peut être réalisé de plusieurs façons :

- Par compression (à froid, à chaud, par injection de résine) : pour obtenir des formes profondes et délicates. Il s'agit d'une méthode utilisée pour les composites à fort taux de renfort ou des pièces produites en grande quantité ;
- Sous pression (au contact, à injection simultanée) : méthode la plus simple permettant l'obtention de pièces en grande série et à bas prix. Le taux de renfort est toutefois limité;
- Sous vide (pour des pièces de petites et moyennes séries) ;
- En continu : les pièces obtenues sont planes ou ondulés, les composites en sandwichs sont souvent préparés par cette technique ;
- Par pultrusion qui intervient d'habitude après imprégnation des fibres (fils, stratifils, tissus), les profils obtenus sont rectilignes ou en courbes à section constante. Cette technique donne des matériaux à caractéristiques mécaniques élevées suivant l'axe car les taux de fibres peuvent atteindre 80% ;
- Par centrifugation : technique réservée pour les formes cylindriques (tubes, tuyaux) ;

- par enroulement filamentaire (circonférentiel, hélicoïdal, mandrin) permettant la conception de pièces (cylindriques et sphériques) avancées. La proportion de fibres dans le composite peut atteindre 80% donc de hautes caractéristiques mécaniques. Néanmoins, c'est une méthode très coûteuse.

La conception d'un matériau composite dépend du type d'application, de chargement, etc. Ce qui le diffère fortement des matériaux classiques, où la conception d'une structure est adaptée en fonction du matériau constitutif. Il est évident de voir que la qualité et la convenance d'un matériau composite dépendent du choix de ces deux composants de base (matrice et fibres) en fonction des applications spécifiques qui lui sont envisagées.

Deux dispositifs fondamentaux doivent être atteints:

- il est essentiel que le liquide qui enveloppe les fibres pendant la formation du composé réalise leur mouillage spontanément, c'est-à-dire que l'énergie d'adhésion résultant de ce contact doit surmonter l'énergie cohésive du polymère.
- les performances mécaniques seront améliorées si la ligne formée par l'interface comporte des enchevêtrements macromoléculaires résultant de la diffusion dans la matrice polymère et des chaînes greffées sur les fibres [19].

I.11.1 L'injection

Le moulage par injection de composite thermoplastique (chargé par fibres ou particules) ne diffère du procédé classique d'injection que par le produit injecté. Le moulage par injection consiste à injecter à l'aide d'une vis, un polymère fondu dans une cavité dont les parois sont maintenues à une température inférieure à la température de solidification ou de transition vitreuse du thermoplastique utilisé. Ce procédé permet la production de pièces de tailles et de complexités géométriques très différentes, et satisfaisantes à des exigences dimensionnelles de plus en plus sévères [20]. L'application du procédé d'injection s'étend des grandes pièces utilisées dans l'industrie automobile, comme le suggère la Figure 1.17, jusqu'à des pièces beaucoup plus petites, telles que celles utilisées dans l'industrie électromécanique (boîtiers de commande, interrupteurs électriques, etc. ...).

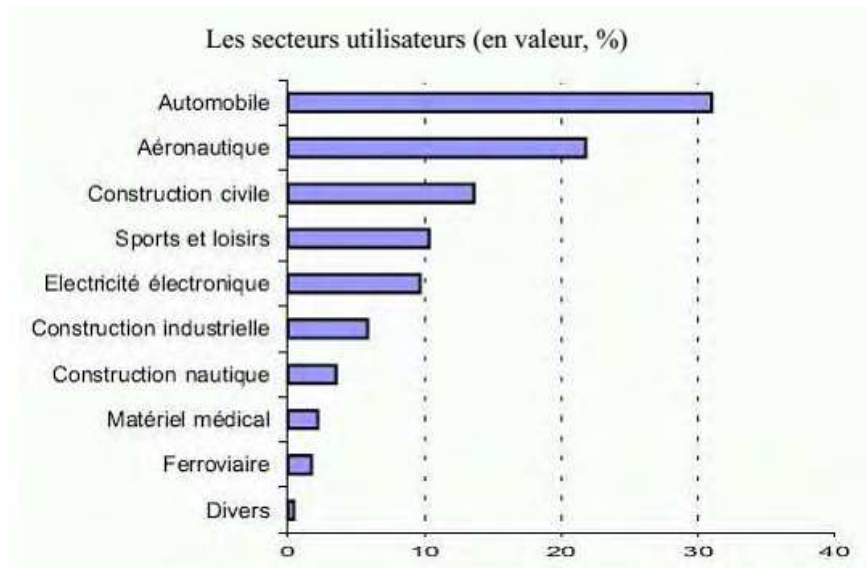


Figure I-16 Application industrielle des thermoplastiques chargés de fibres

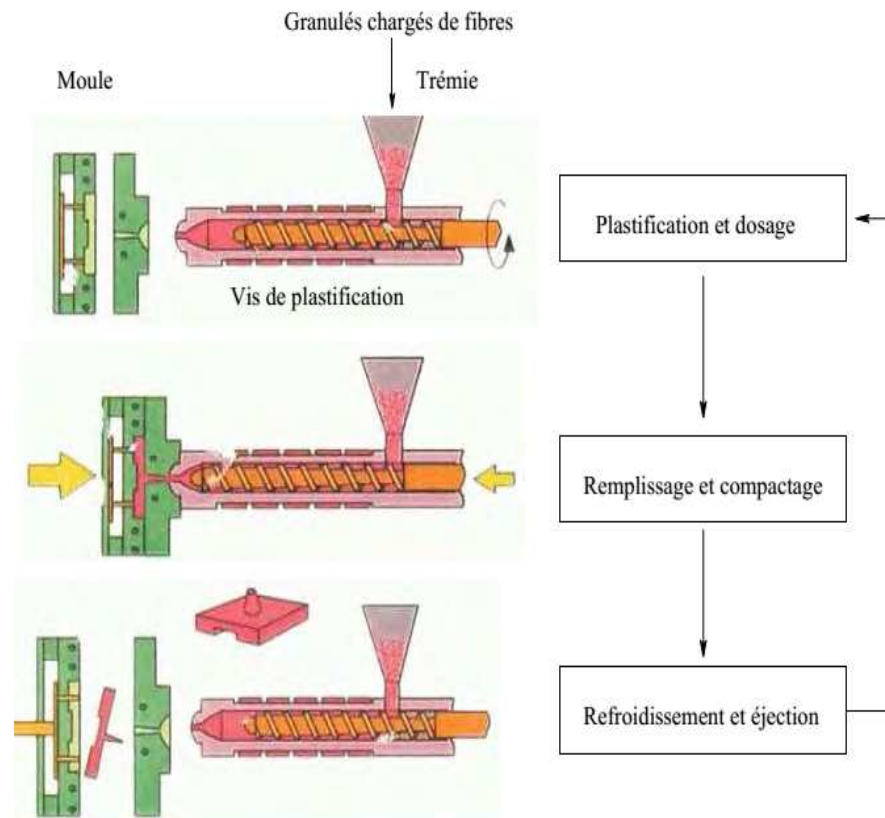


Figure I-17 Cycle d'injection : les différentes phases

I.11.2 L'extrusion

Le terme extrusion est souvent lié à la phase de compoundage qui permet de réaliser le mélange des renforts et de la matrice pour la fabrication des granulés. L'extrusion ne peut être limitée à la seule fabrication de semi-produit et constitue une technique de transformation pour la réalisation de profilés en continu [21]. Diverses méthodes de

compoundage par extrusion/granulation existent mais le principe est identique et est présenté ici à travers la méthode la plus répandue pour les composites à fibres de verre, à savoir un dosage séparé sur extrudeuse double-vis (Figure I.18).

La matrice thermoplastique est insérée au début de l'extrudeuse et subit la première transformation, sa fusion (Zone 1), les Fibres coupées à une longueur de l'ordre de 3mm sont alors ajoutées à la matrice fondue (Zone 2), la dernière phase correspond à l'homogénéisation du mélange et au dégazage (Zone 3). Cette dernière est responsable de la diminution de la longueur des fibres. A la sortie de l'extrudeuse, un jonc de composite est obtenu qui est alors refroidi puis broyé pour obtenir les granulés de matière première nécessaire à la mise en forme finale via moulage par injection [22].

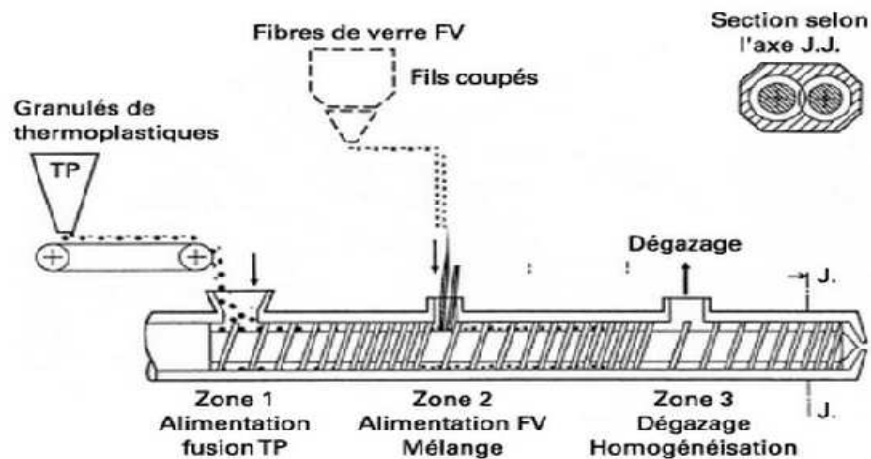


Figure I-18 Schématisation d'une extrudeuse double vis

I.11.3 La pultrusion

La pultrusion des composites à matrice thermoplastique est un procédé récent permettant de fabriquer en continu un matériau composite à haute valeur ajoutée en particulier pour le secteur aéronautique. Le procédé de pultrusion est réalisé à partir de fibres longues qui sont guidées vers une filière chaude où une résine thermoplastique est injectée. A la sortie de la filière et après refroidissement, on obtient un profilé qui peut présenter une géométrie complexe. Le problème principal dans ce procédé réside dans l'imprégnation du renfort par la matrice qui est freinée par la forte viscosité du polymère thermoplastique à l'état liquide. Diverses études ont été conduites sur ce problème, mais la

majorité d'entre elles restent théoriques et le procédé de pultrusion thermoplastique n'a toujours pas aujourd'hui d'application industrielle [20].

Coroller et al. [20] ont montrés expérimentalement qu'il y a des différences de module d'Young allant jusqu'à 28% entre un même composite injecté ou extrudé. De manière générale les composites injectés présentent les meilleures caractéristiques mécaniques par rapport à un composite extrudé, ceci est particulièrement vrai pour les composites renforcés par des fibres végétales. Les paramètres du processus ont donc un impact important sur la microstructure du composite.

I.12 Domaines d'application

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en terme de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les 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 D'où leurs domaines d'application:

- 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 [23].

I.12 Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux très variés, disponibles partout, et connaissent actuellement un essor important dans tous les domaines d'application, particulièrement dans la construction navale, vu leurs performances mécaniques très élevées. Leurs caractéristiques mécaniques dépendent :

- Des propriétés intrinsèques des constituants de base ;
- Des distributions géométriques des constituants ;
- De l'interaction entre les différents constituants, etc.

Le choix des constituants de base ainsi que les techniques et le procédé de mise en œuvre ont une influence directe sur l'architecture et le comportement mécanique du matériau composite.

Chapitre II

Etude analytique

II.1 Introduction

Les polymères renforcés par des particules se sont retrouvés dans des structures secondaires légèrement chargées, dans lesquelles la rigidité domine la conception, mais dans laquelle il doit y avoir également une augmentation notable de la résistance sur le polymère non renforcé [24], car ils offrent non seulement des propriétés mécaniques supérieures, mais ils peuvent également être facilement produits [25]. Nombreux modèles prédisant le module élastique des composites à particules, certains seront discutés.

II.2 Arrangement des particules

Dans l'analyse théorique, les particules sont supposées avoir des arrangements uniformes, chaque particule a une forme circulaire et le même diamètre. Comme pour les composites renforcés par des fibres courtes, les arrangements utilisés sont carré et hexagonale (illustré dans la Figure II.1).

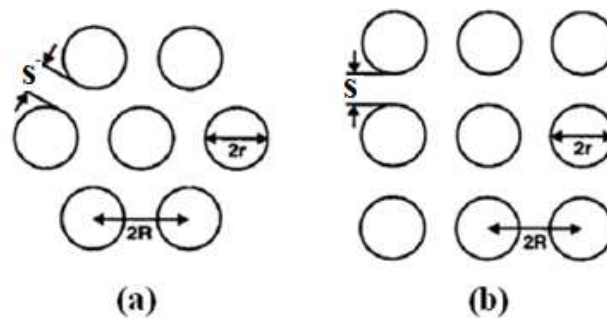


Figure II-1 Distance entre particules, (a) hexagonale et (b) carré

II.2.1 Arrangement hexagonale

L'arrangement de fibres de ce type est représenté schématiquement sur la Figure II.1, supposons qu'il y a des N particules dans le composite. Considérant l'élément hexagonal (Figure II.1 (a)) et selon la définition de la fraction volumique de fibres d'un composite, dans ce cas la fraction volumique maximale de particules est calculé comme suit :

$$V_{fmh} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{r}{R_{\min}} \right)^2 \quad (\text{II.1})$$

II.2.2 Arrangement carré

L'arrangement de fibre dans ce cas est montré dans la Figure II.1 (b), et nous avons en conséquence :

$$V_{fms} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r}{R_{\min}} \right)^2 \quad (\text{II.2})$$

Réarrangé les équations Eq II.1 et Eq II.2 on aura la distance s entre les particules dans les deux arrangements idéales :

$$s = 2 \left[\left(\frac{\pi}{2\sqrt{3}V_f} \right)^{1/2} - 1 \right] r \quad (\text{Hexagonale}) \quad (\text{II.3})$$

$$s = 2 \left[\left(\frac{\pi}{4V_f} \right)^{1/2} - 1 \right] r \quad (\text{Carré}) \quad (\text{II.4})$$

Ces arrangements idéals sont généralement utilisés pour développer des modèles micromécaniques en raison de leur simplicité. Cependant, ils ne sont pas observés dans les composites réels sauf dans quelques régions localisées. Le mélange des arrangements dans une section transversale varie en fonction de la fraction volumique des particules et de l'espacement entre les particules adjacentes et peut être lié à la fraction volumique des particules empiriquement [26]:

$$s = 2 \left[(1.8 - 0.75V_f) V_f \right]^{-1/2} \quad (\text{II.5})$$

L'une des principales conséquences de la non-uniformité de l'arrangement est la difficulté d'obtenir des fractions volumiques supérieures à 0,7, ce qui est considéré comme la limite pratique pour les matériaux commerciaux.

Le développement d'équations micromécaniques pour les composites particuliers suit les mêmes lignes que celles pour les composites renforcés de fibres continues. Dans le cas de composites renforcés de particules, les particules de différentes formes et tailles sont dispersées uniformément dans le matériau liant et elles sont supposées être disposées selon un motif de réseau régulier comme un carré ou un hexagone [27].

Les hypothèses suivantes ont été faites dans la micromécanique actuelle des composites particulières:

1. Le composite est composé de deux phases - particules et liant (matrice).
2. Chaque phase du composite peut être décrite par la mécanique continue. Par conséquent, les paramètres d'entrée sont les modules, les coefficients de Poisson, les coefficients de dilatation thermique et les conductivités thermiques des phases individuelles.
3. La micromécanique est caractérisée par des valeurs moyennes de propriétés du composites et des contraintes moyennes des constituants sur une certaine région.
4. L'interface entre la particule et le liant a été supposée être une liaison parfaite.
5. Les propriétés des phases individuelles sont supposées isotropes [28].

Les propriétés mécaniques d'une matrice thermoplastique renforcée de particules dépendent de facteurs tels que la fraction volumique, la forme des particules et la distribution spatiale au sein de la matrice [29], les propriétés de la matrice influe aussi sur le comportement du composite [30]. Bien qu'il s'agisse d'un problème très complexe, différentes méthodes ont été proposées pour estimer les modules élastiques efficaces du composite.

II.3 Théories du module élastique

Le module élastique d'un composite à particules renforçant une matrice polymère est généralement déterminé par les propriétés élastiques de ses composants (particules et matrice), la charge et le rapport d'aspect.

a) Modèle de Hashin et Shtrikman

Ils ont proposés les limites supérieure et inférieure pour un agrégat isotrope basé sur les principes variationnels de l'élasticité linéaire :

$$K^{upper} = K_R + (1-f) \left[\frac{1}{K_M - K_R} + \frac{3f}{3K_R + 4\mu_R} \right]^{-1} \quad (\text{II.6})$$

$$K^{lower} = K_M + f \left[\frac{1}{K_R - K_M} + \frac{3(1-f)}{3K_M + 4\mu_M} \right]^{-1} \quad (\text{II.7})$$

$$\mu^{upper} = \mu_R + (1-f) \left[\frac{1}{\mu_M - \mu_R} + \frac{6f(K_R + 2\mu_R)}{5\mu_R(3K_R + 4\mu_R)} \right]^{-1} \quad (\text{II.8})$$

$$\mu^{lower} = \mu_M + f \left[\frac{1}{\mu_R - \mu_M} + \frac{6(1-f)(K_M + 2\mu_M)}{5\mu_M(3K_M + 4\mu_M)} \right]^{-1} \quad (\text{II.9})$$

Où K et μ sont les modules de masse et de cisaillement, respectivement, et f est la fraction volumique des particules de renforcement. Les indices supérieurs, inférieur, M et R font respectivement référence aux estimations des bornes supérieure et inférieure et à la matrice et au renforcement. Étant donné les modules de la matrice et du renfort, les bornes globales du module d'Young sont alors obtenues par les équations précédentes et la relation suivante entre E , K et μ :

$$E = \frac{9K}{1 + 3\left(\frac{K}{\mu}\right)} \quad (\text{II.10})$$

Mura a fourni des estimations des concentrations finies de renforts. En considérant la géométrie du renfort comme étant sphérique, les expressions pour les modules effectifs sont :

$$\mu = \mu_M \left[\frac{1 + f(\mu_M - \mu_R)}{\mu_M + 2(\mu_R - \mu_M) \frac{4 - 5\nu_M}{15(1 - \nu_M)}} \right]^{-1} \quad (\text{II.11})$$

$$K = K_M \left[\frac{1 + f(K_M - K_R)}{K_M + \frac{1}{3}(K_R - K_M) \frac{1 + \nu_M}{1 - \nu_M}} \right]^{-1} \quad (\text{II.12})$$

Où ν est le coefficient de Poisson. Le module de Young du composite est ensuite obtenu à partir de l'équation (II.12). Les résultats basés sur cette approche ne sont valables que pour des fractions volumiques relativement petites (inférieures à environ 0,25) de particules de renforcement [30].

b) Modèle de Kroner and Budiansky

Le module de Young efficace des composites à renforts sphériques, avec une fraction volumique importante (supérieure à 0,5), peut être prédite par une méthode auto-cohérente. Cette méthode est également basée sur le modèle d'inclusion équivalent d'Eshelby, mais suppose que les modules du milieu infini sont égaux aux modules globaux du composite. Pour les inclusions sphériques, la relation est donnée par :

$$\mu = \mu_M + \frac{f\mu(\mu_R - \mu_M)}{\mu + 2(\mu_R - \mu)(4 - 5\nu)(15(1 - \nu))^{-1}} \quad (\text{II.13})$$

$$K = K_M + \frac{fK(K_R - K_M)}{K + \frac{1}{3}(K_R - K)(1 + \nu)(1 - \nu)^{-1}} \quad (\text{II.14})$$

Le module normal du composite particulière est donné par :

$$E = \frac{\nu_f^{0.67} E_m}{1 - \nu_f^{0.33} \left(1 - \frac{E_b}{E_p}\right)} + (1 - \nu_f^{0.67}) E_m \quad (\text{II.15})$$

c) Modèle de module de Young équivalent

$$E_{eq} = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2} \quad (\text{II.16})$$

Avec

E_1 : module de Young de la particule

E_2 : Module de Young de la matrice [31].

d) Modèle de loi de mixture

En première approximation, la limite supérieure du module élastique dans un composite E_c peut être estimée à l'aide de la loi de mixture simple exprimée :

$$E_c = V_m E_m + \sum E_p V_p \quad (\text{II.17})$$

Où V_m , E_m , V_p et E_p sont respectivement la fraction volumique et le module élastique de la matrice et de renfort.

Pour les systèmes à deux composants, la limite inférieure du module élastique est approchée comme :

$$E_c = \frac{E_m E_p}{V_p E_m + V_m E_p} \quad (\text{II.18})$$

Où les indices m et p indiquent la matrice et la phase de renforcement (les particules), respectivement [32].

e) Modèle d'Einstein

Sur la base de l'hypothèse que les particules sont rigides, pour prédire le module d'Young du composite à particule, l'équation (II.19) est utilisée :

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + 2.5V_p \quad (\text{II.19})$$

Cette équation n'est valable qu'à de faibles concentrations de particule et suppose une adhésion parfaite entre le renfort et la matrice [33].

f) Modèle de Guth

Guth [34] a ajouté un terme d'interaction de particules dans l'équation d'Einstein qui devient :

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + 2.5V_p + 14.1V_p^2 \quad (\text{II.20})$$

Où le terme linéaire est l'effet de rigidité des particules individuelles et le deuxième terme de puissance est la contribution de l'interaction des particules.

g) Modèle de Halpin and Tsai

Ils ont constaté que le module des polymères particuliers peut être prédit par la relation semi-empirique [35]

$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{1 + A_1 B_1 V_p}{1 - B_1 V_p} \quad (\text{II.21})$$

Où A_1 et B_1 sont des constantes pour un composite donné. A_1 est fonction de la forme des particules et du coefficient de poisson de la matrice, B_1 est lié au module de la particule (E_p) et de la matrice (E_m).

$$B = \frac{(E_p/E_m - 1)}{(E_p/E_m + A)}$$

Avec : $A = 2l/d$

h) Modèle de Kerner

Kerner a élaborée une équation pour estimer le module du composite qui contient des particules de forme sphériques dans la matrice

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + \frac{V_p}{(1 - V_p)} \times \frac{15(1 - \nu_m)}{(8 - 10\nu_m)} \quad (\text{II.22})$$

e) Modèle de Mooney

Mooney a apporté une autre modification à l'équation d'Einstein comme suit:

$$\frac{E_c}{E_m} = \exp\left(\frac{2.5V_p}{1 - sV_p}\right) \quad (\text{II.23})$$

Où s est un facteur d'encombrement pour le rapport du volume apparent occupé par la particule à son propre volume réel, et sa valeur se situe entre 1 et 2.

Pour les particules non sphériques, l'équation de Mooney est encore modifiée comme suit :

$$\frac{E_c}{E_m} = \exp\left(\frac{2.5V_p + 0.407(P-1)^{1.508}V_p}{1 - sV_p}\right) \quad (\text{II.24})$$

Où P est le rapport d'aspect de la particule avec $1 \leq P \leq 15$

i) Modèle de Counto

Counto a suggéré l'équation suivante pour estimer le module de Young en supposant une liaison parfaite entre la charge et la matrice:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1-V_p^{1/2}}{E_m} + \frac{1}{\left(1-V_p^{1/2}\right) \left(V_p^{1/2}E_m + E_p\right)} \quad (\text{II.25})$$

Ce modèle prédit des modules en bon accord avec une large gamme de test.

j) Modèle de Ishai and Cohen

Ils ont supposé que les deux constituants sont dans un état de contrainte macroscopiquement homogène et que l'adhérence est parfaite à l'interface d'une inclusion cubique dans une matrice cubique. Lorsqu'une contrainte uniforme est appliquée sur la limite, le module élastique du composite a particule est donné par:

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + \frac{1 + (\delta - 1)V_p^{2/3}}{1 + (\delta - 1)(V_p^{2/3} - V_p)} \quad (\text{II.26})$$

Ce qui est une solution de limite supérieure. En utilisant le même modèle, avec une déformation uniforme appliquée à la limite, la solution de la borne inférieure est obtenue:

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + \frac{V_p}{\delta / ((\delta - 1) - V_p^{1/3})} \quad (\text{II.27})$$

Où $\delta = \frac{E_p}{E_m}$.

k) Modèle de Verbeek

Verbeek a fourni un autre modèle pour évaluer le module du composite par l'équation suivante:

$$E_c = \chi_p E_p V_p + E_m (1 - V_p) \quad (\text{II.28})$$

$$\text{Où } \chi_p = 1 - \frac{\tanh(V_{p \max})}{V_{p \max}}$$

Le modèle suppose une adhésion parfaite entre les phases et que la contrainte est transférée via un mécanisme de cisaillement [33].

II.4 Calcul des dimensions des particules

Dans ce composite on a utilisé des formes différentes de renforts : circulaire, triangulaire, carrée, rectangulaire (vertical et horizontal), pentagonale, hexagonale, forme 1 et forme 2. Pour le calcul des dimensions des particules on a pris une matrice carrée de longueur $l_m = 150 \mu\text{m}$ renforcé par neuf particules, les dimensions sont calculées pour des fractions volumiques 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30.

II.4.1 Forme circulaire

Dans le cas des renforts circulaires, on cherche à calculer le diamètre des particules, en utilisant la formule (II.29), on aura :

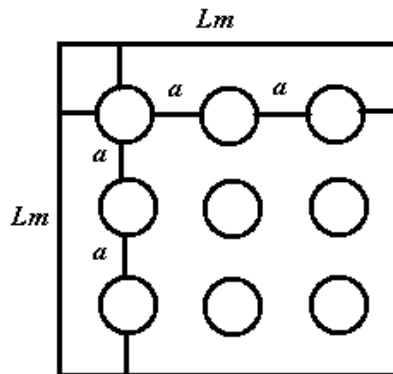


Figure II-2 Composite renforcés par Neuf particules circulaires

$$V_f = \frac{V_{particle}}{V_{total}} = \frac{N_p (\pi d_p^2 / 4)}{l_m l_m} \Rightarrow d_p = \sqrt{\frac{4V_f l_m^2}{N_p \pi}} \quad (\text{II.29})$$

Pour calculer la distance entre les particules dans le cas des arrangements régulier (carrée et hexagonale), on utilise la formule (II.30).

$$a = \frac{(l_m - (3 \times d_p))}{3} \quad (\text{II.30})$$

Les résultats trouvés sont regroupés dans le Tableau II.1

Tableau II-1 Dimension des particules circulaires

V_f	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
d_p	12.62	17.85	21.86	25.24	28.22	30.91

II.4.2 Forme Carrée

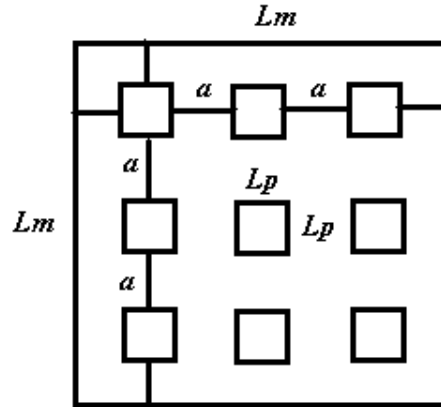


Figure II-3 Composite renforcés par Neuf particules carrées

$$V_f = \frac{V_{particle}}{V_{total}} = \frac{N_p \times (l_p \times l_p)}{l_m \times l_m} \Rightarrow l_p = \sqrt{\frac{V_f \times l_m^2}{N_p}} \tag{II.31}$$

$$a = \frac{(l_m - (3 \times l_p))}{3} \tag{II.32}$$

Tableau II-2 Dimension des particules carrées

V_f	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
l_p	11.18	15.81	19.36	22.36	25	27.38

II.4.3 Forme rectangulaire

Dans le cas d'un rectangle, la distance entre les particules est différente dans le sens horizontale et verticale, pour cela on calcul a_1 et a_2 .

$$V_f = \frac{V_{particle}}{V_{total}} = \frac{N_p \times (2l_p \times l_p)}{l_m \times l_m} \Rightarrow l_p = \sqrt{\frac{V_f \times l_m^2}{2N_p}} \tag{II.33}$$

$$a1 = \frac{(l_m - (6 \times l_p))}{3} \tag{II.34}$$

$$a2 = \frac{(l_m - (3 \times l_p))}{3} \tag{II.35}$$

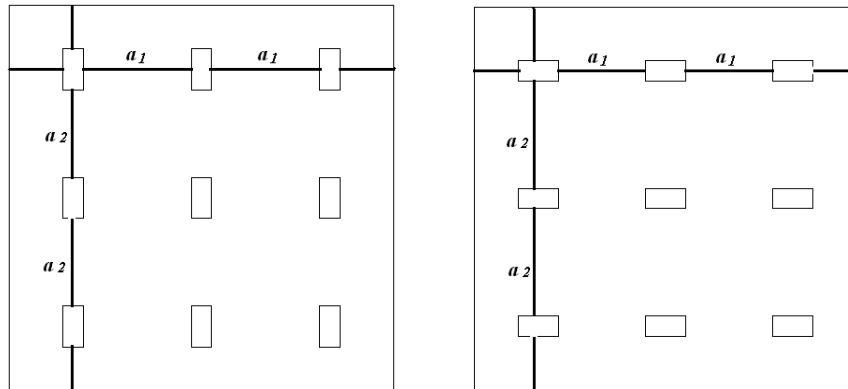


Figure II-4 Composite renforcés par Neuf particules rectangulaires

Tableau II-3 dimension des particules rectangulaires

V_f	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
l_p	7.90	11.18	13.69	15.81	17.67	19.43

II.4.4 Forme Triangulaire

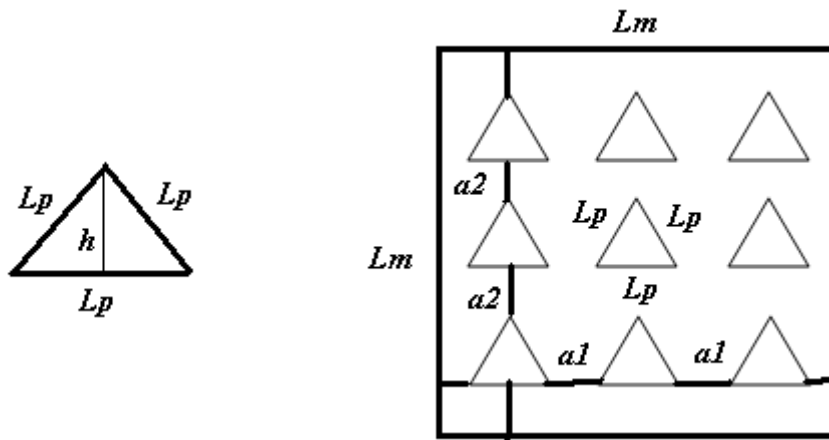


Figure II-5 Composite renforcés par Neuf particules triangulaires

$$\sin 60 = \frac{h}{l_p} \Rightarrow h = l_p \times \sin 60 \tag{II.36}$$

$$V_f = \frac{V_{particle}}{V_{total}} = \frac{N_p \times \frac{(l_p \times h)}{2}}{l_m \times l_m} \Rightarrow l_p = \sqrt{\frac{2 \times V_f \times l_m^2}{N_p \times \sin 60}} \tag{II.37}$$

$$a_1 = \frac{(l_m - (3 \times l_p))}{3} \tag{II.38}$$

$$a_2 = \frac{(l_m - (3 \times h))}{3} \tag{II.39}$$

Tableau II-4 Dimension des particules circulaires

V_f	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
l_p	17.00	24.04	29.44	34.00	38.01	41.64

II.4.5 Forme Pentagonale

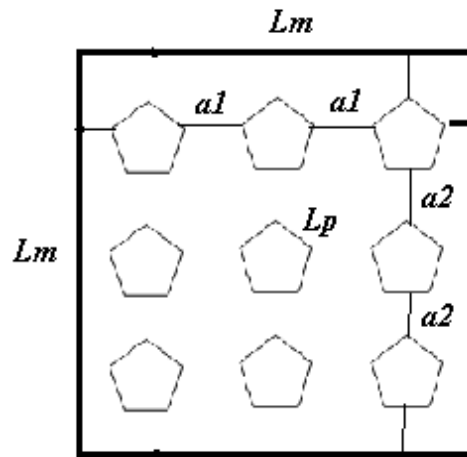


Figure II-6 Composite renforcés par Neuf particules pentagonales

$$V_f = \frac{V_{particle}}{V_{total}} = \frac{N_p \times 5 \times \frac{(l_p^2)}{4 \times \tan 36^\circ}}{l_m \times l_m} \Rightarrow l_p = \sqrt{\frac{4 \times V_f \times l_m^2 \times \tan 36^\circ}{5 \times N_p}} \tag{II.40}$$

$$a_1 = \frac{(l_m - 6(\sin 54 \times l_p))}{3} \tag{II.41}$$

$$a_2 = \frac{(l_m - 3l_p \times ((\tan 54 / 2) + (1 / 2 \cos 54)))}{3} \tag{II.42}$$

Tableau II-5 Dimension des particules pentagonales

V_f	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
l_p	8.52	12.05	14.76	17.05	19.05	20.88

II.4.6 Forme Hexagonale

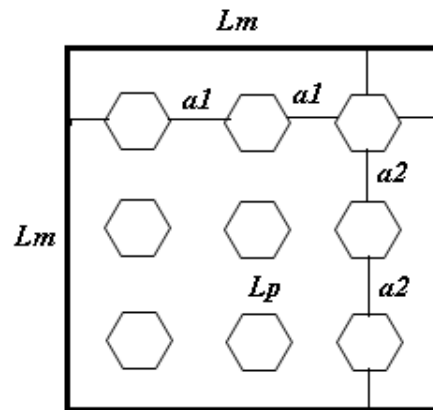


Figure II-7 Composite renforcés par Neuf particules hexagonales

$$V_f = \frac{V_{particle}}{V_{total}} = \frac{N_p \times 3 \times \frac{(l_p^2 \times \tan 60)}{2}}{l_m \times l_m} \Rightarrow l_p = \sqrt{\frac{2 \times V_f \times l_m^2}{3 \times N_p \times \tan 60}} \quad (II.43)$$

$$a_1 = \frac{(l_m - 3(2l_p))}{3} \quad (II.44)$$

$$a_2 = \frac{l_m - 3(2h)}{3} = \frac{(l_m - 3(l_p \tan 60))}{3} \quad (II.45)$$

Tableau II-6 Dimension des particules hexagonales

V_f	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
l_p	6.94	9.80	12.01	13.87	15.51	17

II.4.7 Forme 1 et Forme 2

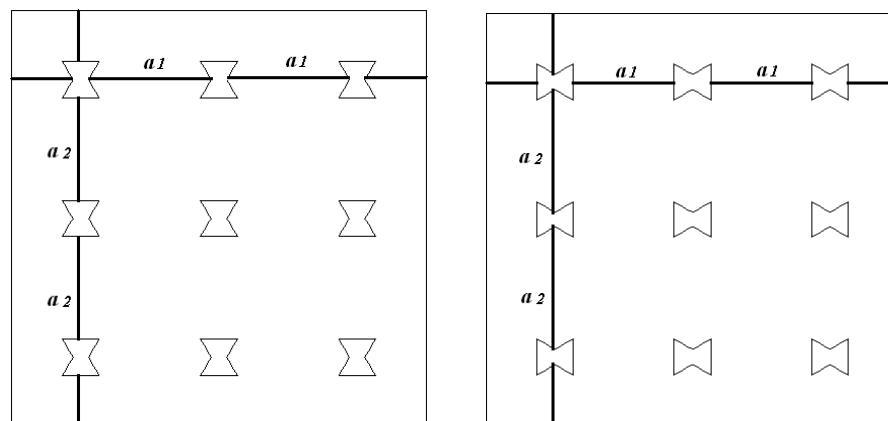
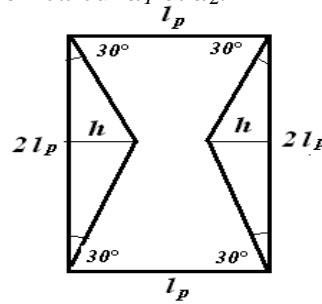


Figure II-8 Composite renforcés par Neuf particules forme 1 et forme 2

Dans le cas de la forme1 et forme2, la distance entre les particules est différente dans le sens horizontale et verticale, pour cela on calcul a_1 et a_2 .



$$V_f = \frac{V_{particle}}{V_{total}} = N_p \times \left[\frac{(2l_p \times l_p) - \left(4 \times \frac{(l_p \times h)}{2}\right)}{l_m \times l_m} \right] \quad (II.46)$$

$$tg(30^\circ) = \frac{h}{l_p}$$

$$V_f = \frac{V_{particle}}{V_{total}} = N_p \times \left[\frac{(2l_p \times l_p) - (2 \times (l_p \times l_p \times tg 30^\circ))}{l_m \times l_m} \right] \Rightarrow l_p = \sqrt{\frac{V_f \times l_m^2}{2N_p \times tg 30^\circ}} \quad (II.47)$$

- Forme 1

$$a1 = \frac{(l_m - (6 \times l_p))}{3} \quad (II.48)$$

$$a2 = \frac{(l_m - (3 \times l_p) - (6 \times h))}{3} \quad (II.49)$$

- Forme 2

$$a1 = \frac{(l_m - (3 \times l_p) - (6 \times h))}{3} \quad (II.50)$$

$$a2 = \frac{(l_m - (6 \times l_p))}{3} \quad (II.51)$$

Tableau II-7 Dimension des particules Forme 1 et Forme 2

V_f	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
l_p	13.24	18.73	22.94	26.49	29.62	32.45

Chapitre III

Simulation numérique

III.1 Introduction

Dans cette étude nous travaillons sur un matériau composite à matrice thermoplastique. Les composites à matrice organique, qui ne peuvent être utilisés que dans les cas où les températures ne dépassant pas 200 à 300°C, le model de composite multi renforts (particules) a été analysée sous une charge de traction.

III.2 Matériau du composite

Le matériau étudié est un composite constitué de polyamide 66 (PA66) chargé de renforts de verre de type E. Les polyamides sont souvent connus sous le nom de «Nylon» et les chiffres indiquent le nombre d'atomes de carbone dans l'unité de base de la molécule. Le PA66 est le plus répandu, à la fois sous forme de fibres ou sous forme massive.

Le PA66 est souvent renforcé par les particules de verre courtes. Ce composite, en raison de son excellente résistance à l'huile, trouve par exemple des applications sous le capot des voitures.

III.2.1 Les renforts de verre

L'excellent rapport qualité/prix des renforts de verre fait qu'ils sont les plus utilisés actuellement dans les composites à matrice polymère.

Le verre est un matériau très fragile du fait de sa forte sensibilité aux microfissures. Cette fragilité diminue lorsque le verre est sous forme de fibre puisque les microfissures sont moins nombreuses, ce qui lui confère de bonnes performances. D'une manière générale, elles présentent une résistance élevée à la rupture, une masse volumique faible (voisine de 2,5 g/m³) et une rigidité relativement plus faible que celles des autres renforts. Il existe différents types de verres : le verre E, C, D, R ou S, de différentes propriétés dues à la différence de la composition du mélange de préparation [36].

- verre E : le plus courant, il possède de bonnes propriétés diélectriques.
- verre D : il est destiné aux applications de construction ou électronique, en raison de ses propriétés diélectriques supérieures aux autres fibres de verre.
- verre C : il est très résistant chimiquement et est principalement utilisé pour les applications anticorrosion.

- verre R ou S : il est destiné pour les applications haute performance du fait de sa résistance en traction et son module d'élasticité supérieurs aux autres fibres de verre [37].

Le verre de type E est employé pour les particules de verre constituant le renfort du matériau composite faisant l'objet de ce travail.

* Les propriétés mécaniques

Il est de coutume de donner comme caractéristiques mécaniques de référence les caractéristiques mesurées sur des monofilaments prélevés à la sortie de la filière. Les mesures de la rupture des matériaux composites unidirectionnels donnent accès aux valeurs des contraintes et à celles de l'allongement des fibres à la rupture. Le Tableau III-1 donne les valeurs usuelles de ces grandeurs.

Tableau III-1 Caractéristiques mécaniques des verres types E, A, R, S et D mesurées sur filament vierge [37]

Caractéristiques	Verre E	Verre A	Verre R ou S	Verre D
Masse volumique (kg/m ³)	2540	2460	2550	2160
Module d'Young (MPa)	72000	71000	86000	55000
Contrainte à la rupture (MPa)	3500	3100	4500	2500
Allongement à la rupture (%)	4.4	-	5.2	-

Aussi il est intéressant de noter que les renforts de verre conservent leurs caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures assez élevées, avoisinant les 200°C pour les verres R, ce qui explique leur bonne adaptation au renforcement des résines à tenue thermique élevée [36].

III.2.2 La matrice polyamide

Les polyamides présentent de bonnes propriétés mécaniques. Ils ont également un bon comportement thermique jusqu'à leur température de fusion (respectivement 215 °C et 175°C pour le PA 66 et le PA 12) et une bonne résistance aux hydrocarbures et aux solvants. En revanche, ce sont des composés très sensibles à l'humidité (respectivement 9,5% et 1,4 % de reprise hydrique à 23°C et 50% d'humidité relative pour le PA 66 et le PA 12). L'eau absorbée peut alors provoquer un gonflement, une chute de la température de transition

vitreuse et une plastification de la résine, entraînant ainsi une perte des propriétés mécaniques [38].

Quelques caractéristiques du PA66 sont données dans le Tableau III-2 :

Tableau III-2 Propriétés du PA66 [38]

Propriétés du PA66	
Densité	1.13 – 1.15 g/cm ³
Température de fusion	218 - 220°C
Module élastique	3200 Mpa
Limite d'élasticité	90 Mpa
Déformation à la rupture	23%
Coefficient de dilatation	90x10 ⁻⁶ °C
Température de mise en forme	260-325°C

III.3 Modélisation par élément finis

Le logiciel CASTEM [39] est utilisé dans la simulation par éléments finis. Afin d'étudier le comportement élastique d'un matériau composite sous une charge de traction simple, un modèle constitué de particules et d'une matrice environnante a été considéré comme il est représenté sur la Figure III-1. Le composite est soumis à une contrainte de traction uniforme σ .

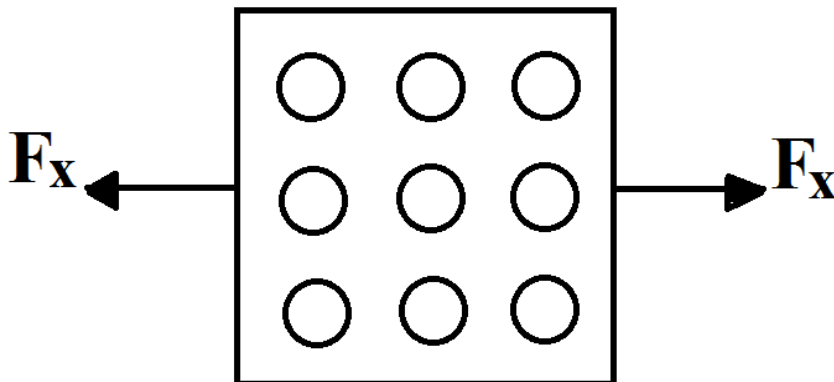


Figure III-1 Modèle par éléments finis pour un composite renforcé par des particules

Dans ce qui suit, nous allons étudier l'effet de la forme des particules de verre sur le comportement mécanique d'un composite, la matrice est supposée avoir une forme carrée de longueur $l_m = 150\mu\text{m}$, les dimensions des particules l_p et d_p sont calculées pour différentes valeurs de V_f (Chapitre II). Le composite contient neuf (9) particules en forme triangulaire, carrée, rectangulaire (Verticale et horizontale), Forme1, Forme2, pentagonale, hexagonale et circulaire (Figure III-2). Le composite a été modélisé pour les trois types d'arrangement (carré, hexagonal et aléatoire).

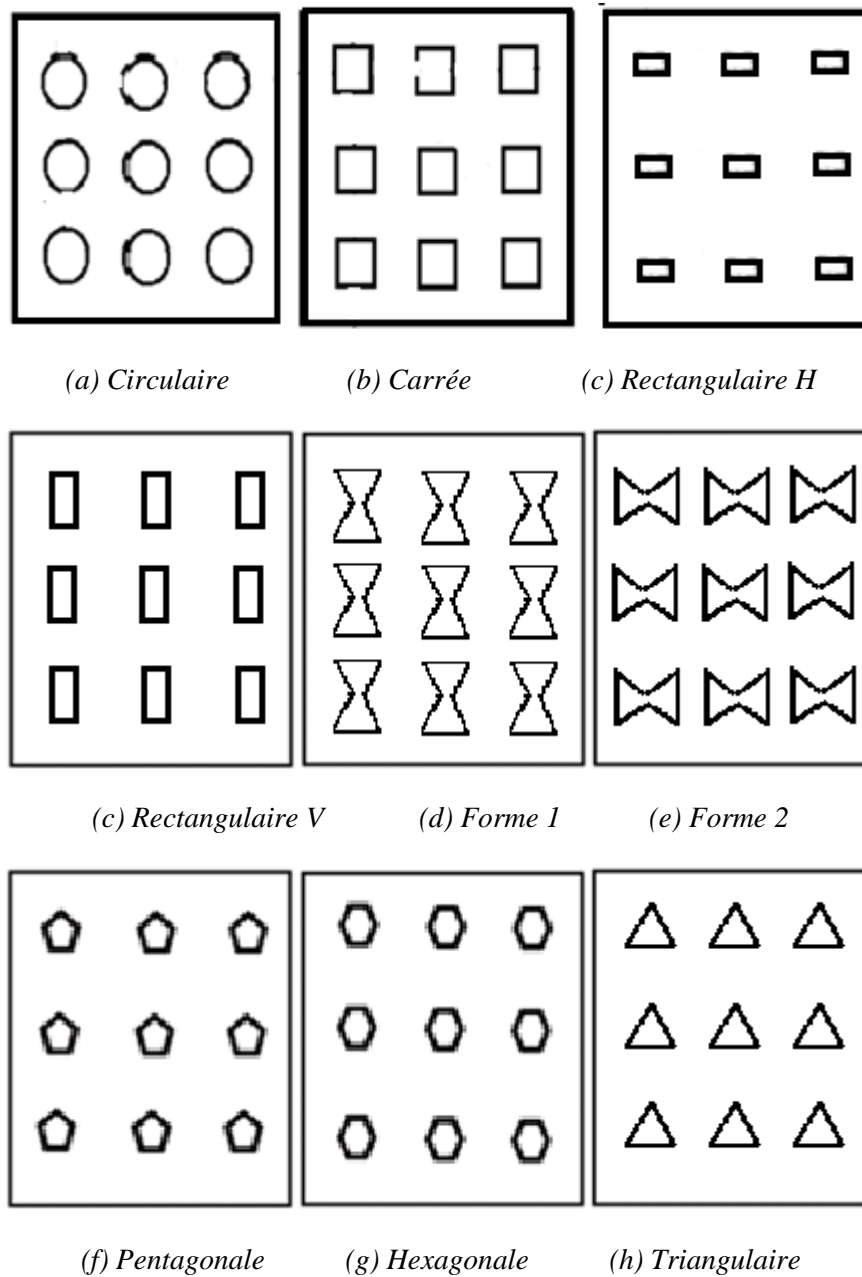


Figure III-2 Différentes formes utilisées en simulation (disposition en carré)

Toutes les formes avaient la même surface mais des périmètres différents. Pour comprendre plus facilement l'effet des particules de renforcement de forme, le comportement des éléments de déformation plane a été sélectionné dans cette étude. Les particules étaient supposées être parfaitement liées au matériau de la matrice

III.3.1 Propriété du composite

Le modèle est petit donc un maillage fin d'éléments a été utilisé [40]. Pour simplifier, on suppose que toutes les particules ont les mêmes dimensions [41].

Du fait de l'axisymétrie, l'échantillon peut être considéré comme un corps élastique 2D. Les paramètres suivants sont utilisés dans tous les calculs [42]:

1. Particules de verre : module de Young $E_f = 64 \text{ GPa}$. Coefficient de Poisson $\nu_f = 0,2$ et densité $\rho_f = 2,54 \text{ g / cc}$.
2. La matrice est en polyamide 66 avec un module de Young $E_m = 3 \text{ GPa}$. Coefficient de Poisson $\nu_m = 0,35$ et densité de $\rho_m = 1,14 \text{ g / cc}$.

Le composite a été modélisé et maillé avec des éléments triangulaires pour obtenir la meilleure convergence et précision des résultats. Le composite est soumis à une contrainte de traction uniforme σ . Pour simplifier, on suppose que toutes les particules ont le même diamètre d_p [41] pour la forme circulaire et la même longueur l_p pour les autres formes

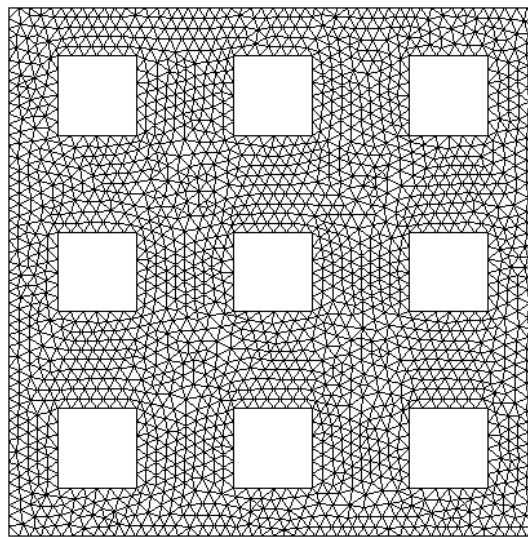


Figure III-3 Maillage de la matrice

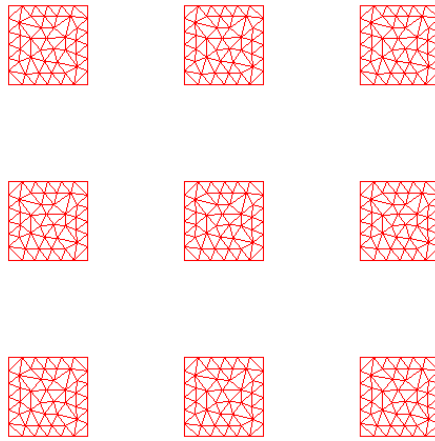


Figure III-4 Maillage des particules

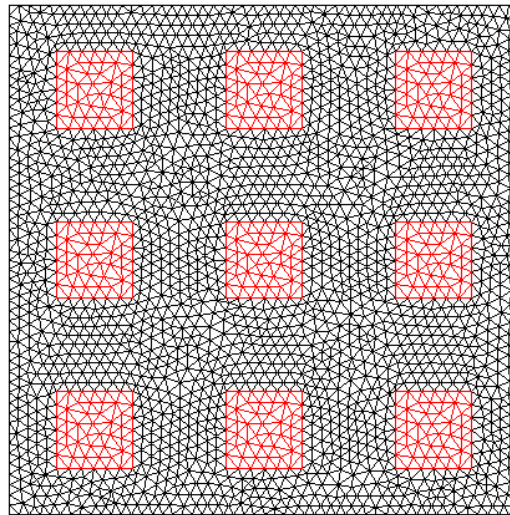


Figure III-5 Maillage du composite (particules carrées)

III.3.2 Condition aux limites

Les conditions aux limites représentant l'application d'une charge de traction à un composite renforcé par des particules sont : à $X = 0$ et $X = l_m$, $U_y = 0$, la matrice et la particule ont un mouvement nul dans la direction Y (Figure III-6). Ici l'axe X est dans la direction de l'application de la force. Nous avons appliqués une contrainte $F_x = 5.65e-8N/\mu m^2$ aux faces d'extrémités de la matrice [43], soit $X = 0$ et $X = l_m$.

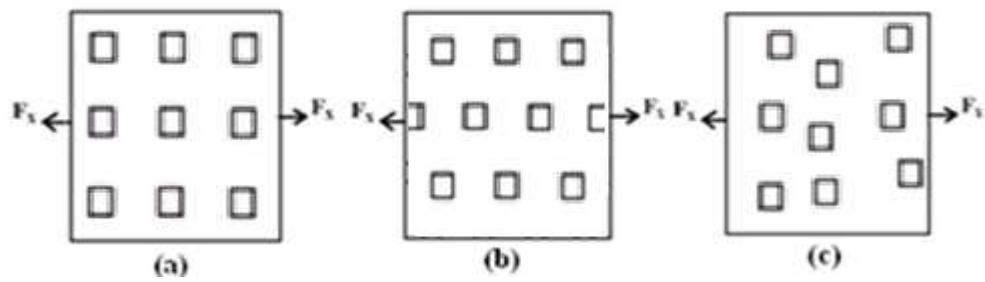


Figure III-6 Conditions aux limites pour un composite renforcé avec 9 particules carrées

(a) Disposition carrée, (b) Disposition hexagonale, (c) Disposition aléatoire

III.4 Résultats et discussion

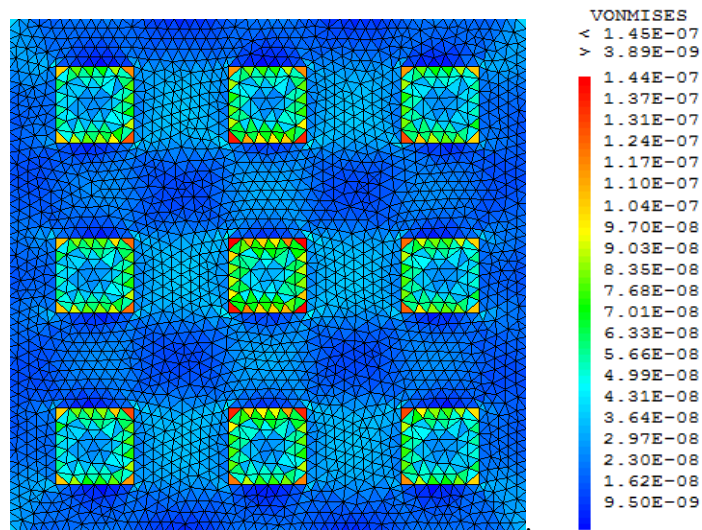


Figure III-7 Distribution des contraintes Von Mises $V_f = 20\%$ (arrangement carré)

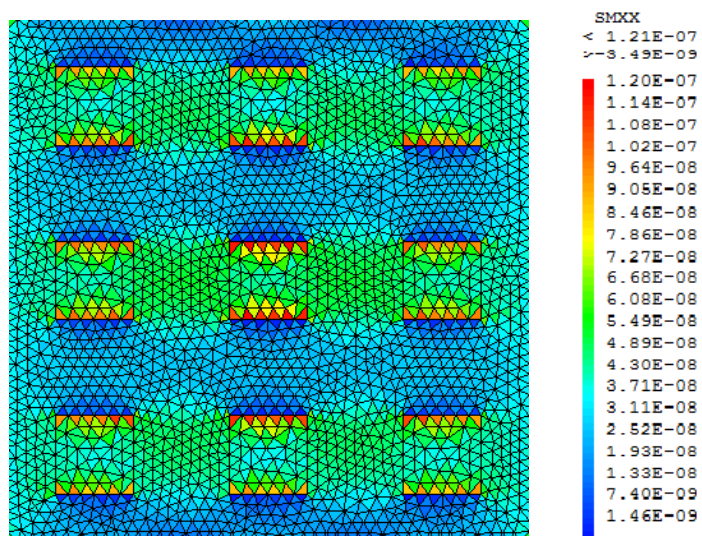


Figure III-8 Distribution des contraintes longitudinales $V_f = 20\%$ (arrangement carré)

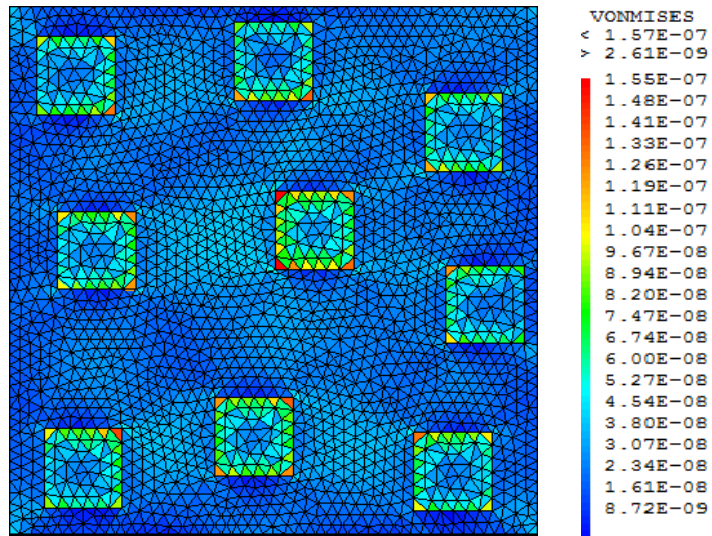


Figure III-9 Distribution des contraintes Von Mises $V_f = 20\%$ (arrangement aléatoire)

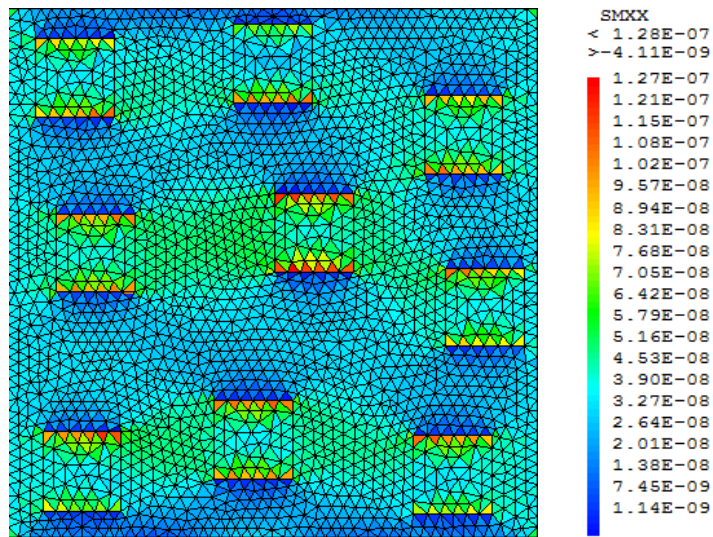


Figure III.10 Distribution des contraintes longitudinales $V_f = 20\%$ (arrangement aléatoire)

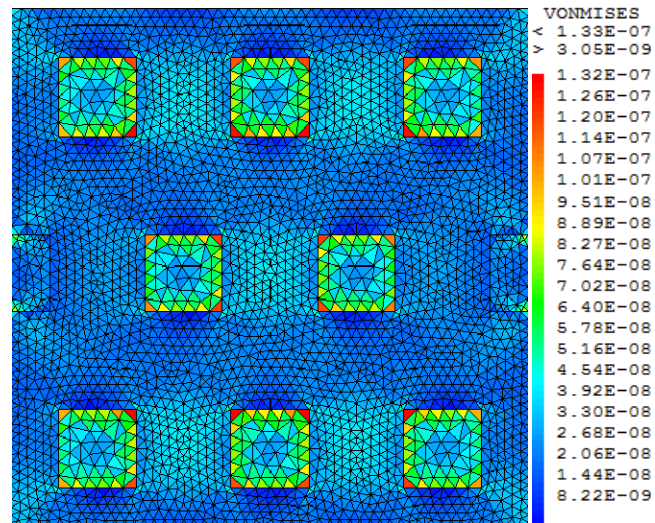


Figure III-11 Distribution des contraintes Von Mises $V_f = 20\%$ (arrangement hexagonale)

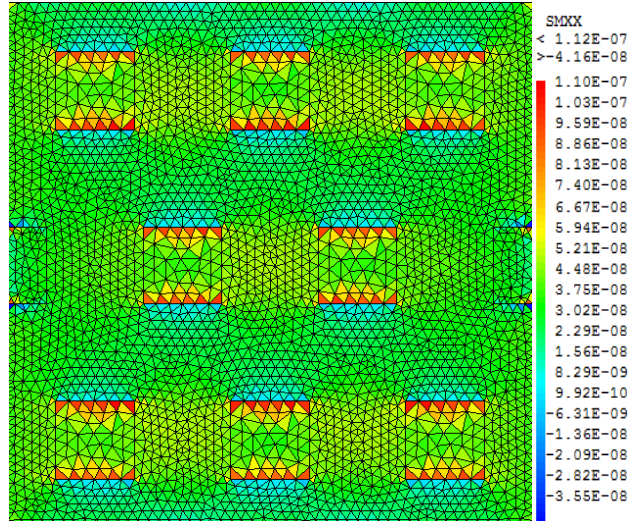


Figure III-12 Distribution des contraintes longitudinales $V_f = 20\%$ (arrangement hexagonale)

Les figures Figure III-7, Figure III-9 et Figure III-11 représentent la distribution des contraintes de Von Mises dans un composite renforcé par neuf particules de forme carrée à une fraction volumique $V_f = 20\%$ et pour les trois types d'arrangement. On remarque que les contraintes sont concentrées dans les renforts de verre. Mêmes remarques dans le cas des contraintes longitudinales, les figures Figure III-8, Figure III-10 et Figure III-12.

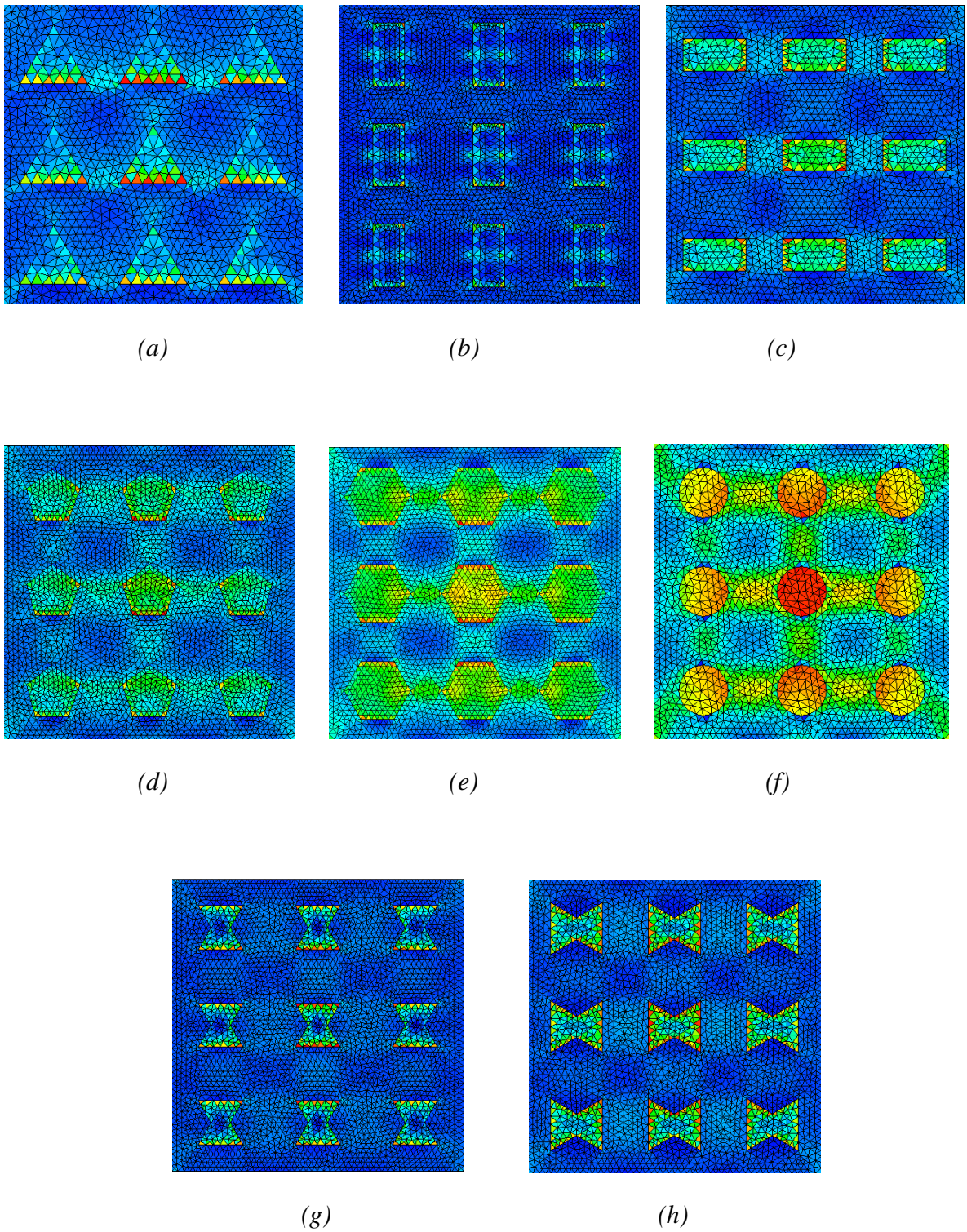
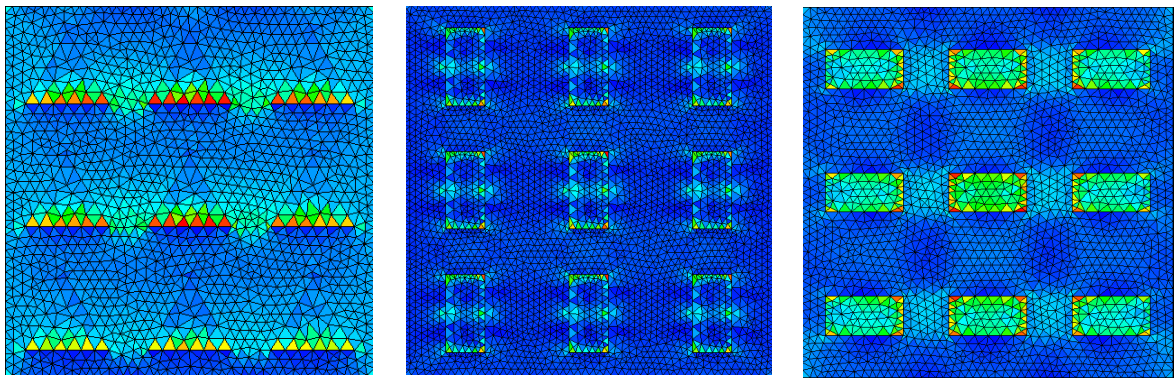


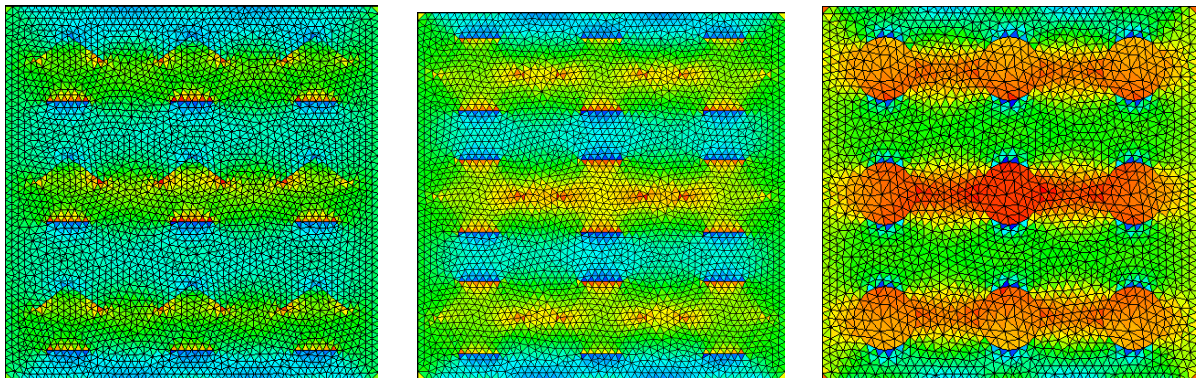
Figure III-13 Distribution des contraintes Von Mises $V_f = 20\%$ (arrangement carré)
 a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, f) circulaire,
 g) Forme 1, h) Forme 2



(a)

(b)

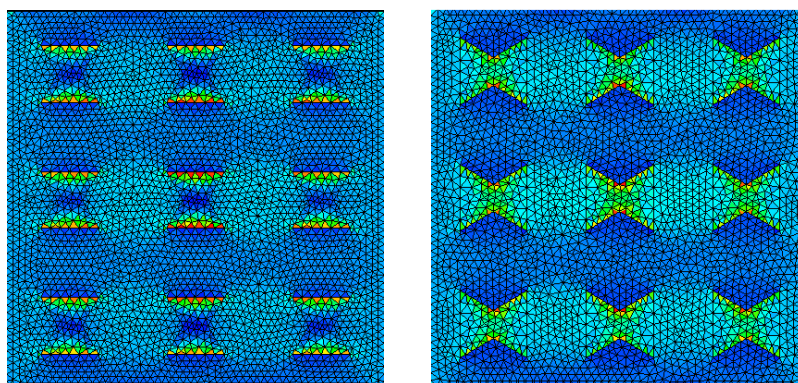
(c)



(d)

(e)

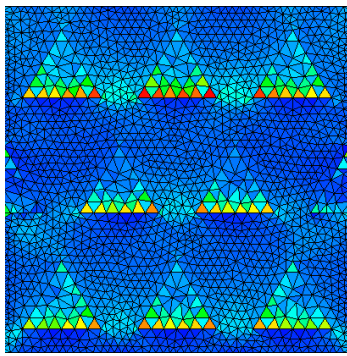
(f)



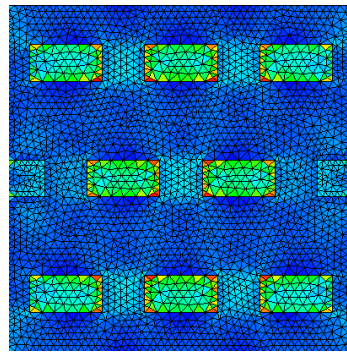
(g)

(h)

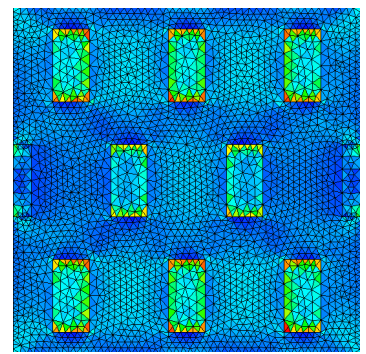
Figure III-14 Distribution des contraintes longitudinales $V_f = 20\%$ (arrangement carré)
 a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, f) circulaire,
 g) Forme 1, h) Forme 2



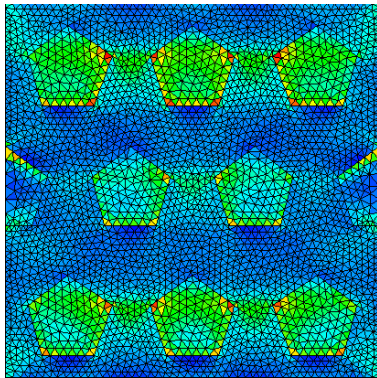
(a)



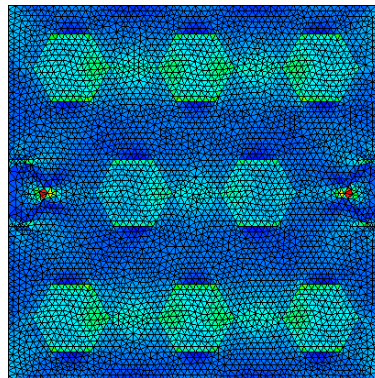
(b)



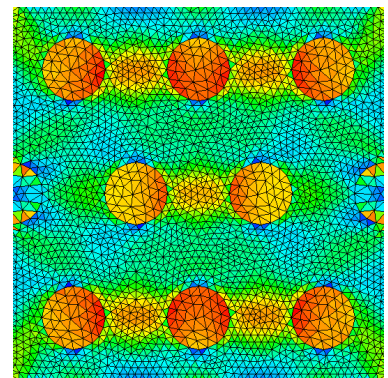
(c)



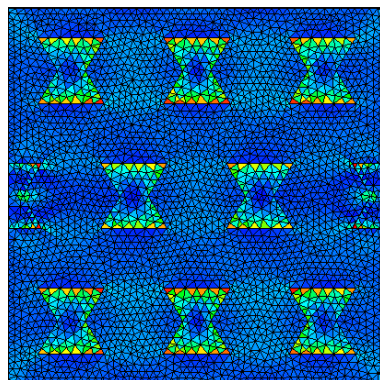
(d)



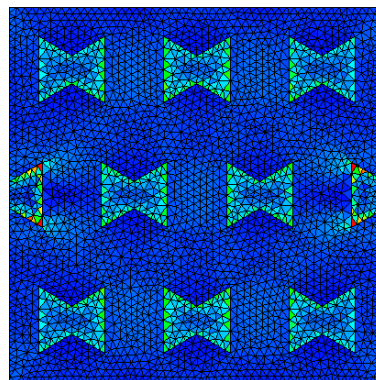
(e)



(f)



(g)



(h)

Figure III-15 Distribution des contraintes Von Mises $V_f = 20\%$ (arrangement hexagonale)
 a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, f) circulaire,
 g) Forme 1, h) Forme 2

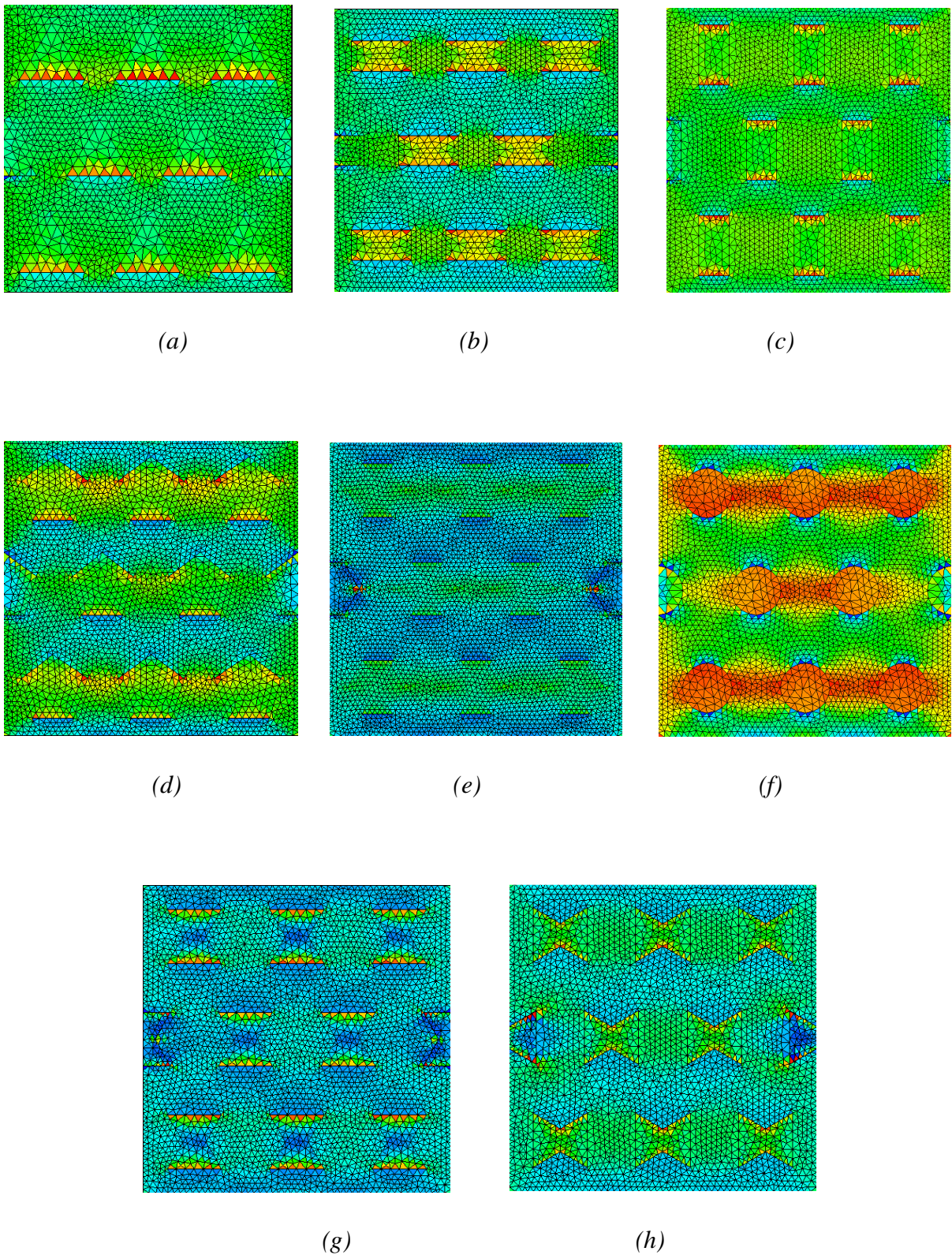
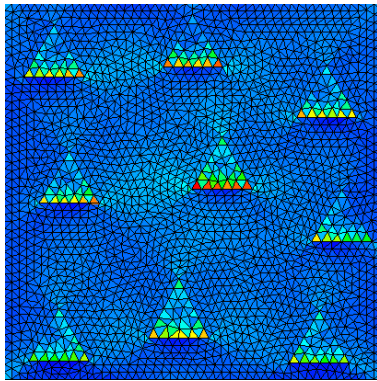
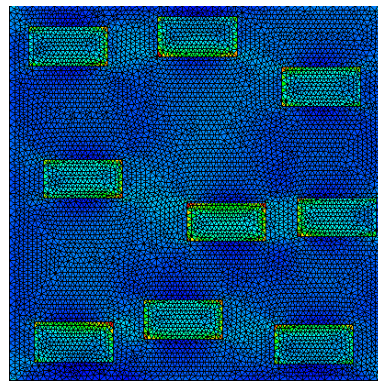


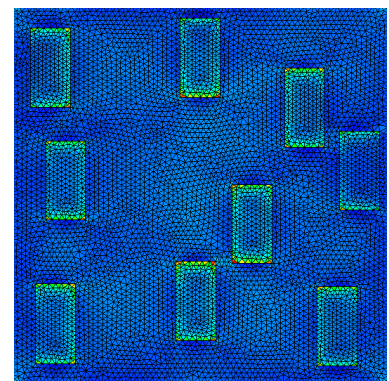
Figure III-16 Distribution des contraintes longitudinales $V_f = 20\%$ (arrangement hexagonale)
 a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, f) circulaire,
 g) Forme 1, h) Forme 2



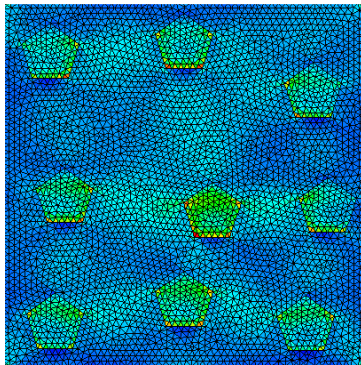
(a)



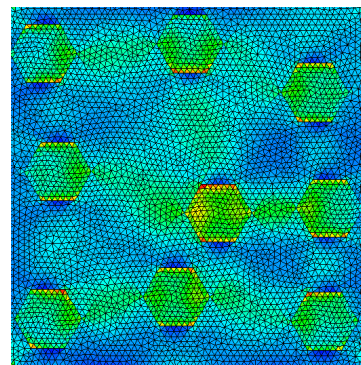
(b)



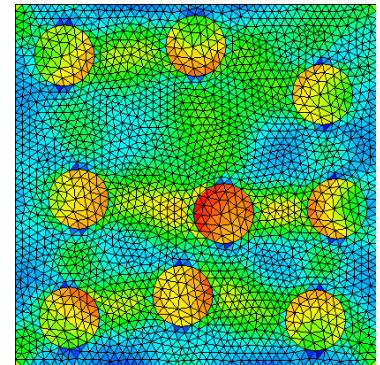
(c)



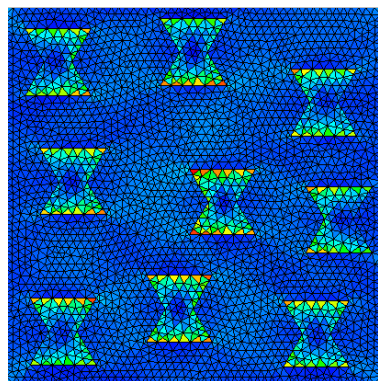
(d)



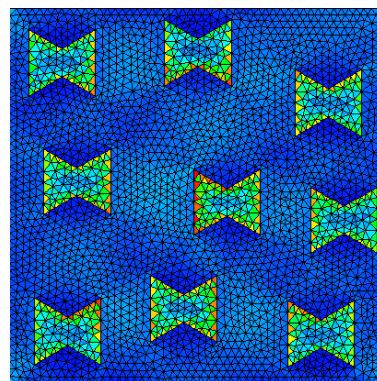
(e)



(f)



(g)



(h)

Figure III-17 Distribution des contraintes Von Mises $V_f = 20\%$ (arrangement aléatoire)
 a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, f) circulaire,
 g) Forme 1, h) Forme 2

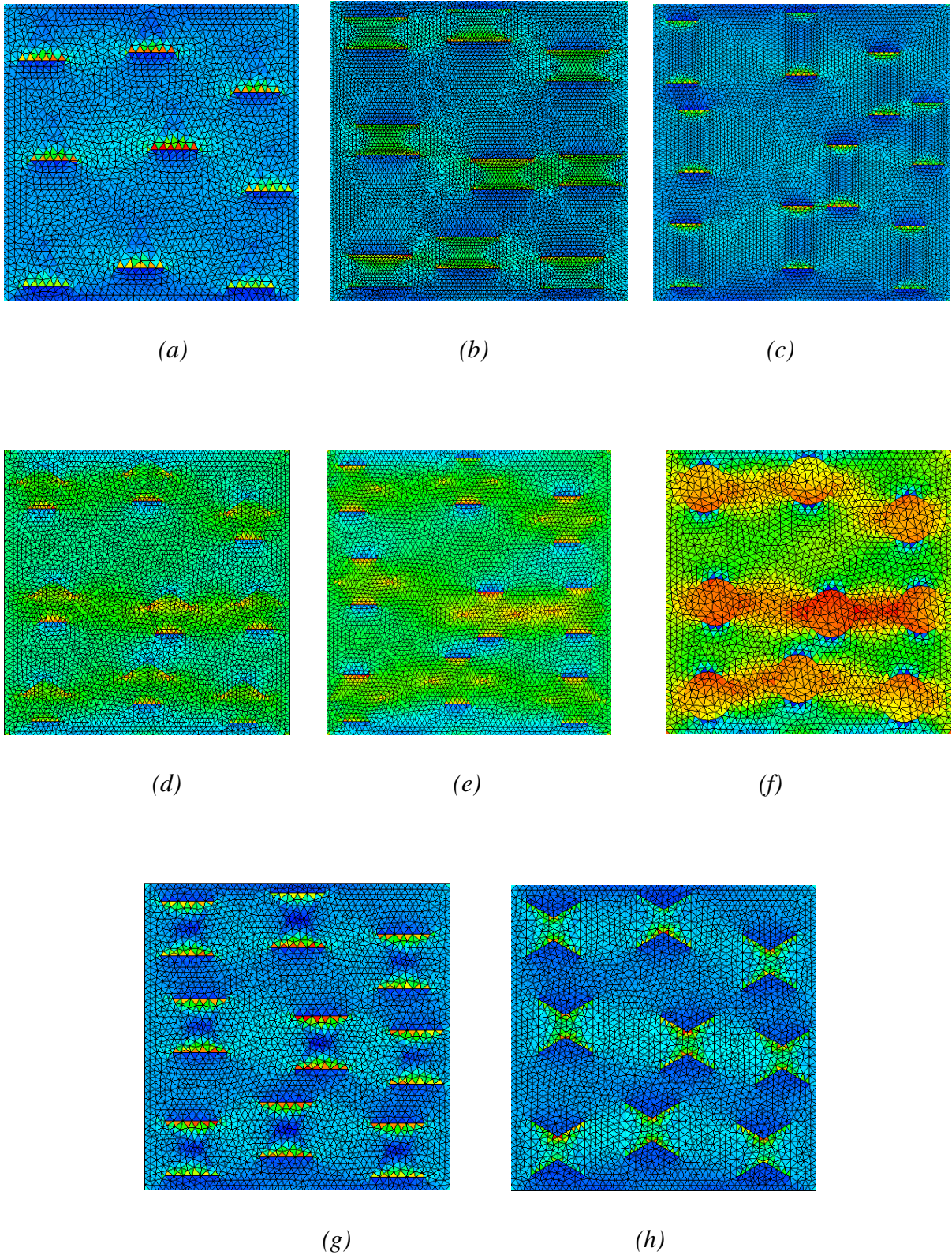


Figure III-18 Distribution des contraintes longitudinales $V_f = 20\%$ (arrangement aléatoire)
 a) triangulaire, b) rectangulaire V, c) rectangulaire H, d) pentagonale, e) hexagonale, f) circulaire,
 g) Forme 1, h) Forme 2

Dans les figures Figure III-13, Figure III-15 et Figure III-17 on peut voir que les contraintes de Von Mises sont situées dans les angles des particules pour les formes : hexagonale, rectangulaire (H et V), pentagonale, Forme1 et Forme2. Pour la forme triangulaire, les contraintes sont les plus élevées dans le sens latéral parallèle à la direction de la force, pour la forme circulaire, on peut voir que la contrainte est située dans les particules centrales et l'arc latéral pour les autres particules.

On peut également voir que certains composites ont des contraintes de Von Mises élevées entre les particules, la raison en est qu'il existe une zone plastique à cet endroit, cela peut entraîner une fracture de la matrice.

Les figures Figure III-14, Figure III-16 et Figure III-18 représente l'évolution des contraintes longitudinales dans les arrangements carré, hexagonale et aléatoire successivement.

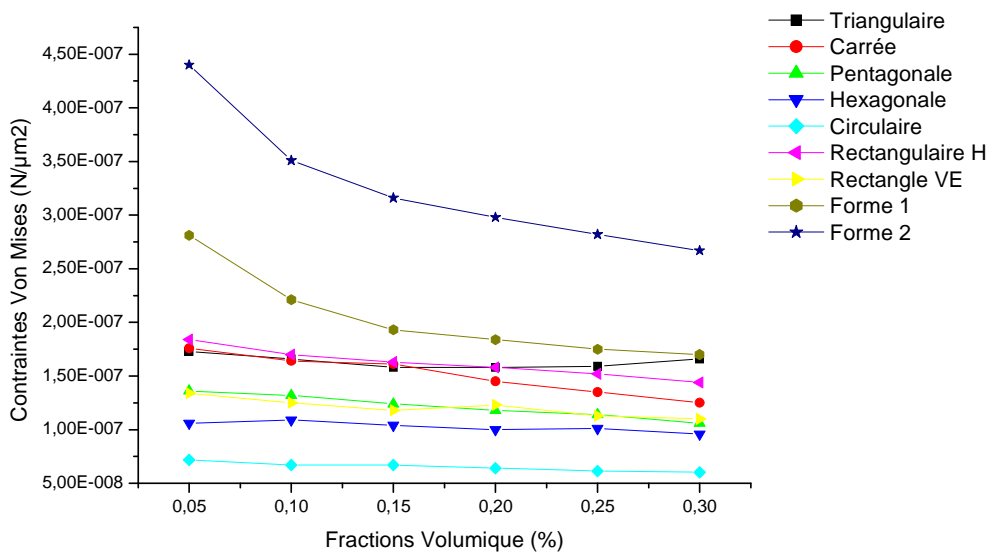


Figure III-19 Évolution des contraintes de Von Mises en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement carré)

La Figure III-19 représente l'évolution des contraintes Von mises en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes dans le cas d'un arrangement carré, on remarque que les valeurs des contraintes dans les particules de Forme2 sont supérieures par rapport aux autres formes, suivi par Forme1, triangulaire, rectangulaire H, carrée,

rectangulaire V, pentagone, hexagone et en fin la forme circulaire. Mêmes remarques dans le cas des contraintes longitudinales.

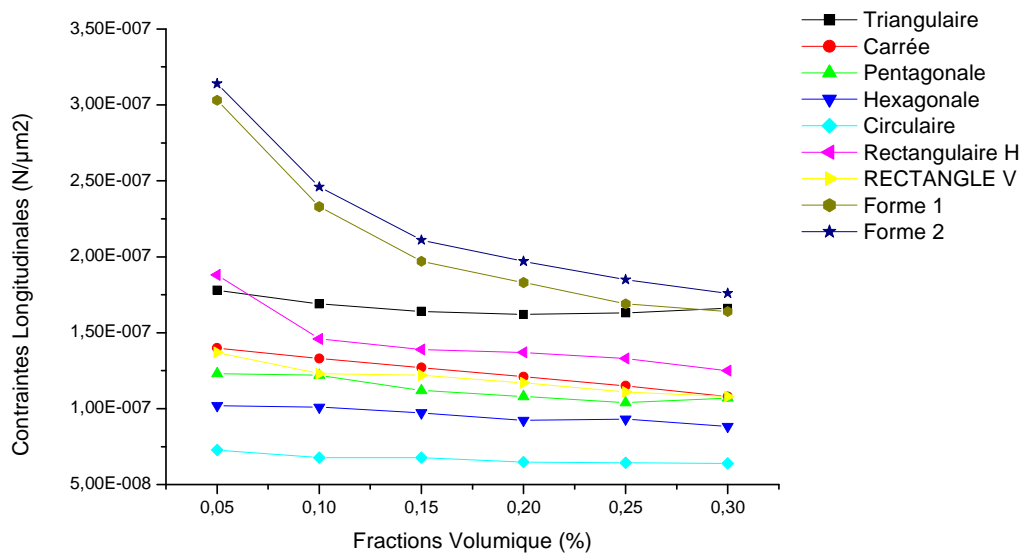


Figure III-20 Évolution des contraintes longitudinales en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement carré)

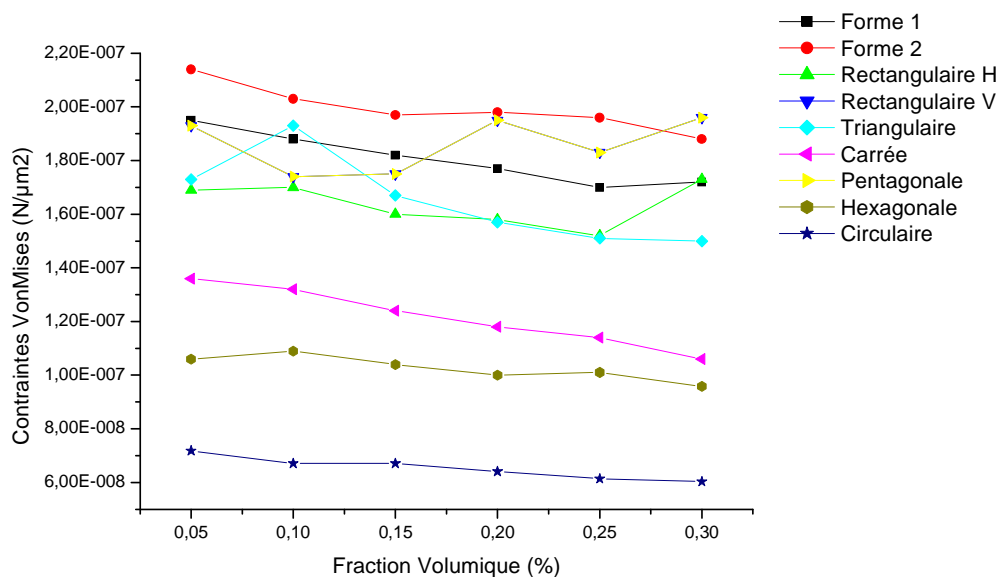


Figure III-21 Évolution des contraintes de Von Mises en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement aléatoire)

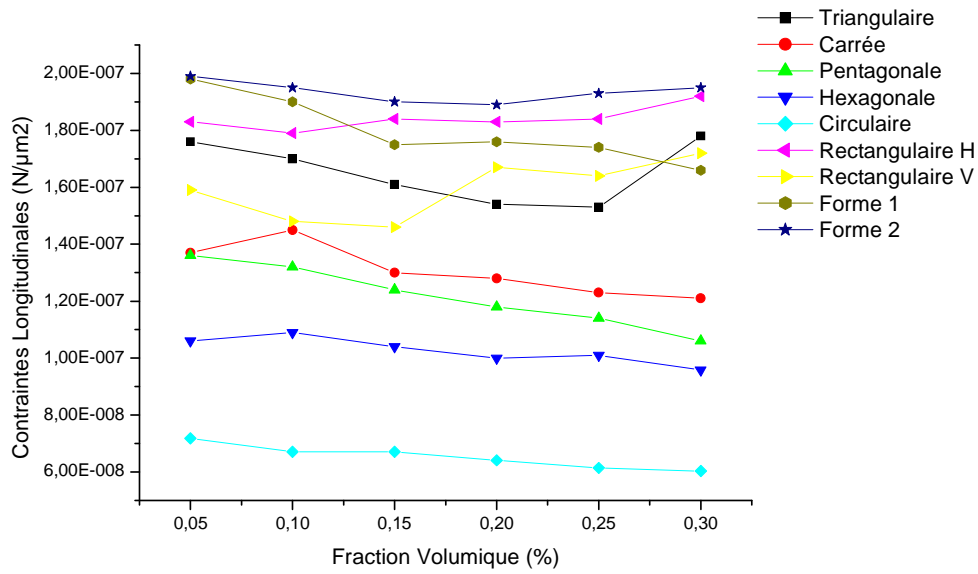


Figure III-22 Évolution des contraintes longitudinales en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement aléatoire)

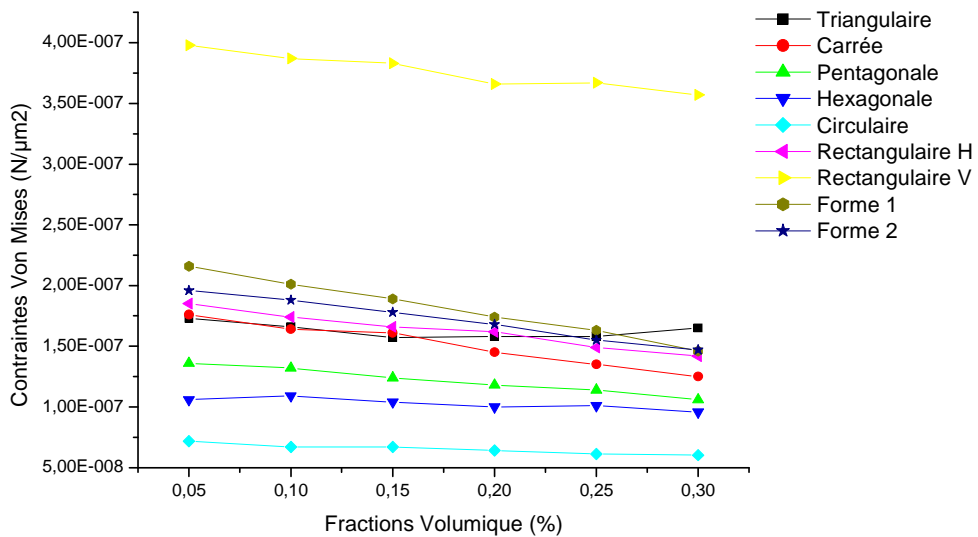


Figure III-23 Évolution des contraintes de Von Mises en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement hexagonale)

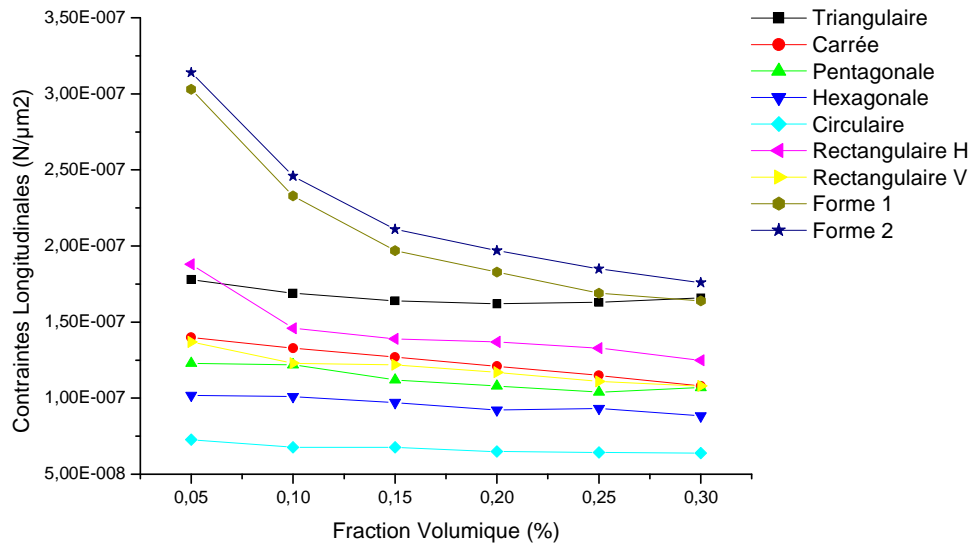


Figure III-24 Évolution des contraintes longitudinales en fonction de la fraction volumique des particules pour les différentes formes (arrangement hexagonale)

Les figures Figure III-21 et Figure III-23 représentent l'évolution des contraintes Von mises en fonction de la fraction volumique des particules pour des différentes formes dont les arrangements sont : carré, aléatoire et hexagonal successivement. Même remarque que pour l'arrangement carré.

Les figures Figure III-20, Figure III-22 et Figure III-24 représentent l'évolution des contraintes longitudinales en fonction de la fraction volumique dans les arrangements carré, aléatoire et hexagonal successivement, même remarque que dans les contraintes Von Mises la forme circulaire les plus résistantes.

On peut en déduire que la forme circulaire est la forme idéale pour une meilleure résistance de composites renforcés par des particules.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les composites renforcés par des particules ont été développés en grande partie pour combler l'écart de propriété entre les stratifiés (des fibres continues) utilisées comme structures primaires par l'industrie aéronautique et aérospatiale et matériaux non renforcés utilisés principalement dans les applications non porteuses. À certains égards, les particules couplent les avantages de chacun de ces matériaux. Ainsi, la particule a trouvée sa place dans les structures légèrement chargés, dans lequel la rigidité domine la conception, mais dans lequel il doit être également une augmentation notable de la force sur le matériau non renforcé.

Cette étude concerne l'influence de la forme des particules sur le comportement mécanique d'un matériau composite. Dans notre cas on a choisi une matrice de polyamide renforcée par des particules de verre. Étant donné que les particules et la matrice ont souvent des modules d'élasticité très différents, la contrainte dans chaque élément doit être différente, en fait, la contrainte est plus élevée dans le matériau présentant le module d'élasticité le plus élevé (généralement le renfort). Le module d'élasticité du verre est beaucoup plus grand que celui de la matrice thermoplastique. Les composites thermoplastiques renforcés par des particules gagnent de la place dans le monde de l'industrie, on a constaté dans cette étude que la forme des particules joue un rôle important dans le comportement du composite ; la réduction de la taille de ces renforts conduit à la diminution des contraintes de Von Mises et des contraintes longitudinales pour la même fraction volumique, la forme circulaire est la forme idéale pour une meilleure résistance du composite. Les composites renforcés par particules ne cesse d'évolué dans l'industrie a cause de leurs facilités de mise en forme et les faibles couts, ce qui a conduit aux nouveaux composites qui sont les nanocomposites.

Enfin, pour compléter ce travail on propose d'étudier le comportement d'un composite renforcé par des particules de forme mélangée, parce que ce type de renfort est plus trouver dans la réalité, aussi l'étude de l'effet des renforts avec des dimensions variables.

Références bibliographique

- [1] J. L. Kardos, «Critical issues in achieving desirable mechanical properties for short Fiber composites», Pure &App. Chem, Vol. 57, No. 11, pp. 1651—1657, 1985.
- [2] Jean-Marie Berthelot, « matériaux composites-comportement mécanique et analyse des structures » ; 5 édition, lavoisier, Paris, 2012.
- [03] Laurent Gornet, «*Généralités sur les Matériaux Composites*», (2011).
- [04] Takkouk Zahi, Brihi Nouredine, LaouerAbdelghani, «*Etude des propriétés thermiques d'un matériau composite à matrice polymère*», (2019-2020).
- [05] HIMED LYNDA, ADJOUADI NOURA, BOUTAANI MOHAMED SAID, «*MATERIAUXCOMPOSITES Homogénéisation des matériaux composites a deux phases*»,(2019 /2020).
- [06] SEMSARI _BILLEL, «*Etude et simulation d'un composite Aéronautique à base de fibre de carbone et matrice époxy*», (2019).
- [07] HiadsiSaid, Mr. Boutaous Ahmed, Mr. Belkaid Mohamed Nouredine, Mr. El ChikhMokhta, «*ETUDE DE LA DIFFUSION D'UN MATERIAU COMPOSITE « résine époxy »*»,(2014/2015)
- [08] Mohamed RAGOUBI, « *Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne* », Thèse de Docteur de l'Université Henri Poincaré Nancy 1, 2010.
- [09] Ferhat Med Esseghir,Boutaous Ahmed, Elchick Mokhtar, Laghouati Yacine, «*Optimisation Par algorithme génétique de l'écart entre fibres d'un matériau composite pour l'estimation de l'endommagement d'interface*», (2012/2013).
- [10] GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES – CARMA –Actualisation octobre 2006.
- [11] Olivier Ledain. « *Elaboration de matrices céramiques par un nouveau procédé hybride : imprégnation de poudres et CVI réactive* ». Génie des procédés. Université de Bordeaux, 2014. Français. NNT : 2014BORD0177ff. tel-01138115ff.
- [12] Dr. LABED Adnan, Pr. HECINI Mabrouk, Dr. MEFTAH Kamel, «*Optimisation de la configuration des tubes en matériaux composites sous pression*», (2018 – 2019).
- [13] Mr A. SADOK, Mr A. HEBBAR, Mr R. ZENASNI, Mr D. OUINAS, «*ETUDE DE L'ENDOMMAGEMENT DANS UN COMPOSITE STRATIFIE* », (2011/2012).
- [14] SOUDANI AIMEN, HADJOU DJ YOUNES, «*Résistance aux chocs de matériaux composite renforcé par des déchets plastique*», (2020 /2021).
- [15] HADDADI Manel, «*Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère*», (2010 /2011).

- [16] BOUDAPOUD ABDALLAH, MOUHOU B YOUBA, «*MATERIAUX COMPOSITES Homogénéisation des matériaux composites a deux phases*», (2010 /2011).
- [17] KHALDOUNE Abdraouf, «*Effet des paramètres d'élaboration sur le comportement mécanique d'un bio-composites* », (2015 /2016).
- [18] Abderrazak ELGHARBI, «*ANALYSE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES PLAQUES STRATIFIEES RECTANGULAIRES MINCES SYMETRIQUES EN MATERIAUX COMPOSITES*» (2010).
- [19] El Hadji Babacar LY, «*Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose*» (2008).
- [20] Abla RADJEB, «*Simulation numérique de l'orientation de fibres en injection de thermoplastique renforcé* », Thèse de Docteur de l'école nationale supérieure des mines de paris, 2007.
- [21] G. Coroller et al, «*Contribution à l'étude des propriétés d'un composite PP/lin mis en œuvre par extrusion* », JNC 17 - Poitiers 2011.
- [22] Alexandre Vivet, «*Renforcement des matrices polymères et des matériaux composites par des nanoparticules* », Mécanique des matériaux. Université de Caen, 2012.
- [23] ABDELKEBIR Abderraouf, «*L'EFFET DE LA TEMPERATURE DE MERCERISATION SUR LES PROPRIETES DU COMPOSITE (TISSUS DE JUTE / POLYESTER)*, (2017/2018).
- [24] Yasser Zare, “*Development of Nicolais–Narkis model for yield strength of polymer nanocomposites reinforced with spherical nanoparticles*”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 70, p. 191–195, 2016.
- [25] S.C. Sharma, “*Composite materials*”, Narosa Publishing House. 2000.
- [26] Romina Del Rey et al., “*Effect of Sodium Hydroxide Treatments on the Tensile Strength and the Interphase Quality of Hemp Core Fiber-Reinforced Polypropylene Composites*”, *Polymers* 2017, 9, 377.
- [27] A. Kanagaraj, C. Franciskennathamreth, M. Ajithkumar et al., “*Development of particle reinforced composite by plastic and e-waste*”, *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, Vol. 5, No. 2, p. 280 – 285, 2019.
- [28] A Kulkarni, N Aswini, C R Dandekar and S Makhe, “*Modeling of short fiber reinforced injection moulded composite*”, *International Conference on Structural Nano Composites (NANOSTRUC 2012)*,

- [29] S.C. Sharma, “*Composite materials*”, Narosa Publishing House. 2000.
- [30] Nikhilesh Chawla and Yu-Lin Shen, “*Mechanical Behavior of Particle Reinforced Metal Matrix Composites*”, ADVANCED ENGINEERING MATERIALS, Vol. 3, No. 6, P. 357 – 370, 2001.
- [31] A. Kanagaraj, C. Franciskennathamreth, M. Ajithkumar et al., “*Development of particle reinforced composite by plastic and e-waste*”, International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, Vol. 5, No. 2, p. 280 – 285, 2019.
- [32] Hanry Yang, Lin Jiang, Martin Balog et al., “*Reinforcement Size Dependence of Load Bearing Capacity in Ultrafine-Grained Metal Matrix Composites*”, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, Vol. 48A, p. 4385, 2017,
DOI: 10.1007/s11661-017-4186-7.
- [33] Shao – Yun Fu, Xi – Qiao Feng, et al., “*Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate polymer composites*”, Composites: Part B39, p. 933 – 961, 2008.
- [34] E. Guth, “*Theory of Filler Reinforcement*,” Journal of Applied Physics, 1945, Vol. 16, No. 1, pp. 21-25. <https://doi.org/10.1063/1.1707495>.
- [35] Mohammed Abdulsattar Mohammed, “*Mechanical Behavior for Polymer Matrix Composite Reinforced By Copper Powder*”, Nahrain University, College of Engineering Journal (NUCEJ), Vol.14, No.2, pp.160-176, 2011.
- [36] Hanane NECHAD, « *Evaluation de l’endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante* », Thèse doctorat a l’Ecole doctorale : Matériaux de Lyon, 2004.
- [37] Cédric THOMAS, « *Etude des mécanismes d’endommagement des composites fibres de carbone / matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV* », Thèse doctorat a l’École nationale supérieure des mines de Paris. 2011.
- [38] F. T. Wallenberger, “*Fiberglass and Glass Technology, Energy-Friendly Compositions and Applications*”, XV, 474p, Hardcover, 2010.

- [39] Castem, <http://www-cast3m.cea.fr>
- [40] S. Houshyar, R and al.. “*Modelling of polypropylene fibre-matrix composites using finite element analysis*”, eXPRESS Polymer Letters Vol.3, No.1, 2–12. 2009.
- [41] H.F. Lei, Z.Q and Zhang, B. Liu. “*Effect of fiber arrangement on mechanical properties of short fiber reinforced composites*”, Elsevier Composites Science and Technology, 72, 506–514. 2012.
- [42] John F. O’Gara and al. “*predicting the tensile strength of short glass fiber reinforced injection molded plastics*”, Delphi Research Labs. 2010.
- [43] Prince and al. “*Analysis of Failure Phenomena in Multi- Fiber polymer composite material at varying volume fraction using Finite Element Modeling*”, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), pp.287-291; Mar-Apr 2012.

RESUME

Dans ce mémoire, l'effet de la forme des particules sur le comportement mécanique du composite renforcés par particules de verre est évalué. Les petites particules adhèrent fortement au polymère, ce qui conduit à un fort effet de renforcement. Lorsque la surface totale de contact augmentait, davantage de charges étaient transférées aux particules de renforcement. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement mécanique d'un composite à matrice thermoplastique Nylon66, renforcés de particules de verre, sous chargement de traction unidirectionnelle par la méthode des éléments finis. Des résultats numériques sont présentés pour une variété de formes de particules, y compris circulaire, triangulaire, carrée, rectangulaire (H et V), pentagone, hexagonale, forme1 et forme2. Les résultats montrent que les contraintes de Von Mises augmente varient d'une forme a l'autre et que la forme circulaire est la meilleure.

Mots-clés : Particules, Polyamide66, Composite, Effet de forme, Chargement en traction, Élément fini.

ABSTRACT.

In this thesis, the effect of the shape of the particles on the mechanical behavior of the composite reinforced with glass particles is evaluated. The small particles adhere strongly to the polymer, which leads to a strong reinforcing effect. As the total contact area increased, more charges were transferred to the reinforcing particles. The objective of this work is to study the mechanical behavior of a nylon66 thermoplastic matrix composite, reinforced with glass particles, under unidirectional tensile loading by the finite element method. Numerical results are presented for a variety of particle shapes, including circular, triangular, square, rectangular (H and V), pentagon, hexagonal, shape1 and shape2. The results show that the increased Von Mises stresses vary from one shape to another and that the circular shape is the best.

Keywords: Particles, Nylon66, Composite, Shape Effect, Tensile Loading, Finite Element.

ملخص

في هذه الأطروحة، يتم تقييم تأثير شكل الجسيمات على السلوك الميكانيكي للمركب المقوى بجزيئات الزجاج. تلتصق الجزيئات الصغيرة بقوة بالبوليمر، مما يؤدي إلى تأثير التسليح بقوة. مع زيادة مساحة التلامس الإجمالية، تم نقل المزيد من الشحنات إلى جزيئات التسليح. الهدف من هذا العمل هو دراسة السلوك الميكانيكي لمركب مصفوفة لدن بالحرارة النايلون 66 ، مقوى بجزيئات زجاجية ، تحت تحميل شد أحادي الاتجاه بطريقة العناصر المحدودة. يتم تقديم النتائج العددية لمجموعة متنوعة من أشكال الجسيمات، بما في ذلك الدائرية، المثلثة، المربعة، المستطيلة (H و V) ، الخماسي، السداسي، الشكل 1 والشكل 2. أظهرت النتائج أن اجتهادات Von Mises المتزايدة تختلف من شكل إلى آخر وأن الشكل الدائري هو الأفضل.

كلمات المفتاحية: الجسيمات، مادة البولياميد 66، المركب، تأثير الشكل، تحميل الشد، العناصر المحدودة.