

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT PHYSIQUE
N° : Ph/ENR/18/2022



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : Physique Énergétique et
Energie renouvelable

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: Amara Abderrahim et Guessoum Moussa

Intitulé

**Simulation du transfert thermique par
conduction au sein de matériaux hétérogènes**

Soutenu le /06/2022 devant le jury composé de:

Haddad Zakaria	Université de M'sila	Président
Benmansour Nadia	Université de M'sila	Rapporteur
Tahrour Farouk	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir accordé volonté et patience dans l'accomplissement de ce travail.

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur, **Dr. Nadia***

***Benmansour** maitre de conférence de l'université de M'sila, pour l'intérêt qu'elle a portée à ce travail et pour ses orientations, ses conseils au long de réalisée de ce projet de fin d'étude.*

Nous tenons aussi remercier les membres du jury qui ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Louange à Dieu, peu importe combien nous le louons, nous ne serons pas égaux dans sa louange, et prières et paix soient sur le Messager de Dieu. À celle qui m'a porté et ici et m'a mis ici et a rétréci l'amertume du monde pour goûter sa douceur et son nom a été la première chose que mes lèvres ont prononcée. À qui elle est satisfaite, le Très Miséricordieux est satisfait de moi, et grâce à elle la langue est impuissante, et le cœur ne l'oubliera pas pendant des années. Ma mère, puis ma mère, puis ma mère, que Dieu lui fasse miséricorde et la mette en paix, A celui qui a vu dans ma personnalité un rêve devenu réalité A celui qui a fait de sa fatigue une arme pour moi et de sa souffrance un réconfort pour moi, A celui qui a illuminé l'espoir dans ma vie et qui a veillé sur mon confort quand j'étais jeune et mon avenir grand, peu importe comment je le décris, je n'accomplirai pas son droit, mon cher père, que Dieu ait pitié de lui et mette lui dans ses vastes jardins, A ceux qui ont été joie dans cette vie mes chers frères qui, Ils ne m'ont rien épargné : Ibrahim , Meftah , Youssef et Aissa, Un grand merci à eux pour leur aide, je leur souhaite du succès, A mes amis Abdessalem, Abderrahim, Hisham, le mari de ma soeur Fateh, et à tous les jeunes du vieux quartier de Ichbilia, Et à ceux qui m'ont aidé à préparer cette note, mon estimé Dr. Benmansour Nadia.

MOUSSA

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire à mes chers parents
et je les remercie pour
leur soutien, leur encouragement, conseils et surtout
ma mère pour ses
prières pour moi.

A mes chers frères : Abdennour , Zakaria , Chouaib.

A ma chère soeur : Selma.

A tous mes chers amis.

Et à tous ceux qui ont contribué à mon aide et mes
conseils, qu'ils soient de près ou de loin.

ABDERRAHIM

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Introduction.....02

Chapitre I:Généralité sur les matériaux hétérogènes

1. Matériaux Composites.....	04
1.1. Historique.....	04.
1.2. Définition.....	04
2. Constituants des matériaux composites.....	04
2.1. La matrice.....	05
2.1.1. Matrices organiques.....	05
2.1.2. Matrices métalliques (MM)	06
2.1.3. Matrices céramiques (MC)	06
2.2. Les renforts.....	06
2.2.1. Renforts organiques.....	07
2.2.2. Renforts inorganiques.....	08
2.3. Les additions.....	10
2.4. L'interface.....	11
3. Classification des matériaux composites.....	11
3.1. Classification suivant la nature des constituants.....	11
3.1.1. Composites à matrice organique (CMO)	11
3.1.2. Composites à matrice métallique (MMC)	11

3.1.3.Composites à matrice céramique (CMC)	11
3.2.Classification suivant la forme des constituants.....	12
3.2.1.Composites à fibres.....	12
3.2.2.Composites à particules.....	12
4.Architecture d'un matériau composite.....	13
4.1.Les mono-couches.....	13
4.2.Les stratifiés.....	13
4.3.Les sandwichs.....	14
5.Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	15
6.Domaines d'application.....	16
6.1.Applications aérospatiales.....	16
6.2.Industrie des transports terrestres et maritimes.....	16
6.3.Applications électrique et électronique.....	16
6.4.Secteur du bâtiment.....	17
6.5.Industrie des articles de sport et de loisir.....	17
6.6.Applications en médecine.....	17

Chapitre II

Modélisation numérique par conduction des composites à base des matériaux polymères

1. Matériaux composites et matrices polymères.....	19
1.1. Généralité sur les polymères.....	19
1.1.1. Définition d'un polymère	19
1.1.2. Les type de polymères.....	19
1.1.3. L'utilisation des polymères dans le domaine d'isolation thermique.....	19
1.1.4. Les propriétés mécaniques.....	19
1.1.5. Les propriétés thermiques.....	20

1.2 Les composites à matrices polymères et leur applications.....	20
1.2.1. Les composites souples.....	20
1.2.2. Les composites rigides.....	21
2.Modélisation numériques du transfert thermique dans les matériaux.....	22
2.1.Introduction générale sur le transfert de chaleur.....	22
2.1.1.La conduction	23
2.1.2. La résistance thermique de contact d'un composite.....	25
2.1.3. La conductivité thermique effective.....	26
2.2. Les Méthodes numériques.....	26
2.2.1. Méthode des différences finies (M.D.F).....	27
2.2.2. Méthode des éléments finis (M.E.F).....	27
2.2.3. Méthode des volumes finis (M.V.F).....	28
3. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.....	29

Chapitre III

Etude du transfert thermique du composite EVA/SiO₂

1.Introduction	33
2.Formulation mathématique	33
3.Conditions aux limites.....	34
4.Propriétés de ma Matrice et de la charge	35
5.Etapes de modélisation.....	35
5.1.Le Maillage de la géométrie.....	38
5.2.Post-traitement des données calculées.....	39
6.Résultats et discussion.....	40
6.1.Effet de la concentration.....	40
6.2.Comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimental.....	42
6.3.Effet de la résistance de contact.....	44
6.4.Effet de maillage.....	44
Conclusion.....	48

Références

Résumé

Liste des tableaux

Tableau(I.1) Caractéristiques générales des fibres de verre.....	08
Tableau(I.2) Les avantages et les inconvénients des matériaux composites.....	15
Tableau (III.1) Paramètres thermophysiques des matériaux.....	35
Tableau (III.2) Les résultats numériques et expérimental en fonction des concentrations de charge.....	43

Liste de figure

Figure (I.1)	Les constituants principaux d'un matériau composite.....	04
Figure (I.2)	Les différentes types de matrice	05
Figure (I.3)	Les différents types de renfort	07
Figure (I.4)	Fibres d'aramide	08
Figure (I.5)	Fibres de verre	09
Figure (I.6)	Fibre de carbone	09
Figure (I.7)	Fibres métalliques.....	10
Figure (I.8)	Classification des composites suivant la forme des constituant.....	12
Figure (I.9)	Structure des matériaux composites monocouches.....	13
Figure(I.10)	Structure d'un composite stratifié	14
Figure(I.11)	Structure d'un matériau sandwich	14
Figure(II.1)	La famille des composites souples avec matrice polymère et leurs applications.....	21
Figure(II.2)	La famille des composites rigides et leurs applications.....	22
Figure(II.3)	Schéma du transfert de chaleur conductif.....	23
Figure(II.4)	Etapes générales de la méthode des éléments finis.....	28
Figure(II.5)	Interface utilisateur de COMSOL.....	30
Figure (III.1)	Géométrie physique et conditions aux limite.....	35
Figure (III.2)	choix du modèle.....	36
Figures (III.3)	Géométries étudié.....	37
Figure (III.4)	Définition des propriétés des sous domaine.....	37
Figure (III.5)	Définition des conditions aux limite.....	38
Figure (III.6)	Maillage de la géométrie.....	39
Figure (III.7)	Distribution de la température dans la cellule élémentaire.....	40
Figure (III.8)	Conductivité thermique effective en fonction de la concentration de la charge pour une résistance $R_c=10^{-1}$	42
Figure (III.9)	Comparaison des résultats numériques et expérimental de la conductivité thermique effective de composite EVA/SiO ₂	43
Figure (III.10)	Variation de la conductivité thermique effective en fonction de la concentration de charge pour différentes valeurs de la résistance de contact.....	44

Figure(III.11) Effet du maillage sur la conductivité thermique effective45

NOMENCLATURE

Symbole	Définition	Unité
Cp	Capacité calorifique	J/kg.k
D	La diffusivité thermique	m²/s
e	Effusivité thermique	J/m².s^{1/2}.k
Kch	Conductivité thermique de charge	W/m.k
Keff	La conductivité thermique effective du composite	W/m.k
Km	Conductivité thermique de matrice	W/m.k
K	Conductivité thermique du matériau	W/m.k
Lz	La longueur de la cellule élémentaire	m
m	masse	kg
Q	Quantité de chaleur	J
q₀	La densité de flux	W/m²
Rc	Résistance de contact adimensionnelle	--
rc	La résistance thermique de contact dimensionnelle	K/m².w
r	Rayon	m
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur	m²
T	La température	k
t	Le temps	s

Caractères grecs

Φ	Puissance transférée	w
ρ	Masse volumique du matériau	Kg/m³
Δ	Gradient	--
φ	Fraction de la charge	%

Indices

Eff	effective
m	Matrice
ch	Charge
EVA	Polymère d'éthylène acétate de vinyle
Sio2	Poudre de verre non argentée
Div	Divergence
M.D.F	Méthode des différences finies
M.E.F	Méthode des éléments finies
M.V.F	Méthode des volumes finies

Introduction

Introduction

Les évolutions technologiques croissantes ont conduit à la nécessité de trouver de nouveaux matériaux alliant de bonnes propriétés (dureté, résistance mécanique, rigidité élevée et légèreté, propriétés thermiques). Ces propriétés physiques ne peuvent pas être obtenues dans un seul matériau simple. Pour atteindre cet objectif, les matériaux traditionnels doivent être remplacés par des matériaux composites (matériaux hétérogènes).

Le sens le plus courant du composite est la combinaison de plusieurs matériaux pour obtenir un nouveau matériau aux propriétés améliorées. Aujourd'hui, les matériaux composites sont utilisés dans presque toutes les applications techniques, telles que l'industrie aérospatiale, les transports terrestres et maritimes, etc. La composition et la structure de ces matériaux affectent considérablement leurs propriétés thermophysiques.

La conductivité thermique effective ou équivalente est une propriété nécessaire pour étudier le comportement thermique de ces matériaux hétérogènes.

La caractérisation thermique des matériaux constitue un domaine important de la métrologie thermique qui concerne plus particulièrement la connaissance des grandeurs liées au transport de chaleur. En effet, différentes approches numériques ont été développées pour prédire la conductivité thermique, diffusivité thermique et la chaleur spécifique et quelques propriétés des composites. Les techniques numériques les plus courantes incluent : Différence finie, Elément Fini, Volume Fini [11].

Notre travail consiste à étudier le comportement thermique des composites à matrices polymères. L'objectif principal était de simuler numériquement la conductivité thermique effective du polymère éthylène-acétate de vinyle (EVA) avec une charge de poudre de verre non argentée (SiO_2). La résolution numérique passe principalement par l'approximation de l'élément fini.

Ce mémoire est articulé en trois chapitres:

Le premier chapitre s'intéresse à des informations générales sur les matériaux composites (historique, définition, éléments constitutifs, classification, structure, avantages, limites et principaux domaines d'application).

Dans **le second chapitre**, la première partie est consacré aux matériaux composites et matrices polymères. La deuxième partie présente une généralité sur le transfert de chaleur au sein des matériaux, et les méthodes numériques les plus connues qui permettent la modélisation du transfert thermique des matériaux, ainsi une présentation du logiciel Comsol utilisés dans notre étude.

Introduction

Le but de **troisième chapitre** est d'illustrer l'approche numérique suivie pour la détermination de la conductivité thermique des composites (EVA/ SiO₂) en utilisant le logiciel Comsol, ainsi que la démarche à suivre pour la modélisation numérique.

Enfin, on termine par une conclusion, où les principaux résultats obtenus sont mentionnés.

Chapitre I

Généralité sur les matériaux

hétérogènes

1. Matériaux composites

1.1. Historique

La combinaison de matériaux pour former un nouveau système de matériaux avec l'amélioration des propriétés des matériaux est un fait historique bien documenté. Par exemple, les anciens ouvriers égyptiens pendant leur mandat sous les pharaons utilisaient des pailles hachées dans des briques comme moyen de améliorer leur intégrité structurelle même certains artisans de la Méditerranée et de l'Extrême-Orient utilisaient une forme de technologie composite pour mouler des œuvres d'art qui étaient fabriquées en superposant du papier découpé de différentes tailles pour produire les formes et les contours souhaités[1]. Les Chinois utilisaient des pailles hachées pour renforcer leurs briques et murs en terre crue. Les épées utilisées par les guerriers japonais étaient construites avec des couches de métaux. Les matériaux composites sont idéaux pour les structures qui nécessitent des rapports résistance / poids et rigidité / poids élevés [2]. La croissance rapide de la science et de la technologie composites s'est produite dans les années 1950 aux États-Unis et en Europe. L'industrie des composites a commencé à mûrir dans les années 1970 [3].

1.2 Définition

Un composite est un matériau avec deux ou plusieurs constituants ou phases distincts qui ont des propriétés physiques ou chimiques différentes, qui sont construits dans une architecture complexe à des niveaux micro, méso ou macro [4].

2. Constituants des matériaux composites

En générale un matériau composite est constitué principalement d'une matrice, des additions, des renforts et des interfaces, les propriétés de ce matériau dépendant directement à la nature et la proportion de ses différents constituants [5].

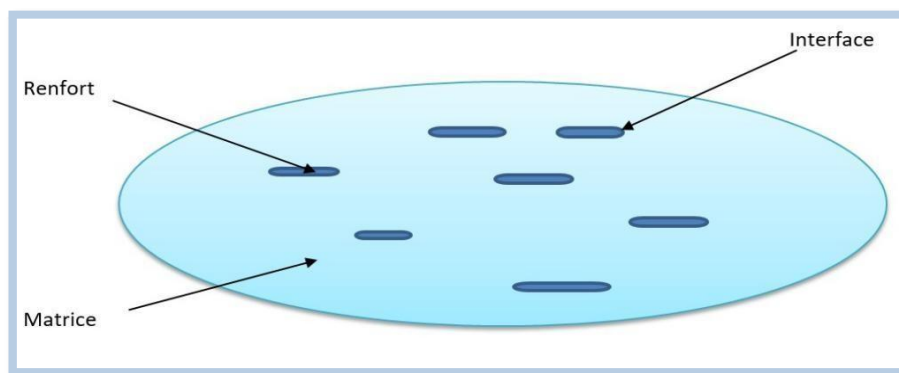


Figure (I.1): Les constituants principaux d'un matériau composite

2.1. La matrice

La matrice permet de lier les renforts entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). Généralement, c'est un polymère ou une résine organique. Les résines les plus utilisées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques [6]. La figure ci-dessous représente les types de matrices les plus courants.

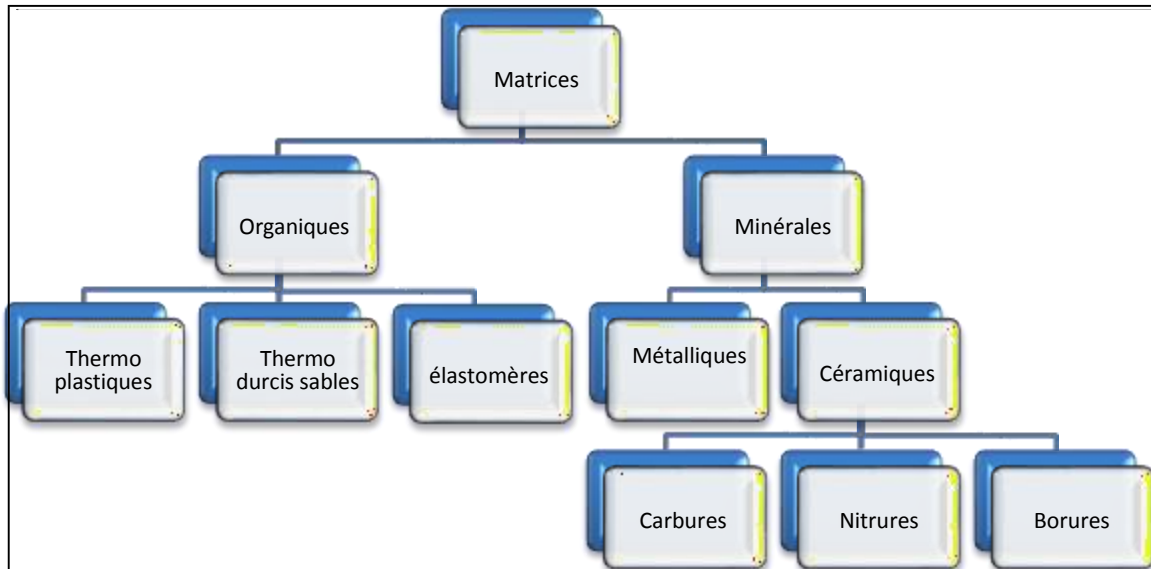


Figure (I.2): Les Différentes types de matrice [7]

2.1.1. Matrices organiques

Ces matériaux possèdent de bonnes propriétés mécaniques et une faible masse volumique. Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques [8].

➤ Matrices thermoplastiques (TP)

Les thermoplastiques sont des chaînes polymères reliées entre elles par de faibles liaisons. Ils sont recyclables et possèdent au moins un solvant. Les thermoplastiques représentent le plus grand tonnage en termes de production à cause de leur facilité de mise en œuvre et des faibles coûts [9].

➤ Matrices thermodurcissables (TD)

Les matrices thermodurcissables sont des polymères qui, après un traitement

thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces polymères ont la particularité de ne pouvoir être mis en forme qu'une seule fois cela engendre le problème de recyclage [10]. Mais ils possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport aux thermoplastiques [9].

2.1.2. Matrices métalliques (MM)

Les matrices métalliques les plus utilisées sont : l'aluminium et son alliage, le nickel, le titane et le magnésium. Ces matrices sont présentes d'excellentes propriétés physiques et chimiques par rapport aux matrices organiques telles que : une tenue en température élevée, bonne conductivité électrique et thermique [5].

2.1.3. Matrices céramiques (MC)

Les matrices les plus utilisées sont composées de carbone, de silicium de carbure (SiC), d'alumine ou de verre [11]. Ce type est très difficile puisqu'elle nécessite des manipulations à des températures très élevées d'où l'intervention de main d'œuvre très qualifiée [12].

2.2. Les renforts

Le renfort est le squelette ou l'armature du composite, il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc...). Il permet aussi d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en hautes températures, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont : des caractéristiques mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une bonne facilité de mise en œuvre, un faible coût, etc... [13,14]. La figure ci-dessous représente les types de renforts les plus courants.

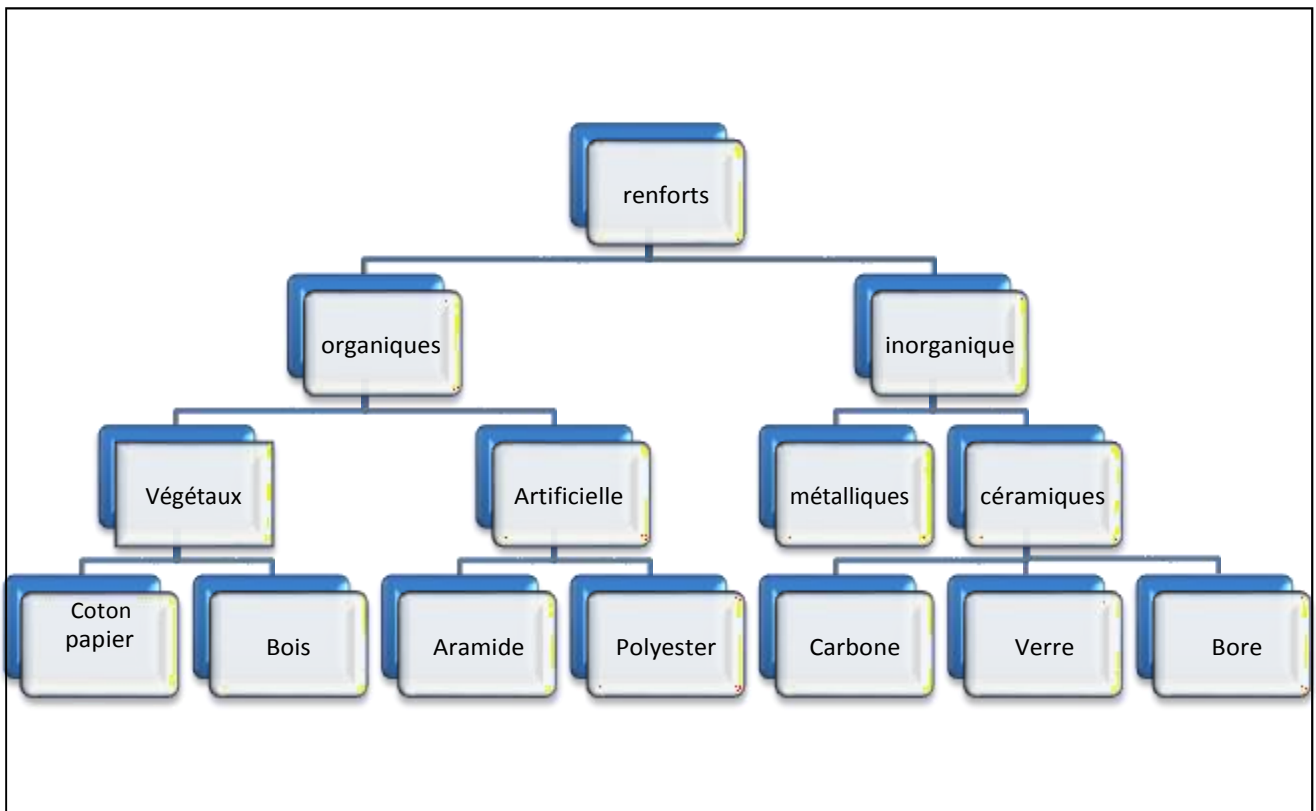


Figure (I.3): Les différents types de renfort [15]

2.2.1. Renforts organiques

➤ Les fibres aramides

Au niveau industriel, les fibres organiques les plus utilisées sont les fibres d'aramide. Elles sont les premières fibres organiques à être utilisée comme renfort dans les structures composites [16].

Les fibres aramides (généralement connues sous le nom de "Kevlar", nom commercial de la fibre mise au point par Dupont de Nemours) sont des polymères polyamides aromatiques, caractérisées par une stabilité thermique élevée et des propriétés diélectriques. En outre, les fibres d'aramide présentent une faible densité, une haute résistance à la traction et des caractéristiques exceptionnelles de rigidité. Le comportement de ces fibres est semblable à celui des métaux car sous faible charge elles sont élastiques et deviennent plastiques quand elles sont soumises à de fortes contraintes, elles constituent un bon compromis entre les fibres de carbone et celles à base de verre [17,18].

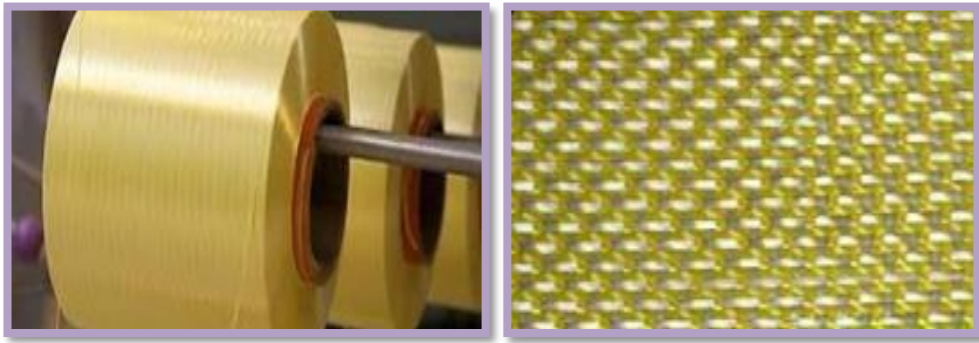


Figure (I.4): Fibres d'aramide [19]

2.2.2. Renforts inorganiques

Les principales fibres inorganiques sont:

➤ **Les fibres de verre**

Les fibres de verre sont les plus anciennes (1940) et les moins chères (environ 1 euro/kg) des fibres du marché [20], ont un excellent rapport performance mécanique/prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composite. Elles sont obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore) [21]. On distingue généralement différents types des fibres qui sont utilisés pour des applications spécifiques, leurs caractéristiques majeures sont répertoriées dans le Tableau ci-dessous

Types de fibres	Caractéristiques générales
A	Haute teneur en alcali
C	Bonne résistance chimique
D	Hautes propriétés diélectriques
E	A usage général ; bonne propriétés électriques
R,S	Haute résistance mécanique

Tableau (I.1): Caractéristiques générales des fibres de verre [22]

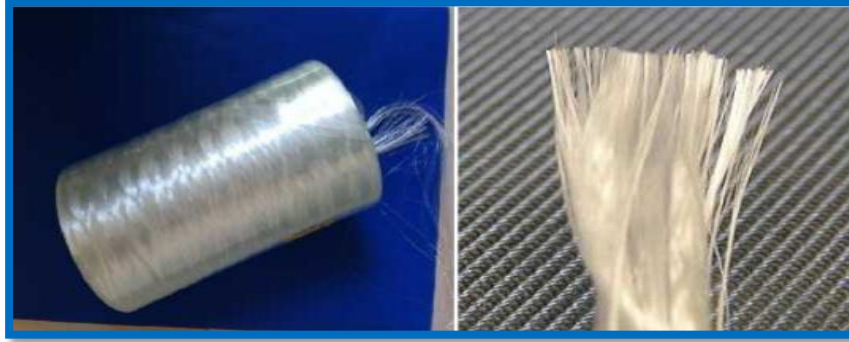


Figure (I.5): Fibres de verre [23]

➤ **Les fibres de carbone**

Elles sont obtenues à partir de la pyrolyse d'une fibre organique appelée précurseur. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone. Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé. Ces fibres sont utilisées en raison des propriétés de l'élément de Carbone et en raison de leur flexibilité [24].



Figure (I.6): Fibre de carbone [23]

➤ **Les fibres de bore**

Les fibres de bore sont obtenues par réduction à 1100 °C de chlorure de bore, qui se dépose sur un fil de tungstène de 10 à 15 mm de diamètre [20]. De prix très élevé, cette fibre est réservée à des applications impliquant des conditions très sévères d'emploi [17].

➤ **Fibres de silice**

Les fibres de silice 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 [25].

➤ **Fibres métalliques**

Les fibres métalliques (acier, cuivre, aluminium) sont plus utilisées dans le domaine de génie civil. Elles caractérisées par un module d'élasticité élevé, offrent au béton, une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable [26].



Figure (I.7): Fibres métalliques [26]

➤ **Fibres de céramique**

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) [18,20,21]. 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 (Bor Sic)[18].

2.3. Les additions

En générale les additifs sont tous substance qui introduite dans les matrices pour apporter des propriétés spécifiques, ils se trouvent en faible quantité (quelque%) et

interviennent comme (adjuvants ; lubrifiants et agents de démoulage ; pigments et colorants ; agents anti-retrait ; agents anti-ultraviolets etc....) [5].

2.4. L'interface

Entre le renfort et la matrice existe une zone de liaison appelée interface (interphase) qui se forme spontanément lorsque deux phases sont mises en contact l'une de l'autre au moment de l'élaboration du matériau et qui se maintient entre ces deux phases pendant toute la vie du matériau [27].

3. Classification des matériaux composites

La classification des composites peut être effectuée selon deux façons. Une manière consiste à les classer selon la nature de la matrice et un autre selon les formes des renforts.

3.1. 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 $T < 1000\text{ C}^\circ$) [12,28].

3.1.1. 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 [29,30].

3.1.2. 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 [30]. 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 [29,31].

3.1.3. 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 [30]. 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 [29,31].

3.2. Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la géométrie des constituants (géométrie des renforts), nous pouvons diviser les matériaux composites en deux grandes classes : les matériaux composites à fibres et les matériaux composites à particules.

3.2.1. Composites à fibres

On peut dire que le matériau composite est un matériau composé à fibre si le renfort se trouve sous forme de fibres, c'est-à-dire qu'il possède une direction privilégiée. L'arrangement des fibres, leur orientation définissent les propriétés souhaitées et peuvent rendre le matériau fortement anisotrope ou fortement isotrope dans un plan[32]. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues (fibres longues), soit sous forme de fibres discontinues (fibres courtes).

3.2.2. Composites à particules

On peut dire que le matériau composite est un matériau composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide [29], ces 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.....[33].

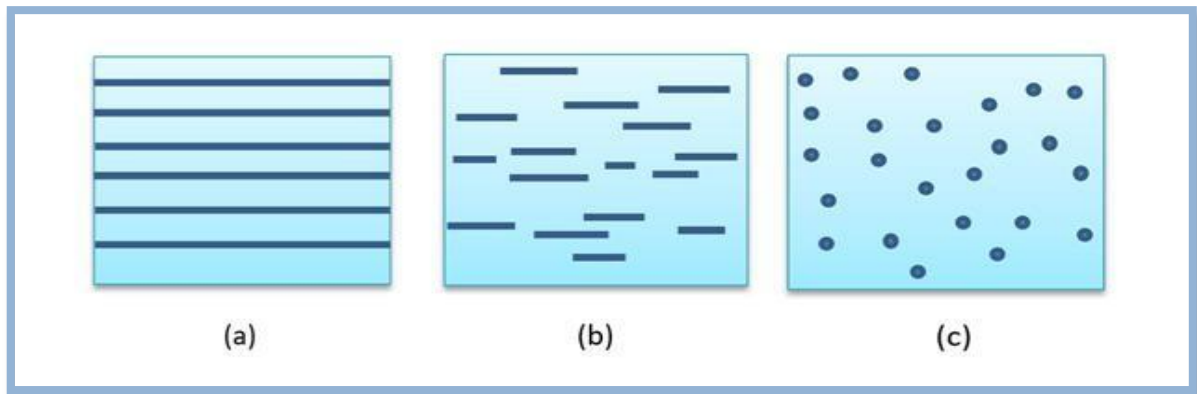


Figure (I.8) : classification des composites suivant la forme des constituants ((a) : composite à fibres longues, (b) : composite à fibres courtes, (c) : composite à particules)

4. Architecture d'un matériau composite

La plupart des propriétés physiques des matériaux composites sont relativement conditionnées par ses structures. Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types : les monocouches, les stratifiés et les sandwichs.

4.1. Les mono-couches

Les monocouches (plis) 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, Tissées), à fibres courtes (structure orienté, aléatoire) [15].



Figure (I.9) : structures des matériaux composites monocouches [45].

4.2 Les stratifiés

Les stratifiés ou multicouches sont constitués d'un empilement successif de plusieurs monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié (La superposition des monocouches) [46]. L'avantage

que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure [27].

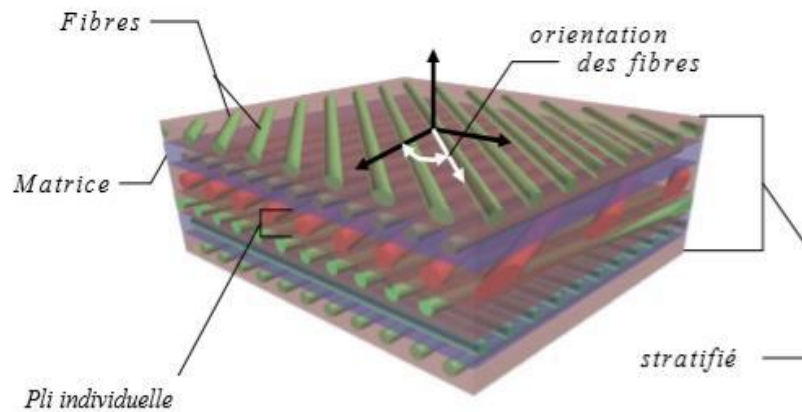


Figure (I.10) : structure d'un composite stratifié [47]

4.3 Les sandwichs

Les sandwichs sont des matériaux possédant deux peaux de grande rigidité et de faible épaisseur renfermant un cœur (âme) de forte épaisseur et de faible résistance. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Ces structures possèdent une grande rigidité en flexion et torsion et d'une excellente isolation thermique [11.27].

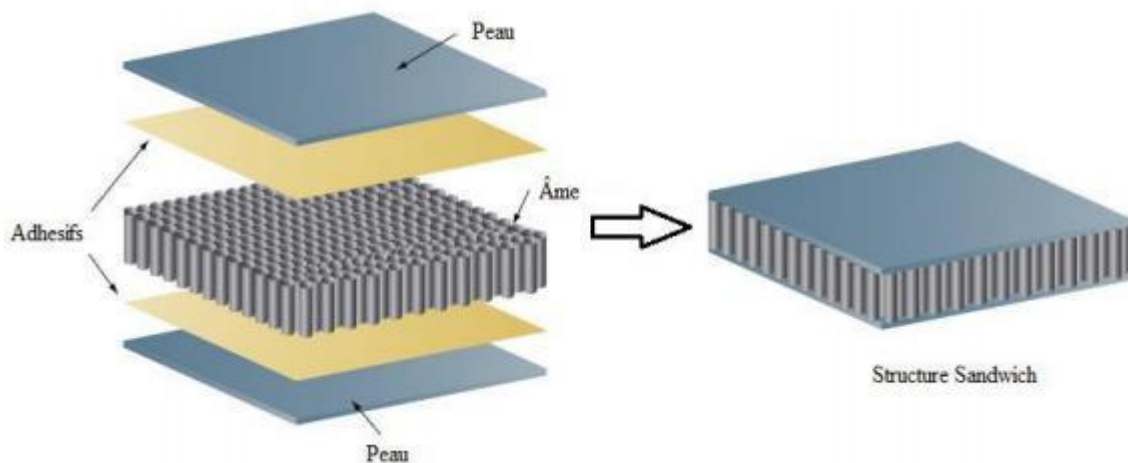


Figure (I.11) : Structure d'un matériau sandwich [48]

5. Avantages et inconvénients des matériaux composites

Les matériaux composites présentent de nombreux avantages et certains et inconvénients, peuvent être résumés dans le tableau ci-dessous.

Avantages	Inconvénients
Intégration de fonctions des composants élémentaires (propriétés améliorées)	Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
longue durée de la vie	Sensibilité aux agents atmosphériques (eau, rayons UV, humidité, température...)
L'adaptabilité	Difficulté à réparer
Absence de corrosion	Matériaux très sensibilité à la chaleur
Tenue aux agents chimiques (résistance chimique)	L'augmentation des déchets qui en résultent et difficulté d'élimination ou de recyclage
Résiste au feu	
Gain de masse (la réduction du poids)	
Grande résistance à la fatigue	
Très bonne légèreté et souplesse	
La possibilité de fabriquer des grandes ainsi que des petites pièces sous différentes formes (formes complexes)	
Peut être utilisé dans un large éventail d'applications	
Résistance élevée aux chocs	

Tableau (I.2) : Les Avantages et les inconvénients des matériaux composites [34,35]

6. Domaines d'application

Les composites sont largement utilisés dans l'industrie, parce qu'ils présentent de bonnes caractéristiques telles la rigidité, légèreté et résistance à des contraintes d'origine mécanique ainsi qu'à celles d'origine thermique.

6.1 Applications aérospatiales

La transition des matériaux composites de l'expérience de laboratoire à l'usage pratique dans la production des avions militaires et civils est une réalité. Des progrès ont passé de l'aviation militaire à l'aviation commerciale, et aujourd'hui à la communauté d'aviation générale (environ 50% de la composante de l'espace aérien est constituée des composites), l'industrie aérospatiale utilise principalement des composites en fibre de carbone en raison de leurs caractéristiques de haute performance [36,42].

La principale motivation d'utilisation des matériaux composites pour la réalisation de structures sur les produits aéronautiques est essentiellement le gain de masse apporté tout en conservant d'excellentes caractéristiques mécaniques. L'utilisation de matériaux composites dans les constructions aéronautiques entraîne un gain de poids substantiel dont les gains de masse varient de 10 à 20% [9].

6.2 Industrie des transports terrestres et maritimes

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, chez les grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) pour développer des coffres et hayons. La société LOHEAC de transports routiers [37], a pu réduire substantiellement sa consommation de carburant grâce à l'économie de poids obtenue en remplaçant les cabines conventionnelles de ses tracteurs par de nouveaux éléments moulés en une seule pièce renforcés de fibre à haute résistance [38]. Les composites sont choisis pour la conception de ressorts à lames [39]. Ce sont des pièces de suspension routières très sollicitées, utilisées par les véhicules de gros tonnage et dont la lame secondaire, assurant 80% de la fonction suspension en évitant des ruptures brutales. [40].

6.3 Applications électrique et électronique

L'équipement industriel (boîtes de stockage, isolation) et l'équipement électronique, représentent

déjà 26% du marché des composites à matrice organique. Le potentiel plurifonctionnel des composites (alliant par exemple étanchéité et propriétés électriques) est important. En électronique, les boîtiers céramiques pour microprocesseurs d'Egide, récemment introduits au nouveau marché, sont utilisés dans le monde entier [41].

6.4 Secteur du bâtiment

Les composites ont relativement utilisé dans le secteur du bâtiment, notamment du fait :

- d'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels. d'une relative méconnaissance des architectes et bureaux d'études vis-à-vis de composites.
- d'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclabilité, durabilité).

Les qualités des composites (légèreté, résistance au feu, résistance mécanique et chimique), permettent de prévoir un développement prometteur [44].

6.5 Industrie des articles de sport et de loisir

En raison de leur légèreté, leur bonne tenue à la fatigue statique et dynamique, leur stabilité dimensionnelle et haut degré d'amortissement des vibrations de stabilité thermique supérieure, de bonne résistance au frottement et à l'abrasion, et peut être traité et façonné facilement, les composites sont des matériaux idéaux pour la fabrication et la conception de très nombreux des équipements sportifs et de loisirs contrairement aux matériaux traditionnelles tels que : les bateaux de planification, les voiliers, les skis et les bâtons, les raquettes de tennis , les cannes à pêche , le hockey, les planches à voile et les mâts, les yachts amusants, les arches, cadres de vélo et instruments de musique etc....[43,44].

6.6 Applications en médecine

Les composites sont des matériaux non viables utilisé dans des dispositifs médical et destiné à interagir avec le système biologique. Au fil des siècles, les progrès des matériaux synthétiques, des techniques chirurgicales et des méthodes de stérilisation ont permis l'utilisation de matériaux composites de nombreuses manières. La pratique médicale utilise aujourd'hui un grand nombre de dispositifs et d'implants. Composites sous forme de sutures, remplacements osseux et articulaires, greffes vasculaires, valves cardiaques, lentilles intraoculaires, implants dentaires, stimulateurs cardiaques, biocapteurs, cœurs et membres artificiels,...etc. Largement utilisés pour restaurer la fonction de tissus ou d'organes perturbés ou dégénérés, améliorer la

Chapitre I Généralité sur les matériaux hétérogènes

fonction, aider à la cicatrisation, corriger les anomalies et ainsi améliorer la qualité de vie des patients[42]

Chapitre II

Modélisation numérique par conduction des composites à base des matériaux polymères

1. Matériaux composites et matrices polymères

1.1. Généralité sur les polymères

1.1.1. Définition d'un polymère

Le mot « polymère » vient du grec « poly » signifiant plusieurs et « meros » parties ou unités. En effet, un matériau macromoléculaire ou polymère est constitué de longue chaîne ou les unités de répétition sont toutes les mêmes (homopolymère) ou de nature différente (copolymère). La cohésion des atomes sur une même chaîne est assurée par une liaison chimique forte, tandis que les liaisons interchaîne sont plus faibles. La présence de liaisons faibles et fortes apporte aux matériaux polymères des propriétés physicochimiques particulières [49].

1.1.2. Les types de polymères

Il existe deux types de polymères :

- les homopolymères.
- les copolymères.

* Les homopolymères

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Nous citons comme exemple, le polyéthylène [50].

* Les copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymères [51].

1.1.3. L'utilisation des polymères dans le domaine d'isolation thermique

Les matériaux polymères sont souvent utilisés comme isolants en raison de leur faible conductivité thermique. L'ajout de fibres conductrices de chaleur peut augmenter significativement la conductivité thermique effective des polymères. L'utilisation de polymères chargés permet de réaliser une géométrie complexe tout en assurant un coût de production inférieur et un allègement par rapport aux matériaux métalliques. Cependant, la quantité de charges nécessaire pour assurer une augmentation significative de la conductivité est élevée [52].

1.1.4. Les propriétés mécaniques

La grande majorité des polymères sont utilisés pour supporter des charges, c'est-à-dire qu'ils ont une fonction mécanique. Pour assurer cette fonction souvent critique, il convient de dimensionner les pièces de structures, afin d'assurer leur résistances mécaniques et leur durée de vie en service. Les propriétés mécaniques des polymères sont fortement influencées par la température et la vitesse de déformation. Pour un même matériau, une augmentation de la

température conduit à un comportement évoluant de fragile à ductile, de même qu'une décroissance de la vitesse de déformation [53].

1.1.5. Les propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des polymères dépendent fortement de la température. À basse température la plupart des polymères présentent un état vitreux, ils sont rigides. Lorsque la température augmente ils passent par un état vitreux : pour une plage spécifique de la température, les chaînes macromoléculaires glissent les unes par rapport aux autres et le polymère se ramollit, cette plage de température est appelée température de transition vitreuse noté Tg. À une température plus élevée le polymère passe à l'état caoutchoutique : son comportement est viscoélastique. À cet état les forces de van der Waals et la réticulation entre chaînes servent de force de rappel lorsque l'on déforme le matériau. Enfin lorsque l'on élève la température de polymère peu réticulé, on peut assister à une phase d'écoulement visqueux, correspondant au désenchevêtrement des chaînes. Ce dernier comportement est utilisé pour mettre en forme les matières plastiques [54].

1.2 Les Composites à matrices polymères et leur applications

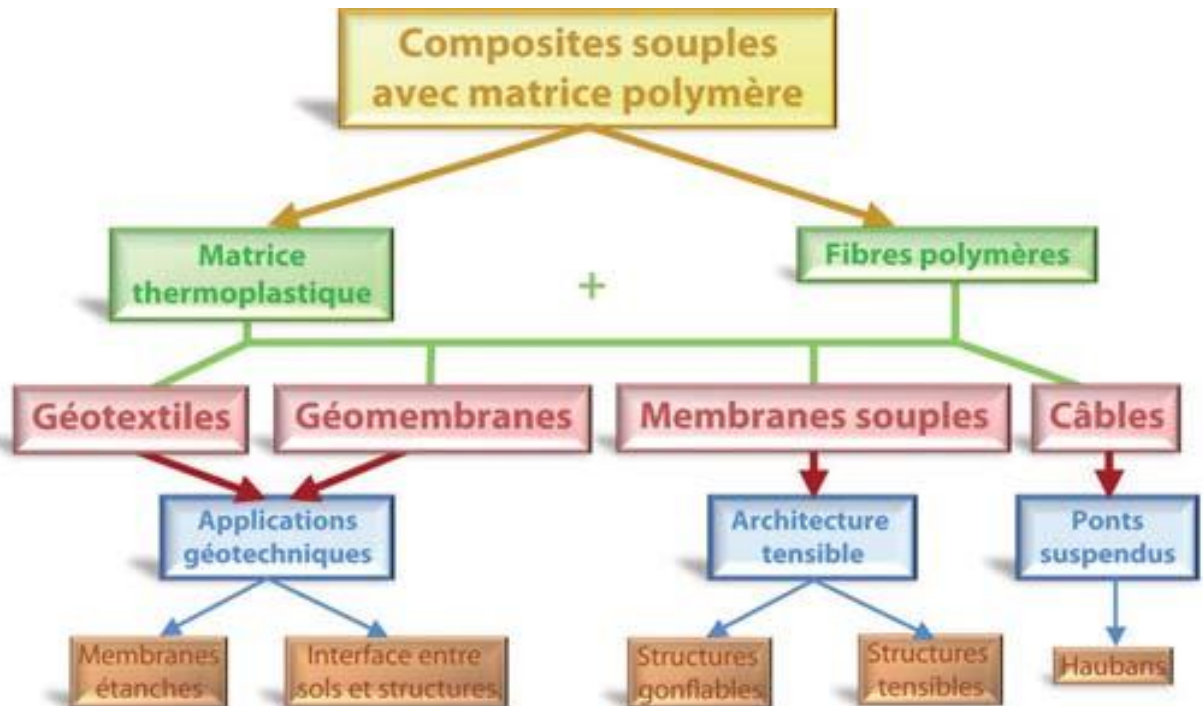
Les composites sont des combinaisons de charges ou de sous-structures (généralement minérales) avec une matrice polymère thermodurcissable ou thermoplastiques.

Ils sont classés en composites "souples" d'une part et en composites "rigides" d'autre part.

1.2.1. Les composites souples

Les composites souples sont des matrices thermoplastiques avec des fibres polymères.

- ❖ Ils permettent de réaliser des architectures étirées.
- ❖ Fabrication de structures gonflables telles que des couvertures de stade.
- ❖ Ils peuvent également faciliter le développement de câbles, ouvrant la voie à des applications d'infrastructure telles que des ponts suspendus.
- ❖ Les composites souples peuvent aussi être des géotextiles ou des géomembranes, matériaux d'interfaces entre le bâtiment, l'habitat ou l'ouvrage et le milieu naturel généralement le sol.

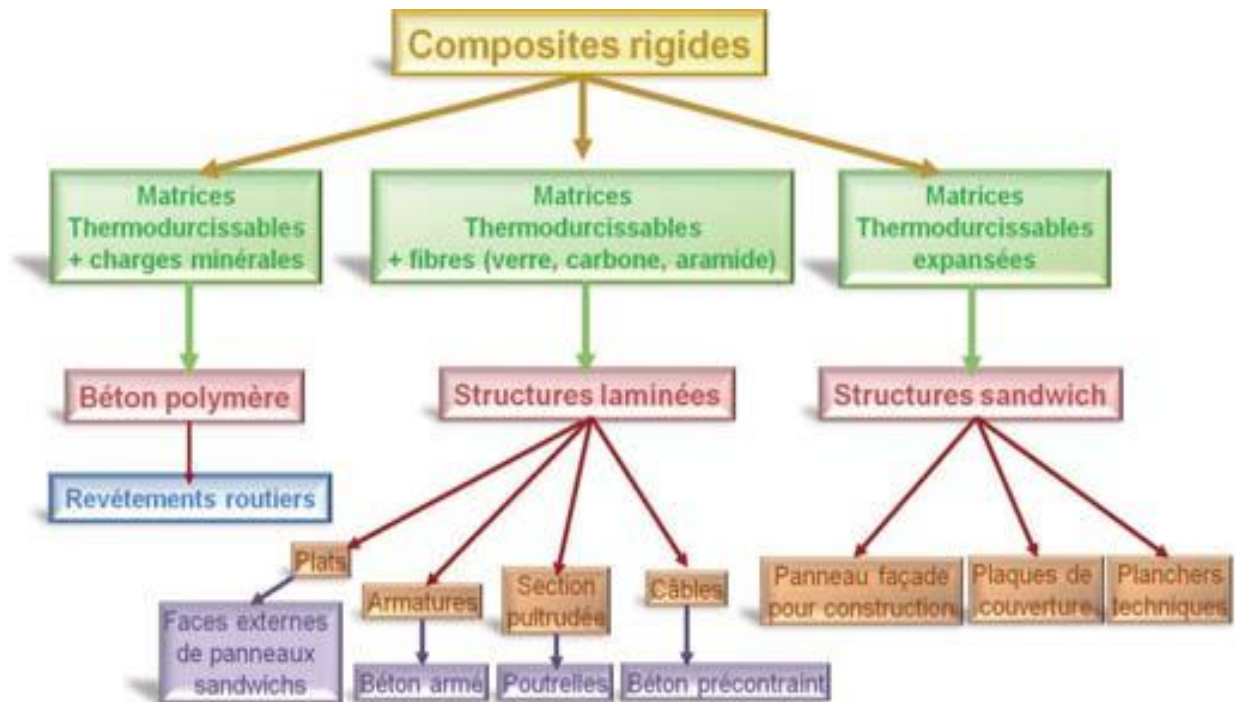


Figure(II.1) La famille des composites souples avec matrice polymère et leurs applications.

1.2.2. Les composites rigides

Les composites rigides sont des matrices thermodurcissables renforcées en général par des charges minérales.

- ❖ Ils permettent de réaliser des « bétons de polymères » ou des revêtements routiers comme les bétons de ville quand ils sont associés à des fibres telles que la fibre carbone-aramide.
- ❖ les composites rigides fournissent des armatures ou des éléments de structure porteurs tels que le profilé.
- ❖ On réalise avec ces composites des structures que l'on appelle matériaux stratifiés, qui sont autoporteurs et doivent en même temps posséder des propriétés d'isolation acoustique, phonique et thermique.
- ❖ les composites durs sont utilisés pour la fabrication d'une variété de composants intervenant dans la construction.



Figure(II.2) La famille des composites rigides et leurs applications [55].

2. Modélisation numériques du transfert thermique dans les matériaux

2.1. Introduction générale sur le transfert de chaleur

Un transfert thermique est un transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond en réalité à un transfert d'agitation thermique entre par particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique. L'exemple le plus courant de situation mettant en jeu un transfert thermique est le système constitué de deux corps en contact et ayant des températures différentes. Le corps le plus chaud cède de l'énergie sous forme de chaleur au corps le plus froid. Il y a transfert thermique entre les deux corps. L'étude de ces transferts s'effectue dans le cadre de la discipline thermodynamique en s'appuyant sur les deux premiers principes.

A la différence de la thermodynamique, la thermocinétique fournit des informations sur le mode de transfert en situation de non équilibre ainsi que sur les valeurs de flux de chaleur [56].

On distingue trois modes différents de transmission de la chaleur :

- La conduction
- La convection
- Le rayonnement

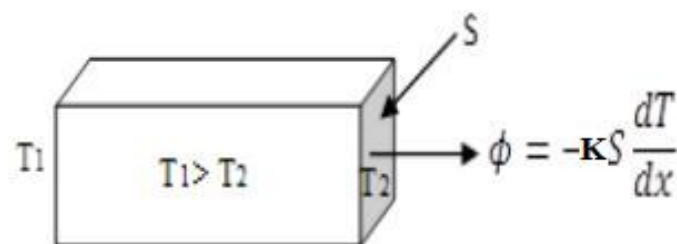
Dans ce travail seulement le transfert par conduction est pris en compte. Le sujet de transfert thermique dans les matériaux composites est l'un des problèmes classiques. Récemment, il a reçu une attention considérable en raison de l'importante croissance des systèmes à haute température, comme dans l'automobile, les structures spatiales,...etc. Les propriétés thermophysiques d'un matériau caractérisent son comportement et sa réaction face à un gradient de température. Les mesures de flux de chaleur, de densités de flux et de propriétés thermophysiques telles que la conductivité ou la diffusivité thermique sont essentielles dans l'étude des procédés thermiques. Elles permettent de prévoir la manière avec laquelle le matériau va réagir face à un environnement donné. L'information sur la conductivité thermique des matériaux est nécessaire pour déterminer les conditions optimales pendant le traitement des matériaux, ainsi que pour analyser le transport de chaleur dans les matériaux pendant les applications pratiques.

2.1.1. La conduction

Le transfert de chaleur par conduction correspond à un transfert d'énergie interne dû aux interactions entre les particules qui constituent le système thermodynamique. Il est présent dans tous les corps, quel que soit leur état (solide, liquide ou gaz).

Les lois énoncées dans cette partie définissent, à l'échelle macroscopique, le transfert thermique par conduction dans les matériaux homogène et isotropes.

Joseph Fourier a trouvé expérimentalement, en 1822, la relation entre le flux de chaleur et le champ de température (loi de Fourier):



Figure(II.3): Schéma du transfert de chaleur conductif.

$$\Phi = -k \cdot S \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Φ : Puissance transférée (W).

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m).

x : Variable d'espace dans la direction du flux.

Le signe (–) dans l'équation est dû au fait que le flux de chaleur circule dans le sens opposé au gradient de température.

k : Conductivité thermique du matériau.

Selon la loi de Fourier, représentée par l'équation (2.1), le flux thermique traversant la surface d'un corps est proportionnelle au gradient de température [57].

➤ **Equation générale de la chaleur :**

Le bilan énergétique et le premier principe de la thermodynamique appliqués au système étudié permettent l'établissement de l'équation générale de la chaleur :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div} \varphi \quad (2.2)$$

En introduisant l'équation de Fourier dans l'équation (2.2), on peut conclure les paramètres thermophysiques suivants :

✓ **La conductivité thermique**

En physique la conductivité thermique k (W/m.K) est la grandeur introduite pour mesurer la capacité d'une substance à conduire la chaleur. Elle intervient dans la formulation de la loi de Fourier pour la conduction de la chaleur.

La conductivité thermique dépend de [58]:

- La nature physico-chimique du matériau.
- La nature de la phase considérée (solide, liquide, gaz).
- La température.
- L'orientation dans les matériaux anisotrope.

L'importance de la conductivité thermique des polymères et des composites à matrice polymère n'a cessé d'augmenter ces dernières années.

Il est également important de connaître la conductivité thermique des inclusions afin d'analyser le procédé de transfert de chaleur pendant la modélisation.

✓ **La diffusivité thermique**

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

$$D = \frac{k}{C_p \cdot \rho} \quad (2.2)$$

Avec k la conductivité thermique, C_p la capacité calorifique à pression constante et ρ la masse volumique. D est exprimé en m^2/s . Pour un matériau avec une diffusivité thermique élevée, la propagation de la chaleur est plus rapide.

La diffusivité thermique est évaluée à partir de l'évolution température - temps en utilisant un

schéma différentiel unidirectionnel (c'est-à-dire en limitant le calcul de donnée à une seule direction x), ce qui permet d'évaluer les pertes radiatives de surfaces. Le calcul de la diffusivité à partir de cette méthode devient :

$$\frac{dT}{dt} = D \frac{d^2T}{dx^2} \quad (2.3)$$

Où t est le temps, D la diffusivité thermique, x la distance comprise entre 0 et L (épaisseur) et T la température [59].

✓ **Effusivité thermique**

Notée e, elle s'exprime en $J.m^{-2}.s^{-1/2}.K^{-1}$. Elle traduit l'aptitude d'un matériau à absorber de la chaleur du milieu environnant. C'est donc la contribution de deux phénomènes à savoir d'une part la conductivité thermique k et d'autre part le stockage de l'énergie Cp : plus la conductivité thermique est grande, plus l'apport de chaleur du milieu environnant vers le matériau sera important. En outre, plus la capacité thermique à pression constante est grande, moins la chaleur emmagasinée contribuera à l'élévation de la température et laissera la possibilité d'en accumuler d'autant plus l'effusivité thermique s'exprime alors de la façon suivante :

$$e = \sqrt{k \times (\rho \times Cp)} \quad (2.4)$$

Ce paramètre intervient notamment lors de la mise en contact de deux matériaux ayant des températures différentes. La température dite « de contact » s'exprime directement en fonction de la température des deux corps et de leur effusivité respective [47].

✓ **Capacité calorifique**

La capacité calorifique ou thermique massique ou molaire est aussi appelée chaleur massique ou chaleur spécifique. Elle est déterminée par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse d'un système. C'est donc une grandeur intensive qui ne dépend pas de la masse du système étudié.

Son unité en système international est le [J/Kg. K] si elle massique ou bien [J/mol. K] si elle est molaire [44].

Considérons un solide de masse m. S'il reçoit une quantité de chaleur dQ, sa température s'élève de dT telle que:

$$dQ = - m. C. dT \quad (2.5)$$

C: désigne la chaleur massique (ou spécifique) du solide.

2.1.2. La résistance thermique de contact d'un composite

On utilise la notion de résistance thermique pour décrire les transferts de chaleur entre deux solides en contact naturel. En effet, une surface solide possède une rugosité qui peut aller de

quelques dixièmes à quelques centaines de microns. La conséquence est que la surface réelle de contact entre les deux solides ne représente que quelques pourcent de la surface totale [60].

Or, l'espace disponible entre les points de contact est occupé par un fluide (par exemple de l'air) qui peut avoir une conductivité thermique plus faible que celle des deux solides. À l'échelle macroscopique (c'est à dire à une échelle spatiale très supérieure à la rugosité des surfaces), cela entraîne une discontinuité de la température lorsque l'on passe d'un solide à l'autre. Par définition, la résistance de contact r_c relie le «saut» de température ($TP_1 - TP_2$) à la densité de flux thermique q qui traverse le contact :

$$TP_1 - TP_2 = r_c \cdot q \quad (2.6)$$

Une résistance de contact dépend d'un grand nombre de paramètres : nature des solides et du fluide interstitiel, défauts géométriques et rugosité des surfaces, pression de contact, etc. Il est très difficile de prédire par le calcul sa valeur dans une situation donnée. L'ordre de grandeur vaut typiquement 10^{-3} à 10^{-6} K.m².W⁻¹.

2.1.3. La conductivité thermique effective

En générale la valeur de la conductivité thermique k pour des matériaux isotropes (homogènes) est constante dans toutes les directions et en chaque point du matériau, par contre elle varie localement dans le cas des matériaux composites anisotropes (hétérogènes) en raison de l'existence de plusieurs phases. Dans le cas des matériaux composite anisotropes la conductivité thermique peut être approchée statistiquement grâce à une valeur moyenne équivalente : un nouveau terme K_{eff} correspondant à la conductivité thermique effective est alors introduit [61].

La détermination des valeurs de la conductivité thermique effective des matériaux composites est l'un des problèmes classiques dans les milieux hétérogènes, elle a fait l'objet de nombreuses études bibliographiques [61,62], en raison de l'importante et l'utilisation croissante de ces matériaux dans les systèmes à haute température, les applications de transfert de chaleur et de l'isolation thermique. Pour cela, il est nécessaire de connaître toutes les informations sur la conductivité thermique pour déterminer les conditions optimales pendant le traitement des matériaux, ainsi que pour analyser le transport de chaleur dans les matériaux pendant les applications pratiques [62].

2.2. Les méthodes numériques

La simulation numérique des phénomènes de transferts thermiques occupe une place très importante dans la recherche et l'industrie. La modélisation mathématique du phénomène est fondée sur les équations de la mécanique des fluides. Elle est couplées avec l'équation de

l'énergie ; leur résolution est rendue possible en utilisant une des nombreuses méthodes numériques. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer des différences finies, éléments finis et volumes finis. Cette dernière est à l'origine de plusieurs codes de calcul comme le logiciel COMSOL Multiphysics, qu'on a utilisé pour la suite de ce travail [63].

2.2.1. Méthode des différences finies (M.D.F)

La méthode des différences finies est une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles, par l'approximation des dérivées décrivant les phénomènes physiques par des différences finies. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre déterminé de nœuds et à représenter la fonction recherchée en chacun des nœuds du domaine par un développement limité en série de Taylor. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en équation algébrique pour chaque nœud. La résolution du système d'équations algébriques permet d'obtenir la distribution de la fonction étudiée dans le domaine d'étude.

La méthode des différences finies est relativement simple de mise en œuvre, mais présente l'inconvénient d'avoir une faible qualité d'approximation des variables et difficilement applicable aux domaines à géométrie complexe, elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières régulières tels que les carrés et les rectangles. Par ailleurs, elle exige un schéma de maillage très fin, qui peut ainsi se traduire par un coût de calcul prohibitif [64].

2.2.2. Méthode des éléments finis (M.E.F)

La méthode des éléments finis est considérée l'une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s'applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaires ou non linéaires, stationnaires ou non stationnaires) définis dans un domaine géométrique à une, deux ou trois dimensions et permet de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles sur un domaine compact. On parle couramment de conditions de type Dirichlet (valeurs aux bords), Neumann (gradients aux bords) ou Fourier (relation gradient/valeurs aux bords) [65].

Cette méthode a été introduite pour la première fois en 1956 par Turner, Clough, Martin et Topp [66,67].

Le principe général de la méthode des éléments finis consiste à découper le système réel à traiter en un certain nombre d'éléments à géométries simples à dimensions non infinitésimales. Cette procédure est appelée « discrétisation » car le milieu continu est remplacé par une série d'éléments discrets. Sur chaque élément, la grandeur inconnue est approchée par une fonction simple (approximation avec des polynômes simples) et le domaine peut ensuite être reconstitué

avec l'assemblage ou sommation de tous les éléments. La résolution d'un problème physique par la méthode des éléments finis suit les étapes illustrées dans la figure suivante :

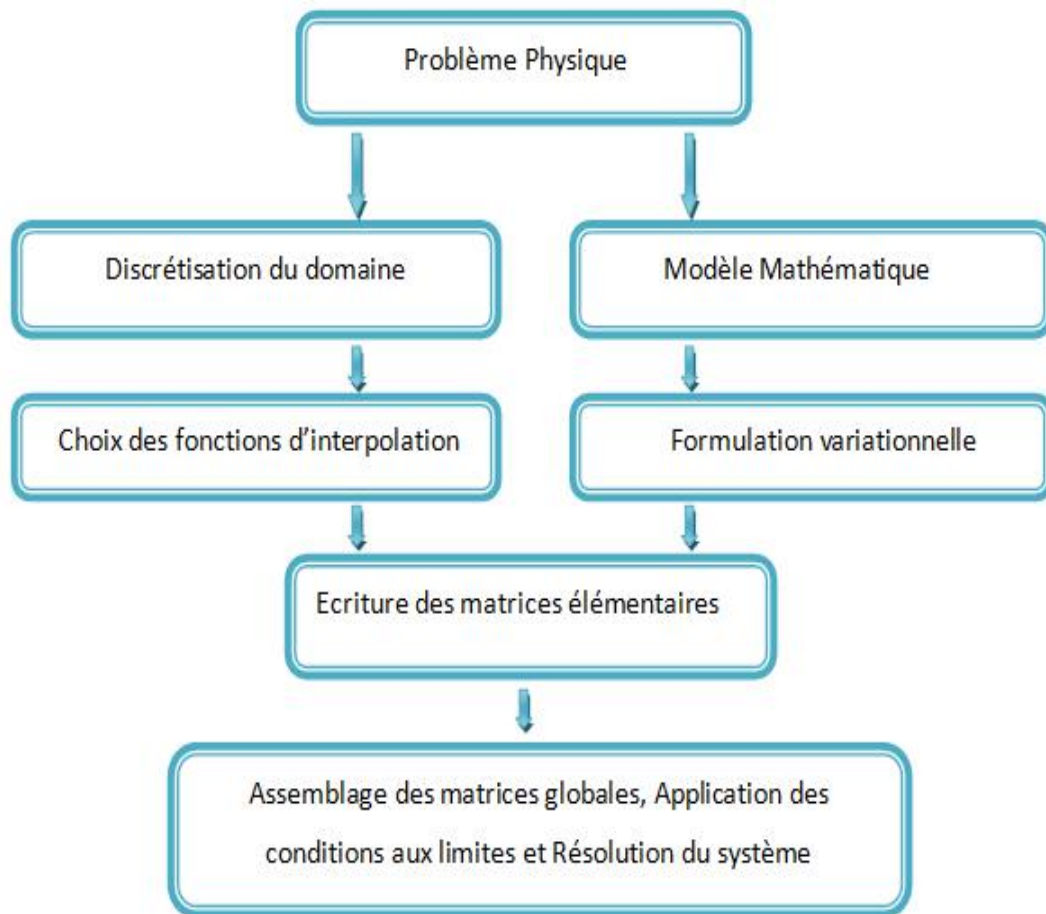


Figure (II.4) : Etapes générales de la méthode des éléments finis [68]

2.2.3. Méthode des volumes finis (M.V.F)

La méthode des volumes finis est une méthode complémentaire des méthodes précédentes (MDF et MEF). Dans cette méthode le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle, chaque volume contrôle est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel, quatre interfaces dans le cas bidimensionnel et six interfaces dans le cas tridimensionnel. L'équation au dérivé partielle est intégrée dans chacun des volumes élémentaires. Pour calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance etc ...) entre deux nœuds consécutifs [64, 69,70].

4. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

4.1. Introduction à COMSOL Multiphysics

Le logiciel COMSOL Multiphysics est un outil de simulation numérique conçu par l'entreprise « Comsol » qui spécialise dans le domaine de développement de logiciels, de support technique, de formation spécialisée et de conseil, développé au Royal Institute of Technology (Suède) [71]. Ce logiciel est largement utilisé à travers le monde pour modéliser et simuler tout système basé sur la physique parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures... Il est possible de combiner plusieurs phénomènes physiques lors d'une même simulation numérique : c'est un des points forts de ce logiciel [72].

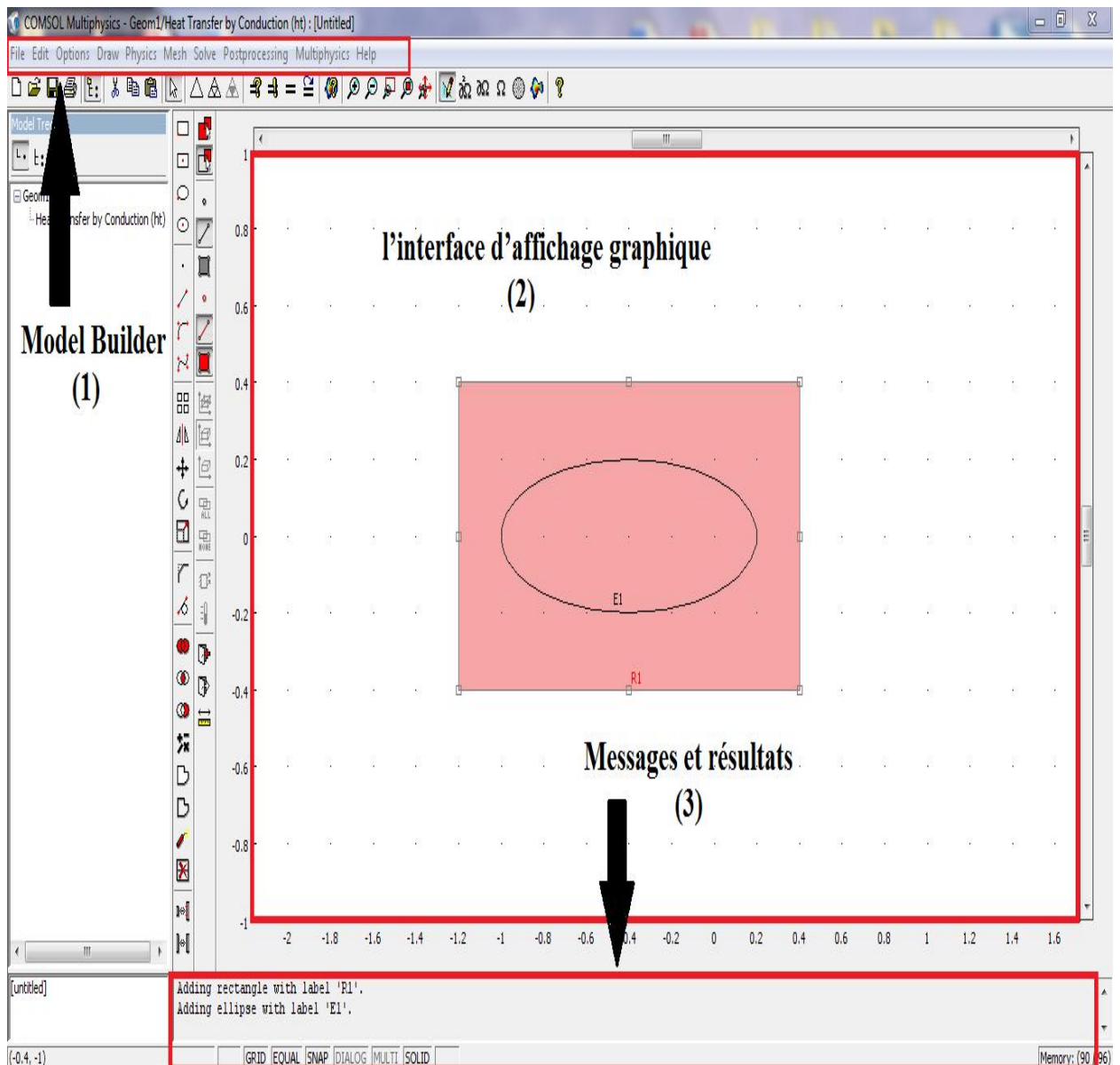
Le logiciel COMSOL basé principalement sur la méthode des éléments finis permet de traiter de nombreux problèmes grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées. Il possède de plus un environnement graphique permettant de réaliser rapidement des figures relativement complexes (en 1D, 1D-axisymétrique, 2D, 2D-axisymétrique ou 3D). Par ailleurs, COMSOL Multiphysics possède un environnement de programmation dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème. Par défaut le maillage est automatique et se compose de triangle en 2D et de tétraèdre en 3D. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits « solvers », pouvant être linéaires ou non, paramétriques ou encore dépendant du temps [73].

4.2. Avantages de la conception de modèles avec COMSOL Multiphysics

L'objectif principal de la création de COMSOL Multiphysics est d'avoir un logiciel dans lequel les scientifiques et les ingénieurs peuvent utiliser une interface utilisateur, selon les lois de la physique et Surtout basé sur les domaines les plus courants de la physique et de l'ingénierie. L'interface est basée sur un interpréteur. Grâce à cette technologie, l'équation complète, Les propriétés, les sources et les conditions aux limites peuvent être des fonctions et des variables à modéliser [11].

4.3. L'interface utilisateur de COMSOL

L'interface de COMSOL peut être divisée en trois parties présentées sur la figure (II.5).



Figure(II.5): Interface utilisateur de COMSOL

1 ère partie: Model Builder, Il définit le problème à étudier, Le menu Définitions globales regroupe spécifiquement les variables et paramètres du problème, Le Système de Coordonnées (Définitions) est défini dans le menu builder ; par défaut, le système est Cartésien, Géométrie, Matériaux, Physique, Appliqué aux problèmes et aux maillages.

Le menu Physique suivant vous permet de définir Paramètres de résolution, fixes ou dépendant du temps, et options solveur.

Enfin, le menu Postprocessing comprend toutes les options de post-traitement des données.

2 ème partie: Graphics, l'interface d'affichage graphique, Il permet de visualiser la géométrie, les maillages ou les résultats. En haut de cette fenêtre se trouvent des options pour modifier le grossissement de l'affichage, l'orientation des objets 3D, masquer certains éléments, etc. option sélectionnée des objets, des domaines, des frontières ou des points peuvent également être trouvés en haut de cette fenêtre.

3 ème partie: La fenêtre, nous permet d'afficher les messages d'erreur, la progression de la simulation, une liste des actions effectuées pendant le calcul de la solution et les résultats numériques calculés une fois la simulation terminée.

Chapitre III

Etude du transfert thermique du composite EVA/SiO₂

1. Introduction

Aujourd'hui, la simulation numérique est devenue un élément incontournable de la recherche scientifique car elle permet de comprendre et de simuler le fonctionnement de systèmes réels et de prédire leur évolution. Dans ce chapitre, nous allons illustrer la méthode numérique suivie pour étudier les comportements thermique du composite (EVA/SiO₂).

2. Formulation mathématique

Pour résoudre le problème de transfert de chaleur par conduction dans le matériau composite (EVA/SiO₂) en régime permanent, nous utilisons une simulation numérique 2D basée sur la méthode des éléments finis, dans laquelle le rayonnement et le transfert convectif sont négligeables.

Pour simuler le transfert de conduction dans ces composites, il n'a pas été possible de générer des géométries représentatives de l'ensemble de l'échantillon étudié. La configuration choisie est représentée par une cellule de base modélisée par une particule de SiO₂ circulaire sur une matrice EVA carrée.

Généralement, le transfert de chaleur par conduction dans un matériau est décrit par l'équation:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) = 0 \quad (3.1)$$

En régime stationnaire, le temps n'intervient pas, donc la relation précédant devient :

$$\vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) = 0 \quad (3.2)$$

Le flux de chaleur traversant la cellule élémentaire S du composite est donné par :

$$\phi = \iint k \frac{\partial T}{\partial t} dS \quad (3.3)$$

Pour déterminer la conductivité thermique effective des matériaux modélisés, nous avons utilisé l'équation :

$$k_{\text{eff}} = \frac{\phi}{S} \frac{Lz}{(T_1 - T_2)} \quad (3.4)$$

Où :

ρ : La masse volumique en (kg.m⁻³)

C_p : La capacité thermique en (J.kg⁻¹.k⁻¹)

T: La température en Kelvin (k)

t: Le temps en seconde (s)

k: La conductivité thermique du composite en (W.m⁻¹.k⁻¹)

ϕ : Le flux de chaleur (W)

S: La surface élémentaire de composite en mètre carré (m²)

$\frac{\partial T}{\partial n}$: La variation de la température selon la direction n

Lz: La longueur la cellule élémentaire en mètre (m)

K_{eff} : La conductivité thermique effective du composite en (W.m⁻¹.K⁻¹)

3. Conditions aux limites

Dans cette étude, nous choisissons les conditions aux limites suivantes :

Nous appliquons deux températures différentes $T_1 = 299K$ et $T_2 = 300K$ sur la face perpendiculaire à la direction du flux de chaleur.

Pour produire un flux unidirectionnel, supposons que les deux faces parallèles à la direction du flux de chaleur sont isolées (adiabatique) $\phi = 0$ ou $(\vec{n} \cdot (k\vec{\nabla}T) = 0)$.

Si q_0 est la densité de flux de chaleur traversant le périmètre entourant la charge, la condition aux limites appliquée sur l'interface est de la forme:

$$(k\nabla T) = q_0 \quad (3.5)$$

q_0 est donné par :

$$q_0 = \frac{Km(T_m - T_{ch})}{r \cdot R_c} \quad (3.6)$$

R_c : résistance de contact adimensionnelle définie par:

$$R_c = \frac{rc \cdot Km}{r} \quad (3.7)$$

En introduisant la résistance de contact adimensionnelle définie par (3.7), l'équation (3.6) s'écrit :

$$q_0 = \frac{(T_m - T_{ch})}{rc} \quad (3.8)$$

rc : résistance de contact thermique dimensionnelle (K/m² .W).

T_m et T_{ch} sont respectivement les températures du pigment et de la matrice.

Km :conductivité thermique de la matrice (W/K.m).

r : rayon de la particule du pigment.

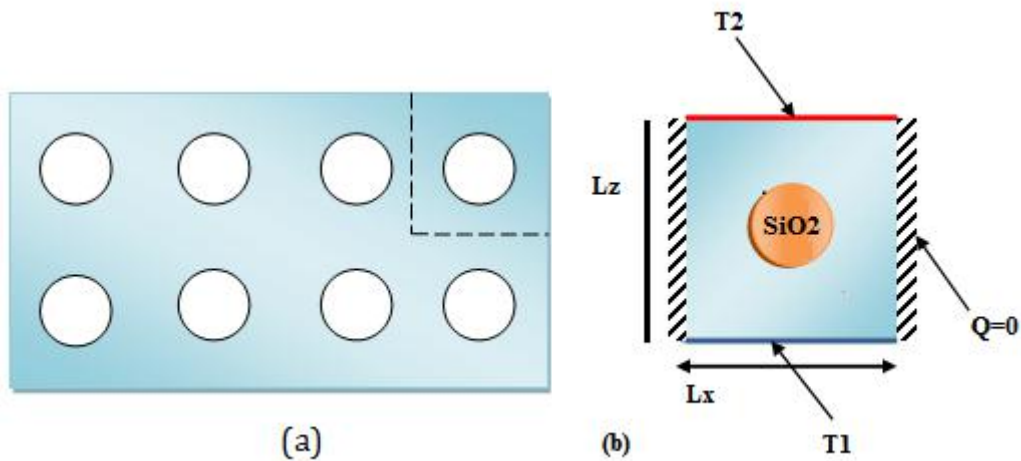


Figure (III.1) : Géométrie physique et conditions aux limites
 (a) : Composite, (b) : Cellule élémentaire de composite EVA/SiO₂

4. Propriétés de la matrice et de la charge :

Dans cette étude, comme nous avons mentionné précédemment, la résine de polymère d'éthylène-acétate de vinyle (EVA) a été utilisée comme matrice avec des charges de poudre de verre non argentée (SiO₂).

Les propriétés thermophysiques (la conductivité thermique, la capacité thermique et la masse volumique) utilisé dans les calculs sont :

	K (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)	C _p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
EVA	0.271	930	2482
SiO ₂	1.2	2530	840

Tableau (III.1) : Propriétés thermophysiques des matériaux

- ✓ Le type de renfort : sont des particules sphériques de SiO₂ de rayon $r = 0.18\mu\text{m}$.
- ✓ Les concentrations volumiques des renforts utilisés sont : 3.2%, 7.9%, 14.3% ,15.5%, 28.8%, 36.2%, 45.1%.

5. Etapes de modélisation

Les différentes étapes permettant de simuler les propriétés d'un matériau sont détaillées ci-dessous :

- ❖ **choix du modèle:** dans notre cas c'est le transfert de chaleur par conduction en régime

stationnaire (Figure III.2)

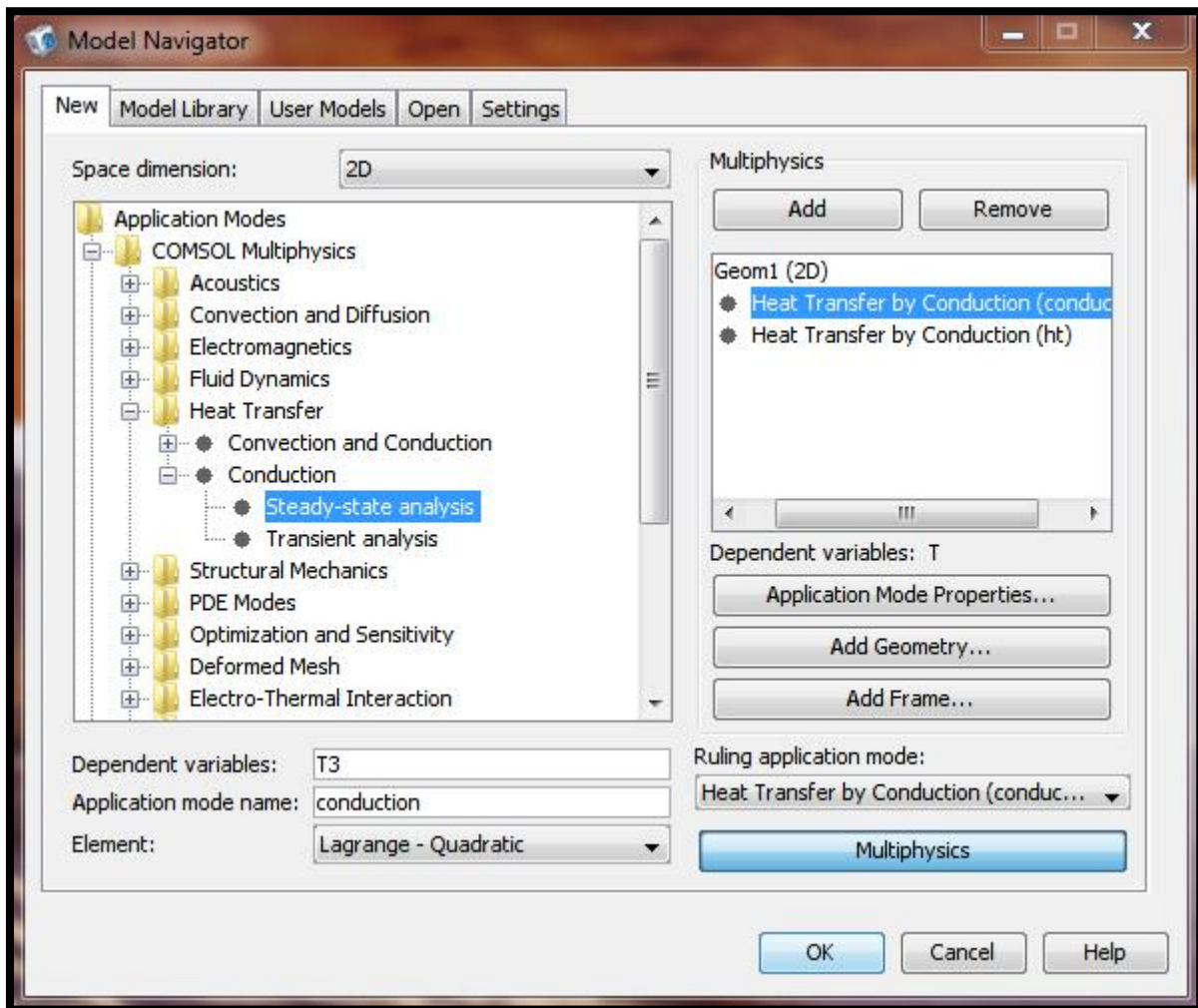
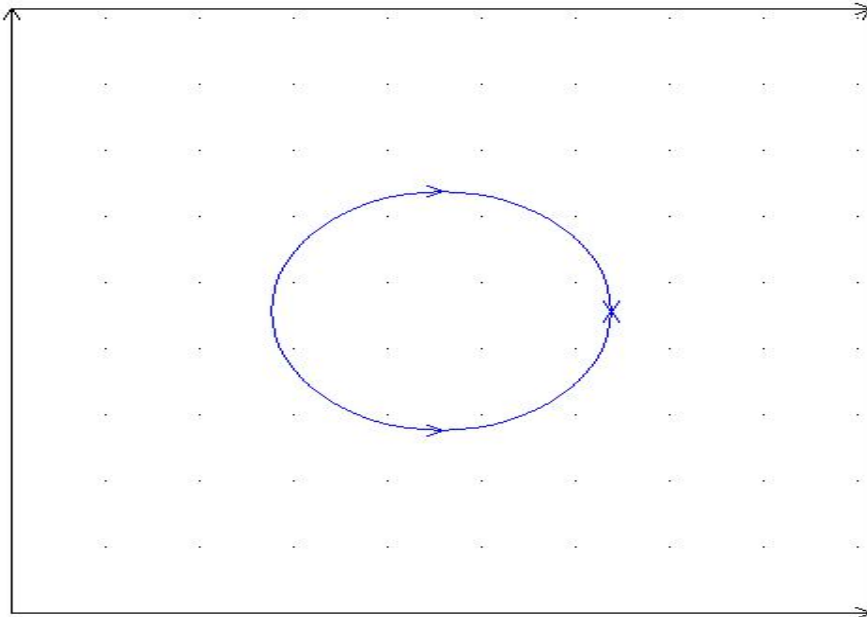


Figure (III.2): choix du modèle

❖ Le choix d'un volume élémentaire :

Il n'est pas possible de produire des géométries représentant la globalité de l'échantillon, il faut choisir un volume élémentaire représentatif de la totalité du matériau.



Figures (III.3): Géométries étudiée

❖ Définition des propriétés de chaque sous domaine

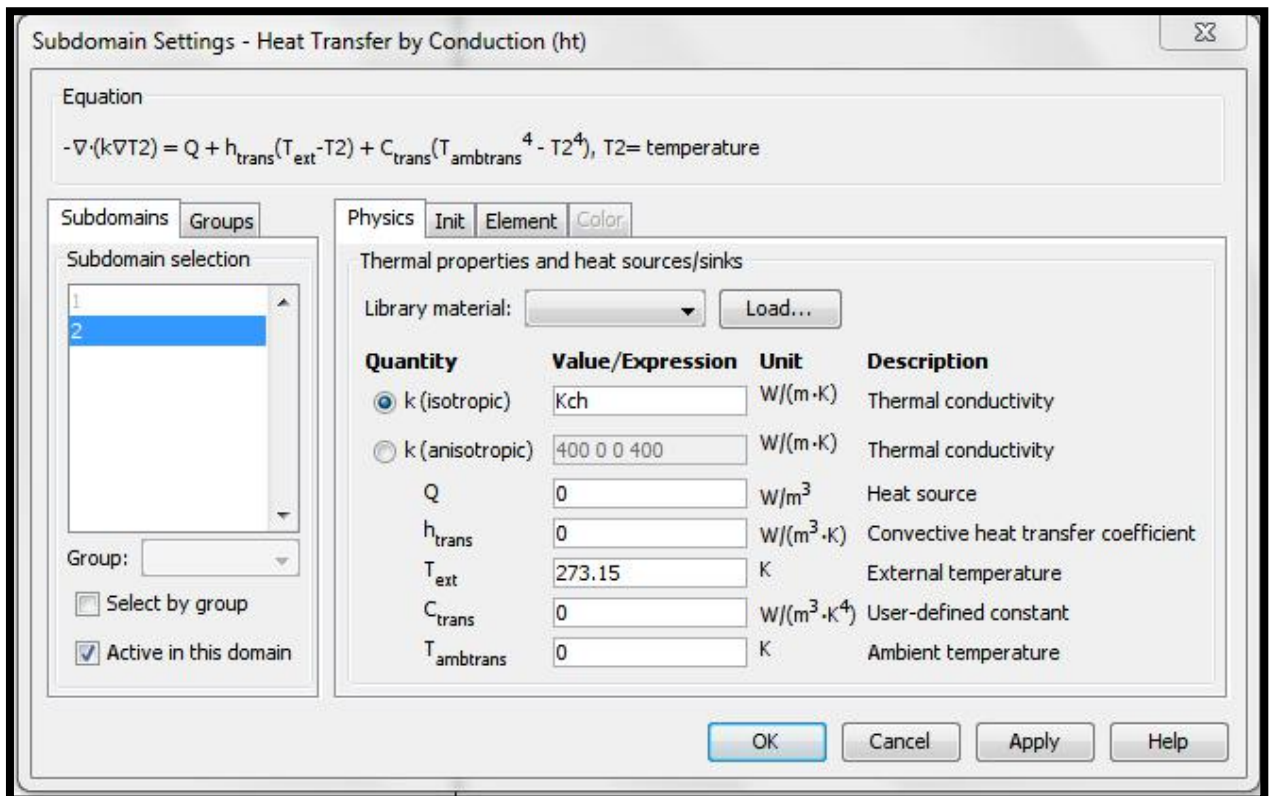


Figure (III.4): Définition des propriétés des sous domaines.

❖ Introduire les conditions aux limites :

- ✓ Le flux de chaleur

$$n \cdot (k \nabla T) = q_0 + h(T_{inf} - T) + C_{const}(T_{amb}^4 - T^4) \quad (3.3)$$

- ✓ Les autres faces sont isolées ($n \cdot (k \nabla T) = 0$), pour produire un flux unidirectionnel.

- ✓ Introduire les températures de la surface supérieure et inférieure de la cellule.

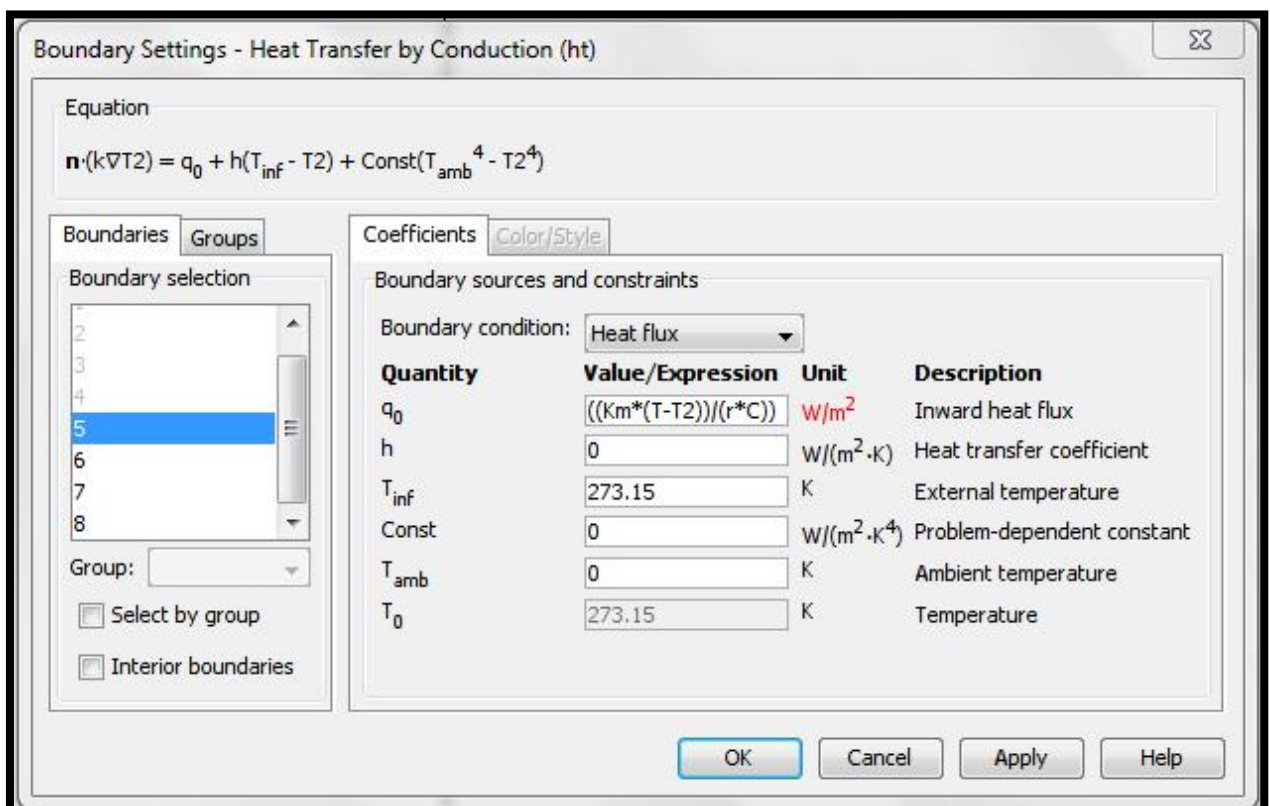


Figure (III.5): Définition des conditions aux limites.

5.1. Le maillage de la géométrie

Le maillage permet de diviser le milieu continu en un nombre fini d'éléments. Nous choisissons la géométrie triangulaire pour les maillages parce qu'il donne le meilleur résultat de calcul (Figure III.6).

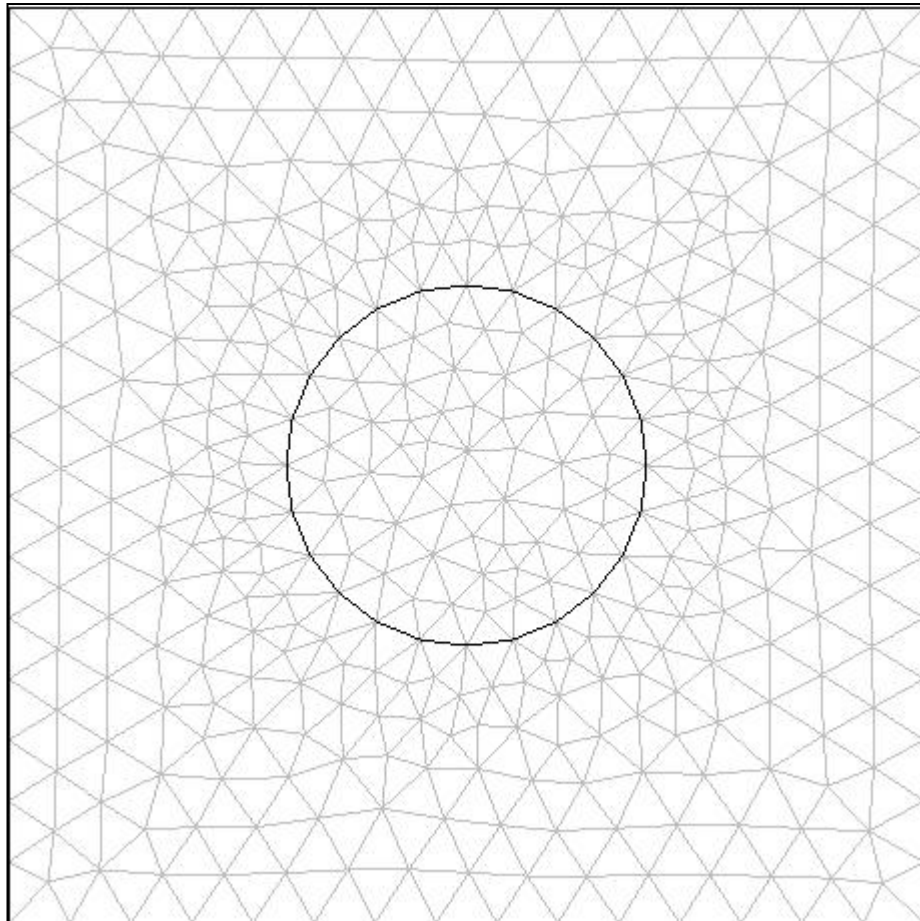


Figure (III.6) : Maillage de la géométrie

5.2. Post-traitement des données calculées

Dans cette étape de calcul, nous déterminons la valeur du flux de la chaleur, à partir de laquelle nous pouvons calculer toutes les propriétés thermophysiques du composite.

La figure (III.7) représente la distribution de la température dans une cellule élémentaire de composite EVA/SiO₂ après l'application des conditions aux limites, où l'on remarque que le flux de chaleur se propage à partir de la frontière chaude vers la frontière froide du composé.

On remarque également une diminution de la température en se dirigeant à l'intérieur du composite dans la région occupée par la matrice (EVA), et d'autre part, on observe que la température constante dans la région occupée par le SiO₂ (environ 299.5K°).

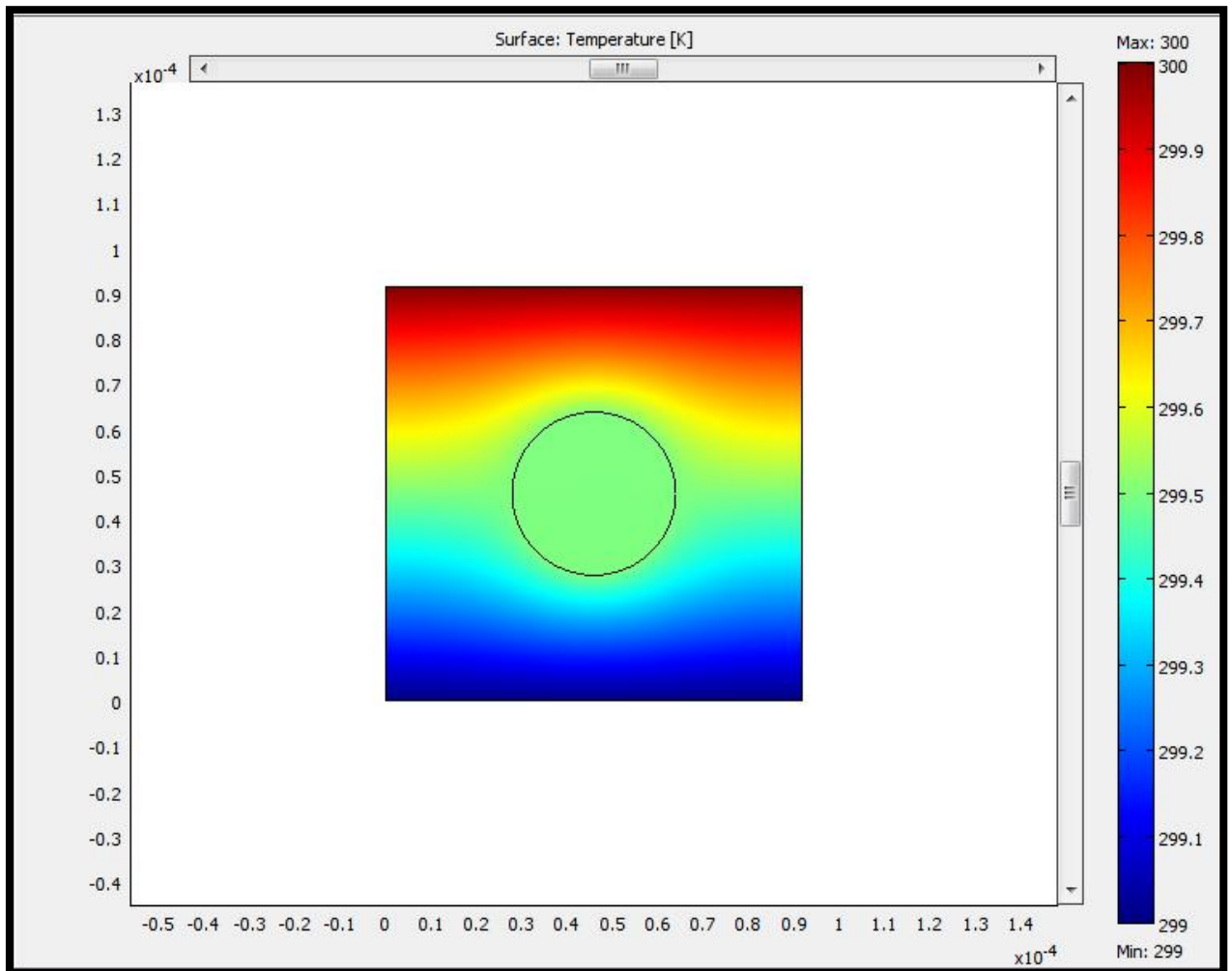


Figure (III.7) : Distribution de la température dans la cellule élémentaire

6. Résultats et discussion

6.1. Effet de la concentration

La figure (III.8) représente la variation de la conductivité thermique effective (K_{eff}) en fonction de la concentration de la charge pour une résistance de contact $R_c=10^{-1}$.

Nous remarquons que (K_{eff}) augmente avec l'augmentation de la concentration de la charge, cette augmentation de la conductivité thermique effective peut s'expliquer par le fait que la charge a une conductivité thermique plus élevée que la matrice polymère ($K_{ch} \gg K_m$).

On note également que pour les faibles concentrations de charge, la différence entre les valeurs de conductivité thermique des composites est insignifiante. A partir de 25% de concentration, la conductivité est plus élevée.

Un résultat similaire a été rapporté par Ghebrid Nassima [11]. Où elle a étudié numériquement et expérimentalement la conductivité thermique d'un composite à matrice polymère teintée au

dioxyde de titane, et ses résultats numériques ont également montré que la conductivité thermique du composite augmente en fonction de l'augmentation de la concentration de charge. Cette augmentation est due à la différence entre la conductivité des deux phases (renfort et matrice).

En effet, le paramètre gouvernant la conductivité thermique effective des composites est la conductivité thermique des matériaux constituant de ces composites. Ce comportement est déduit à partir des résultats de la littérature, lorsque la conductivité thermique des charges est supérieure que celle de la matrice, la conductivité effective du composite augmente et vice versa. Ce résultat est rapporté par Benmansour Nadia [74] qu'a déterminée la conductivité thermique du composite EVA/S- 3000S2M et les composites FPD/Mortier, respectivement.

Elle a constatée que la conductivité thermique des deux composites augmente et diminue respectivement en fonction de la concentration des charges, ces résultats sont dus à l'effet des faibles et supérieures conductivités thermiques des charges comparées à celles des matrices.

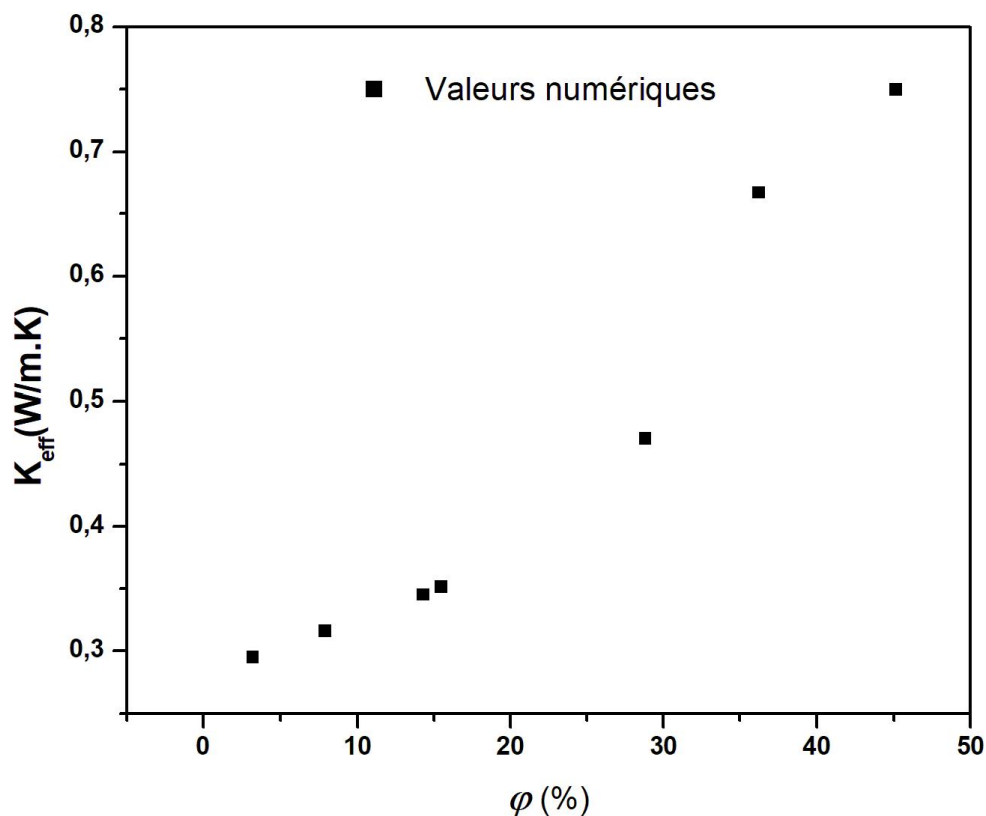


Figure (III.8) : Conductivité thermique effective en fonction de la concentration de la charge

6.2. Comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux

La figure (III.9) présente une comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux de la conductivité thermique effective de composite EVA/SiO₂ en deux dimensions. D'après la figure, on remarque une augmentation non linéaire de la conductivité thermique avec l'augmentation de la concentration volumique de SiO₂ dans les deux courbes, cette augmentation des valeurs de conductivité thermique du composé est due à la valeur élevée de conductivité thermique du SiO₂ par rapport à la conductivité thermique de matrice ($K_{ch} \gg K_m$) et à sa concentration volumique dans le composite. On note également les deux courbes sont en accord dans le cas de petites valeurs des concentrations volumique de SiO₂ (inférieures à 15%).

Pour les concentrations supérieures à 15%, on remarque une grande divergence entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques.

Donc, les valeurs numériques sont presque proches aux résultats expérimentaux pour les concentrations faibles.

ϕ (%)	K_{eff} (Comsol)	K_{eff} (exp)
3.2 %	0.2950	0.269
7.9 %	0.3164	0.286
14.3 %	0.3455	0.314
15.5 %	0.3518	0.317
28.8 %	0.4705	0.370
36.2 %	0.6672	0.450
45.1 %	0.7500	0.477

Tableau (III.2) : les résultats numériques et expérimental en fonction des concentrations de charge.

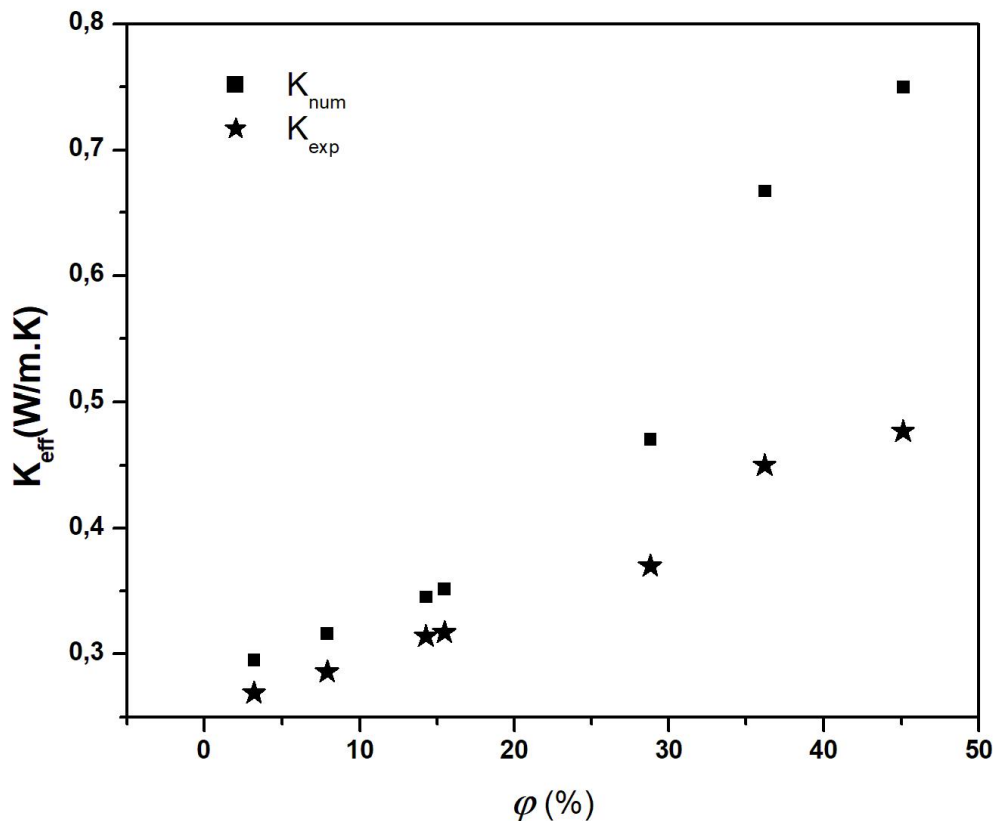


Figure (III.9) : Comparaison des résultats numériques et expérimentaux de la conductivité thermique effective de composite EVA/SiO₂.

6.3. Effet de la résistance de contact

La figure (III.10) montre l'effet de la résistance de contact R_c sur la conductivité thermique effective (K_{eff}) du composite en fonction de la concentration de la charge.

Nous remarquons que pour une résistance de contact faible, la conductivité thermique effective (K_{eff}) augmente avec la concentration de charge et la différence entre les distributions de la conductivité est significative; alors que pour une élevée valeur de la résistance de contact, la conductivité thermique effective (K_{eff}) est presque insensible aux variations de la résistance de contact.

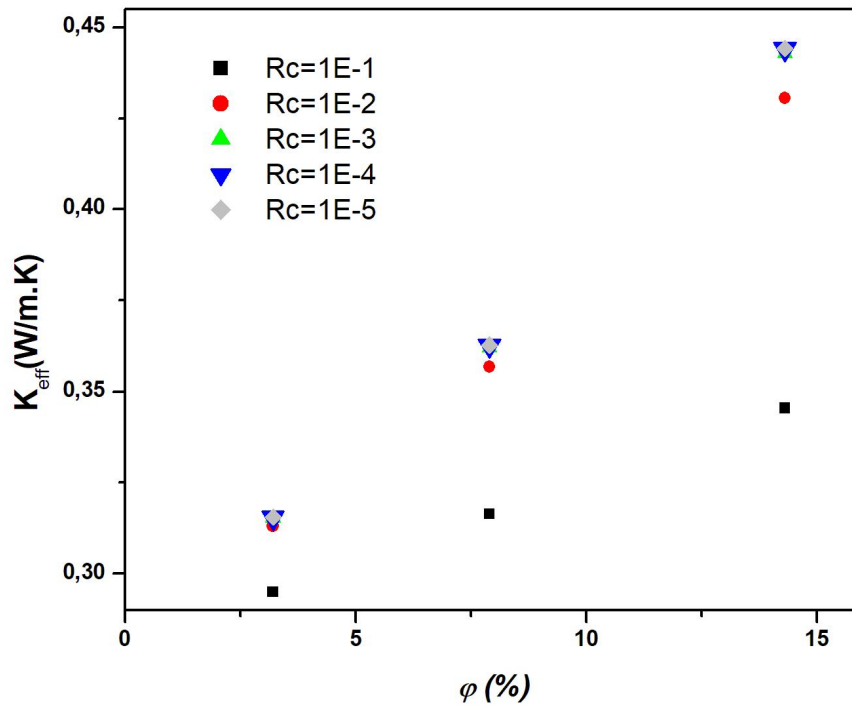


Figure (III.10): Variation de la conductivité thermique effective en fonction de la concentration de charge pour différentes valeurs de la résistance de contact.

6.4. Effet de maillage

La Figure (III.11) représente l'effet du maillage sur la conductivité thermique effective du composite.

Nous remarquons que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation du nombre de nœuds et son effet diminue lorsque le maillage devient très raffiné.

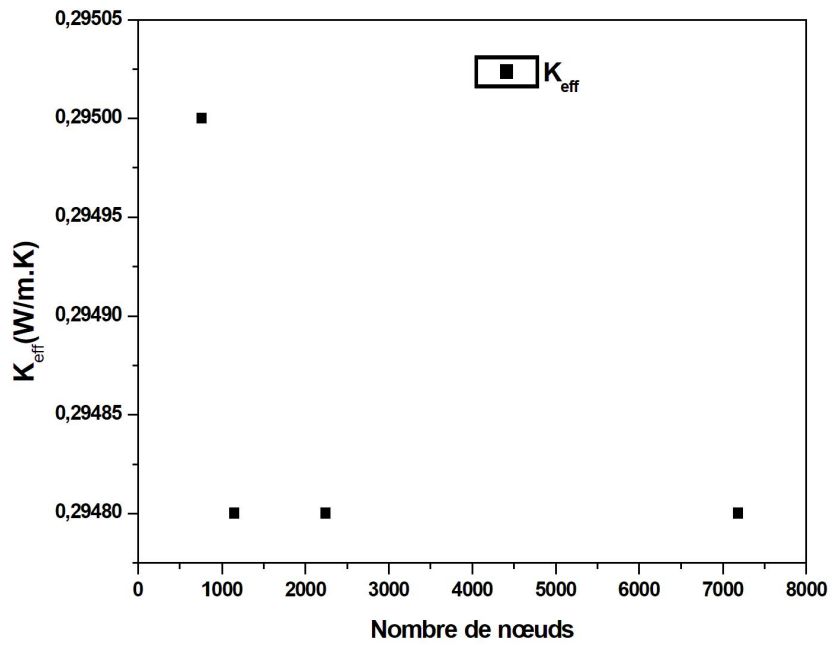


Figure (III.11): Effet du maillage sur la conductivité thermique effective pour $Rc=10^{-1}$

Conclusion

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de cette mémoire est destiné à mieux comprendre le phénomène de la conduction thermique dans les matériaux composites.

Au cours de cette étude, nous avons modélisé numériquement la conductivité thermique effective de composite (EVA/SiO₂).

Une attention particulière a été portée à l'effet de la résistance de contact, la fraction du SiO₂ dans le composite et le maillage sur la conductivité thermique effective.

Nous avons d'abord présenté une synthèse bibliographique sur les matériaux composites, leurs propriétés thermiques en se focalisant sur les propriétés thermophysiques telles que la conductivité et la diffusivité thermique, ainsi que les différentes méthodes numériques de prédiction de la conductivité thermique effective.

Nous discutons des méthodes analytiques numériques pour résoudre des problèmes thermiques dans des matériaux hétérogènes. Nous nous intéressons au logiciel Comsol Multiphysics et aux méthodes d'éléments finis, qui ont été appliquées à des géométries simples de matériaux homogènes dans une dimension 2D avec de bons résultats. La caractérisation des propriétés thermophysiques des matériaux composites peut se faire numériquement. Par conséquent, nous avons développé un modèle numérique pour obtenir la conductivité thermique effective des composites. Le modèle est validé par comparaison avec des résultats expérimentaux disposés sur une surface carrée (représentant la matrice), avec le cercle central représentant le renfort (SiO₂) (carré central).

Compte tenu des résultats présentés, il s'avère que :

- La conductivité thermique effective du composé (EVA/SiO₂) augmente avec l'augmentation de la concentration volumique des particules de SiO₂ (autrement dit, plus la concentration volumétrique de SiO₂ est élevée, plus la conductivité thermique est élevée).
- Les résultats expérimentaux sont en bon accord avec nos résultats, et permet d'obtenir des prédictions proches des résultats numériques.
- La conductivité thermique effective du composite (EVA/SiO₂) augmente avec la diminution de la résistance de contact.
- la conductivité thermique diminue avec l'augmentation du nombre de nœuds et son effet diminue lorsque le maillage devient très raffiné.

Références

References

- [1] Vinson, J. R., and R. L. Sierakowski. "Introduction to Composite Materials." The behavior of structures composed of composite materials. Springer, Dordrecht, 1987. 1-27.
- [2] Ye, Jianqiao. Laminated composite plates and shells: 3D modelling. Springer Science & Business Media, 2002.
- [3] Balasubramanian, M. Composite materials and processing. Boca Raton: CRC press, 2014.
- [4] Yi, Xiao-Su. "An introduction to composite materials." Composite Materials Engineering, Volume 1. Springer, Singapore, 2018. 1-61.
- [5] Neghar, Faiza. Etude des propriétés thermiques d'un matériau composite à matrice polymère. Diss. University of Jijel, 2020.
- [6] Carson, James K., et al. "Predicting the effective thermal conductivity of unfrozen, porous foods." Journal of Food Engineering 75.3 (2006): 297-307.
- [7] R.Zahi, «Comportement dynamique des rotors à arbre conique en matériaux composites », Thèse de doctorat, Université Djilali Liabés de Sidi Bel Abbes, 2018.
- [8] E. J. Jules, « Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis Diélectrique», Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2001.
- [9] T.Achour, «Étude des techniques des réparations des structures composites endommagées», Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 2011.
- [10] S. Bensaid, « Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2006.
- [11] N. Ghebrid, « Etude des problèmes de conduction thermique dans un matériau composite à matrice polymère pigmenté de dioxyde de Titane », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018.
- [12] L.Toihri, « Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibre de verre/époxy en traction », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2015.
- [13] K. Kherbouche, « Introduction aux modélisations et aux méthodes de calcul des matériaux composites», Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2010.
- [14] H. Abdallaoui ; A.Saddek, «Caractérisation et élaboration d'un matériau composite jute(déches)/polyester», Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf M'sila ,2019.
- [15] B. Hami, « Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'une structure

References

sandwiche multicouches », Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2018.

[16] A. Rahmane, « Étude du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs » Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine, 2019.

[17] M.Souakir, «Élaboration et caractérisations des composites hybrides PEHD/fibres PET recyclés/montmorillonite organophile : Étude des effets de la composition et du traitement de surface de la fibre PET», Mémoire de magister, Université Sétif-1-, 2014.

[18] A.Baltach, «Contribution à l'étude des fissures de fatigue réparées par patch en composite»,Thèse de doctorat, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès,2017.

[19] L.Fenniche ,C .Stambouli, « Optimisation d'un réservoir sous pression type IV en matériaux composites »,Mémoire de master, Université Saad Dahlabe de Blida 1 ,2019.

[20] M.Merazi, «Analyse mécanique des structures composites : Etude comparative entre les différentes théories des plaques », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2015.

[21] M. Tahar, « Etude de l'endommagement dans un composite stratifié », Mémoire de magister, Université Abde Elhamid Ibn Badis de Mostaganem,2012.

[22] E. Babacar LY, « Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008.

[23] A. Mezali, R. Talahari, « Elaboration et caractérisation de tubes composites par enroulement filamentaire»,Mémoire de master,Université M'hamed Bougara Boumerdes,2016.

[24] L. Gornet, « Généralités sur les matériaux composites», Engineering School, École Centrale de Nantes. 2008.

[25] B.Bakhouche, «Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibre de verre/époxy en flexion 3 points statique », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.

[26] H.Djelouahi, «Influence des fibres végétales sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton », Mémoire de master, Université M'hamed Bougara- Boumerdes, 2017.

[27] N. Kaouche, « Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structure en matériaux composites », Mémoire de magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2016.

[28] A.Ben Amara, «Étude de l'influence des paramètres de structure sur l'optimisation de la résistance des tubes en composites sous des sollicitations de torsion », Mémoire de magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras ,2016.

[29] M. Benaïssa, « Comportement des matériaux composites aux chocs », Mémoire de

References

magister, Université Abd Elhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2012.

[30] A.Sauget « Développement de matériaux composites fibreux hautes performances à matrices bio-sourcée », Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2014.

[31] A.Touimi , « Etude comparative sur le comportement élastique des matériaux composites à base des fibres végétales : Bambou /Epoxyde et Coco/Epoxyde », Mémoire de master, Université Dr. Tahar Moulay de Saida, 2019.

[32] M. Ambid, « Evaluation de nanocomposites polypropylène/silicate pour l'isolation électrique : Etude des phénomènes de polarisation, de conduction et des propriétés optiques », Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2007.

[33] L. Boudjema Hayet, « Elaboration de matériaux composites biodégradables issus de ressources renouvelables », Thèse de doctorat, Université d'Oran 2, 2016.

[34] P. Thori, P. Sharma, M. Bhargava, « An approach of composite materials in industrial machinery: advantages, disadvantage and application », International Journal of Research in Engineering and Technology, Volume: 02 Issue: 12, 2013.

[35] M.Mrazova « Advanced composite materials of the future in aerospace industry », Incas Bulletin, Volume 5, Issue 3, 2013.

[36] S.Benferdi, « Caractérisation du comportement micromécanique d'un matériau composite par différentes applications mathématiques », Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 2010.

[37] Puglia D., Valentini L., Kenny J.M., « Analysis of the Cure Reaction of Carbon Nanotubes/Epoxy Resin Composites Through Thermal Analysis and Raman Spectroscopy », Journal of Applied Polymer Science, vol. 88, (2003), pp. 452-458.

[38] Liang G., Zuo R., Lu T., Wang J., « Modification of Vinyl Ester Resin by a New Thermoset Liquid crystalline Diacrylate », Journal of Materials Science, vol. 40, (2005), pp. 2089-2091.

[39] Narayanan S., Schadler L.S., « Mechanisms of Kink-band Formation in Graphite/Epoxy Composites : a Micromechanical Experimental Study », Composite Materials and Technology, vol. 59, (1999), pp. 2201-2213.

[40] Laine M.R., Kim S.G., Rush J., Mollan M., Sun H.J., Lodaya M., « Ringopening Polymerization of Epoxy end-terminated Poly (Ethylene Oxide) as a Route to Highly Crosslinked Materials with Exceptional Swelling Behavior (II) », Polymer International, vol. 56, (2007), pp. 1006- 1015

[41] Wallace M., Attwood D., Day R.J., Heatley F., « Investigation of the Microwave Curing of the PR500 Epoxy resin System », Journal Mater Sciences, vol. 41, (2006), pp. 5862-5869.

References

- [42] G. Gupta, A. Kumar, R. Tyagi, S. Kumar, « Application and Future of Composite Materials: A Review », International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 5, Issue 5, 2016.
- [43] A. Sid Ahmed, « Contribution à la modélisation de la durée de vie des matériaux composites », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2019.
- [44] M. Laarej, « Étude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite RTM », Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.
- [45] A. Lakhdari, « Modélisation en Volumes Finis de CND des Matériaux Faiblement Conducteurs par Courants de Foucault et de Déplacement », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2019.
- [46] K. Rouam, « Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles », Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2014.
- [47] Manel haddadi, "Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère," Mémoire de Master, Université El Hadj Lakhdar, Batna, 2010-2011, pp. 91.
- [48] N. Mahmedi, « Etude de modalisation du comportement mécanique des matériaux composites », Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 2010.
- [49] Bouguedad, D., Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM). 2010, Université Mouloud Mammeri
- [50] BELLAOUAR, N. and M. MEDDAH, Etude sur les Caractéristiques Physico-chimique du Bitume Modifié par Polymère (SBS). 2019, جامعة غرداية
- [51] Rethwisch, D.G. and W.D. Callister, Student problem set supplement to accompany Materials science engineering, an introduction, 6/e, William D. Callister, Jr. 2006: Wiley.
- [52] HADDADI, M., et al., Conductivité thermique effective de composites polymère/fibres conductrices. Congrès français de thermique, SFT, ville des Hautes-Vosges, 2013.
- [53] Woodward, A.E., Atlas of polymer morphology. 1989.
- [54] Kahane, A. and Y. Tigrine, Etude des polymères synthétiques. 2017, UMMTO.
- [55] Hamelin, P., Chapitre 12: Matériaux composites à matrices polymères, in La chimie et l'habitat. 2021, EDP Sciences. p. 225-238.
- [56] CHEBAANI, SOUAD. Modélisation Thermique d'Un Transformateur Utilisant Un Matériau Composite Fer-Résine. Diss. Université de Batna 2, 2012.

References

- [57] A. Degiovanni „Transmission de l’"énergie thermique Conduction" technique de l’ingénieur BE 8200 1999
- [58] Tayeb Ouksel, "Cours: Transfert Thermique, Université Larbi Ben M’hidi Oum El Bouaghi," 2016-2017, pp.61.
- [59] Guérira Belhi, "Etude du delaminage en mode I des matériaux composites stratifiés par la méthode des éléments finis," Thèse de magistère, Université Mohamed KHIDER de Biskra, 2005, pp. 68.
- [60] A Hicham and S Abdessalam, "Caractérisations et laboration d'un matériau composite jute (Déches) polyster," Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2018/2019, pp. 56.
- [61] A. Boudenne, « Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère »Thèse de doctorat, Université de Paris XII – Val de Marne, 2003.
- [62] M. Chikhi, « Métrologie et modélisation des transferts dans les composites naturels à faible cout pour l’isolation thermique dans les panneaux solaires»,Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna ,2013.
- [63] DJAIDJA, RAWIYA. Simulation numérique de transfert thermique en utilisant les coordonnées curvilignes. Diss. Faculté des Mathématiques et de l’Informatique Département des Mathématiques-Option: Analyse mathématique et numérique, 2021.
- [64] S. Aibeche, I. Bouit, « Contribution à la Modélisation Magnétothermique des Machines Electriques Synchrones à Aimants Permanents », Mémoire de master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia –Jijel,2019.
- [65] F. Mnasri, « Étude du transfert de chaleur et de masse dans les milieux complexes : application aux milieux fibreux et à l’isolation des bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2016.
- [66] N.Meziani, «Contribution de l’approche en déformation dans la modélisation des structure à contour circulaire», Mémoire de magister, Université Mohamed Khider - Biskra -,2006.
- [67] Pradeep Kumar Bal, « Thermal conductivity of cement kiln dust filled epoxy composites », thèse présentée dans le respect partiel des exigences relatives au degré de baccalauréat en technologie, Institut national de technologie de Rourkela, 2014.
- [68] A. Seghir, « Cours méthode des éléments finis », Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2005-2014.

References

- [69] S. Salmi, « Etude numérique d'une convection naturelle en 2D par la méthode de volumes finis », Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2018.
- [70] B. Saker, « Calcul des forces d'origine électromagnétique dans les structures électriques », Mémoire de magister, Université Larbi Tebessi-Tebessa, 2012.
- [71] N. Merzougui, H. Merzougui, « Diagnostic de l'état de surface d'un isolateur de haute tension en utilisant « Current Flow Problem », Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2019.
- [72] N. Fekiri, « Transferts de chaleur dans des éléments micro et nano structurés : Simulation et expérimentation par thermographie infrarouge et microscopie SThM », Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2013.
- [73] H. Khaldoune, « Modélisation numérique de comportement thermophysique de composite de mortier à base des fibres de palmier dattier », Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2017.
- [74] N. Benmansour, Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat, thèse de Doctorat, Université de Batna, 2015.

ملخص: الغرض من هذه الدراسة هو محاكاة ثنائية الأبعاد لسلوك الحراري لمادة مركبة مع مصفوفة بوليمير (EVA/SiO₂) .

يعتمد الحل العددي لمشكلة التوصيل الحراري على طريقة العناصر المحدودة باستعمال برنامج .COMSOL Multiphysics

حيث تم إيلاء اهتمام خاص لتأثير مقاومة التلامس وتركيز SiO₂ وحجم عدد عقد الشبكة على التوصيل الحراري الفعال، وقد بينت النتائج المتحصل عليها أن النموذج العددي يتوافق بشكل جيد مع النتائج التجريبية.

الكلمات المفتاحية: المواد الغير متجانسة، المركبات، النقل الحراري، كومسول، المحاكاة العددية.

Abstract :

The purpose of this study is to simulate the thermal behavior of composite material with a polymer matrix (EVA/SiO₂) in 2D. The numerical resolution of the thermal conduction problem is based on the finite element technique using COMSOL Multiphysics software. Special attention is devoted to the effect of contact resistance, SiO₂ fraction and mesh size on the effective thermal conductivity. The results obtained show that the proposed numerical model is in good agreement with the experimental results.

Keywords: Heterogeneous materials, Composites, Thermal transfer, Comsol, Numerical simulation.

Résumé :

Ce travail de mémoire a pour objet de simuler numériquement en 2D du comportement thermique des matériaux composites à matrice polymère le (EVA/SiO₂). La résolution numérique du problème de conduction thermique est basée sur la technique des éléments finis en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics. Une attention particulière est accordée à l'effet de la résistance de contact, de la fraction du SiO₂ et du maillage sur la conductivité thermique effective. Les résultats obtenus montrent que le modèle numérique proposé s'accorde convenablement avec les résultats expérimentaux.

Mots-clés : Matériaux hétérogènes, Composites, Transfert thermiques, Comsol, Simulation numérique.