

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de Mohamed Seddik Ben Yahia -Jijel

N° de série : .....



Faculté des sciences exactes et informatique

Département de physique

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en physique

Spécialité : physique des matériaux

Présenté par : Neghar Faiza

Thème

**Etude des propriétés thermiques d'un  
matériau composite à matrice polymère**

Soutenu le : 27 /10/2020

Jury de soutenance :

<b>Takkouk Zahi (Pr)</b>	<b>Université de Jijel</b>	<b>Président</b>
<b>Brihi Nouredine (Pr)</b>	<b>Université de Jijel</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Laouer Abdelghani (MCA)</b>	<b>Université de Jijel</b>	<b>Examineur</b>

Année Universitaire 2019-2020

## *Remerciements*

*Le remerciement infini avant tous est à Dieu qui m'a guidé pour accomplir ce modeste travail.*

*Je dois d'abord exprimer mes profonds remerciements à mon encadreur le professeur Brihi Noureddine, qui m'a proposé ce mémoire et m'a dirigé pour sa bonne réalisation. Je le remercie aussi pour leur soutien et leur instruction.*

*Je remercie également les membres de jury : le professeur Takrouk Zahi et le docteur Laouer Abdelghani qui ont accepté d'examiner et de juger mon travail.*

*Enfin, Je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Merci infiniment à toutes et à tous*

# Table des matières

Remerciements	
Liste de figure	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
<b>Chapitre I :Généralité sur les matériaux composites</b>	
Introduction	3
I. Matériaux composites	3
I.1. Historique	3
I.2. Définition	3
II. constituants des matériaux composites	4
II.1. La matrice	4
II.1.1. Matrices organiques	5
II.1.2. Matrices métalliques(MM)	6
II.1.3. Matrices céramiques(MC)	6
II.2. Les renforts	6
II.2.1. Renforts organiques	7
II.2.2. Renforts inorganiques	8
II.3. Les additions	10
II.4. L'interface	11
III. Classification des matériaux composites	11
III.1. Classification suivant la nature des constituants	11
III.1.1. Composites à matrice organique (CMO)	11
III.1.2. Composites à matrice métallique (MMC)	11
III.1.3. Composites à matrice céramique(CMC)	12
III.2. Classification suivant la forme des constituants	12
III.2.1. Composites à fibres	12
III.2.2. Composites à particules	12
IV. Architecture d'un matériau composite	13
IV.1. Les mono-couches	13
IV.2. Les stratifiés	13
IV.3. Les sandwiches	14
V. Avantages et inconvénients des matériaux composites	15

IV. Domaines d'application .....	15
IV.1. Applications aérospatiales.....	15
IV.2. Industrie des transports terrestres et maritimes .....	16
IV.3. Applications électrique et électronique.....	16
IV.4. L'industrie chimique.....	17
IV.5. Industrie des articles de sport et de loisir .....	17
IV.6. Applications en médecine .....	17

## **Chapitre II :La conductivité thermique des matériaux composite et leurs modèles de prédiction**

Introduction.....	18
I. La conductivité thermique $k$ des matériaux composites .....	18
II. Les modèles de prédiction de la conductivité thermique effective $K_{eff}$ .....	18
II.1. Les modèles analytiques.....	19
II.1.1. Modèles de premier ordre (ou modèles en série et en parallèle) .....	19
II.1.2. Modèle de Maxwell.....	20
II.1.3. Modèle de Bruggeman .....	21
II.1.4. Modèle de Topper .....	21
II.1.5. Modèle de Donea .....	22
II.1.6. Modèle de Chang et Vachon.....	23
II.1.7. Modèle de Hashin et Shtrikman .....	23
II.1.8. Modèle de Hatta et Taya .....	24
II.2. Les modèles semi-analytiques ou (semi-empiriques) .....	25
II.2.1. Modèle de Lewis et Nielsen.....	25
II.2.2. Modèle d'Agari.....	26
II.2.3. Modèle de Hamilton et Crosser .....	26
II.2.4. Modèle de Springer et Tsai.....	27
II.3. Les modèles empiriques.....	28
II.3.1. Modèle de Norton .....	28
II.3.2. Modèle de Progelhof et Throne.....	28
II.3.3. Modèle de Ratcliffe .....	29
II.4. Les méthodes expérimentales .....	29
II.4.1. Les méthodes en régime stationnaire (permanent).....	29
II.4.2. Les méthodes en régime instationnaire (non- permanent).....	30
II.5. Les méthodes numériques .....	30

II.5.1. Méthode des différences finies (M.D.F).....	30
II.5.2. Méthode des éléments finis (M.E.F).....	31
II.5.3. Méthode des volumes finis (M.V.F).....	32

## **Chapitre III : Simulations numériques du transfert de chaleur dans les composites PP/Cu avec COMSOL Multiphysics**

Introduction.....	33
I. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.....	33
II. Étude en régime permanent.....	37
II.1. Formulation mathématique.....	37
II.2. Conditions aux limites.....	38
II.3. Le maillage de la géométrie.....	39
III. Résultat et discussions.....	40
III.1. Résultat analytique.....	40
III.2. Résultats numériques.....	41
III.2.1. Distribution de la température dans le matériau composite.....	41
III.2.2. La comparaison entre les résultats numériques et les résultats analytique.....	44
Conclusion générale.....	46
References bibliographiques.....	47
Résumé	

## Liste de figure

figure	Titre	Page
<b>Figure (I.1)</b>	Les constituants principaux d'un matériau composite	4
<b>Figure (I.2)</b>	Les Différentes types de matrice	4
<b>Figure (I.3)</b>	Les différents types de renfort	7
<b>Figure (I.4)</b>	Fibres d'aramide	8
<b>Figure (I.5)</b>	Fibres de verre	9
<b>Figure (I.6)</b>	Fibre de carbone	9
<b>Figure (I.7)</b>	Fibres métalliques	10
<b>Figure (I.8)</b>	Classification des composites suivant la forme des constituants	13
<b>Figure (I.9)</b>	Structure des matériaux composites monocouches	13
<b>Figure(I.10)</b>	Structure d'un composite stratifié	14
<b>Figure(I.11)</b>	Structure d'un matériau sandwich	14
<b>Figure (II.1)</b>	Modèles de premier ordre	20
<b>Figure (II.2)</b>	Modèle de Maxwell	21
<b>Figure (II.3)</b>	Assemblage de sphères ou de cylindres dans un composite Selon le modèle de Hashin et Shtrikman pour $k_{re} > k_m$ . La matrice est représentée en blanc et la phase dispersée en noir	24
<b>Figure(II.4)</b>	Etapes générales de la méthode des éléments finis	32
<b>Figure(III.1)</b>	Géométrie physique et conditions aux limites	39
<b>Figure (III.2)</b>	Maillage de la géométrie	39
<b>Figure(III.3)</b>	La variation de conductivité thermique de composite PP/Cu en fonction concentration volumique de cuivre (analytiquement)	40
<b>Figure(III.4)</b>	La distribution de la température dans le composite PP/Cu	41
<b>Figure(III.5)</b>	Schéma d'une cellule élémentaire de composite PP/Cu avec 3 positions Y	42
<b>Figure (III.6)</b>	La variation de la température en fonction de dimension de cellule L pour Y=0.3	42
<b>Figure(III.7)</b>	La variation de la température en fonction de dimension de cellule L pour Y=0.5	43
<b>Figure(III.8)</b>	La variation de la température en fonction de dimension de cellule L pour Y=0.6	43
<b>Figure(III.9)</b>	Comparaison des résultats numériques et analytique de la conductivité thermique effective de composite PP/Cu	44

## Liste des tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau(I.1)</b>	Caractéristiques générales des fibres de verre	8
<b>Tableau(I.2)</b>	Les Avantages et les inconvénients des matériaux composites	15
<b>Tableau(II.1)</b>	Quelques valeurs de A pour différents types d'inclusions	25
<b>Tableau(III.1)</b>	Paramètres thermophysiques des matériaux (PP et Cu)	37

### Introduction générale

Le développement technologique croissant a conduit à la nécessité de rechercher de nouveaux matériaux qui combinent des bonnes propriétés (la dureté ; Résistance mécanique, haute rigidité et grande légèreté). Ces propriétés physiques ne peuvent être obtenues dans des matériaux simples pris séparément, Pour atteindre cet objectif, les matériaux traditionnels doivent être remplacés par des matériaux composites.

Le sens le plus courant des matériaux composites est la combinaison de plusieurs matériaux pour obtenir un nouveau matériau avec des propriétés améliorées. Aujourd'hui les matériaux composites sont utilisés presque dans toutes les applications technologiques tel que l'industrie aérospatiales, l'industrie des transports terrestres et maritimes, et l'industrie chimique ...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.

Notre travail consiste à étudier le comportement thermique d'un matériau composite à matrice polymère. L'objectif principal est de modéliser numériquement la conductivité thermique effective de polypropylène pigmenté de cuivre (PP/Cu). La résolution numérique passe essentiellement par l'approximation des éléments finis. Les résultats numériques obtenus sont comparés aux modèles analytiques.

Ce mémoire est articulé en trois chapitres.

**Le premier chapitre** s'intéresse des généralités sur les matériaux composites (l'historique, la définition, les éléments constitutants, les classifications, les structures, les avantages, les limites et les principaux domaines d'application).

**Le second chapitre** présent la conductivité thermique des matériaux composite et les différents modèles (les modèles analytiques, les modèles semi-analytiques, les modèles empiriques, les méthodes expérimentales et les méthodes numériques) qui permettent la prédiction de la conductivité thermique de ces matériaux.

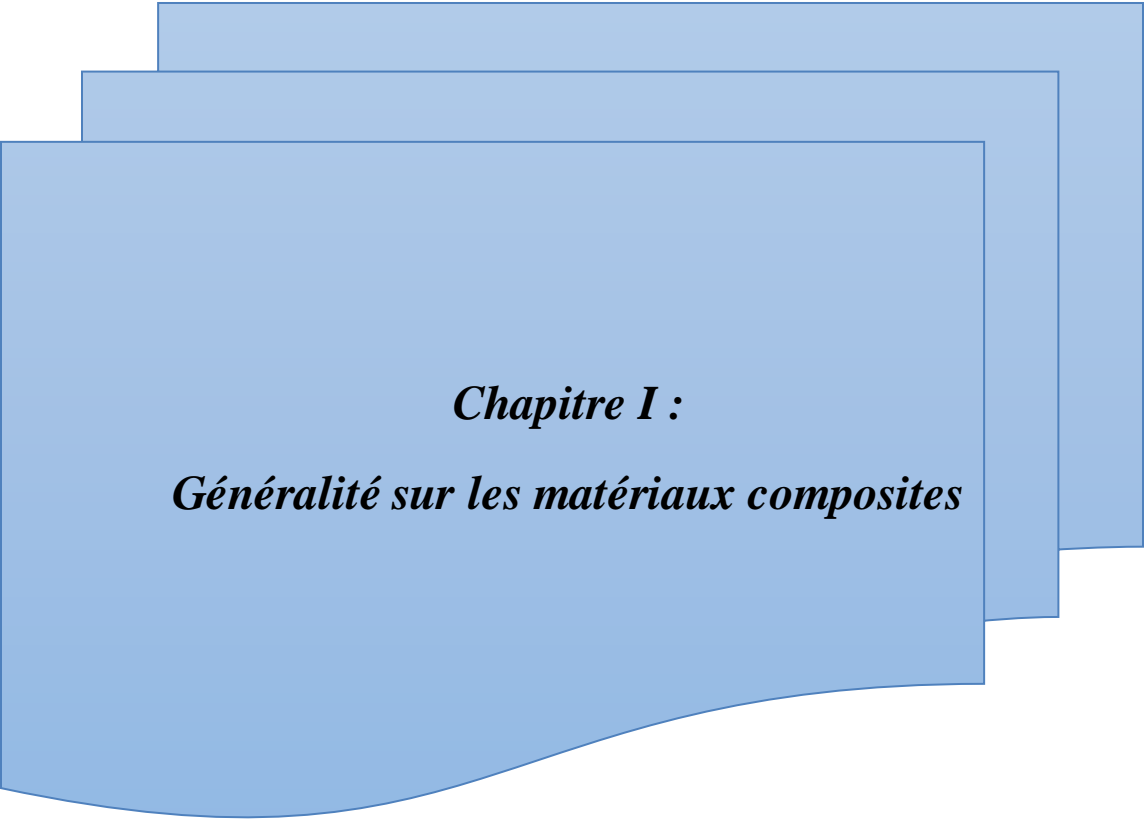
**Le troisième chapitre** est consacré à la présentation et la discussion des résultats de la conductivité thermique effective des deux composites (PP/Cu) obtenu par la simulation numérique par la méthode des éléments finis et de le comparer avec les résultats obtenus à partir des modèles analytiques



## **Introduction générale**

---

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus et donnant quelques perspectives à cette étude.



***Chapitre I :***  
***Généralité sur les matériaux composites***

## Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons des généralités sur les matériaux composites. Tout d'abord, nous examinerons l'histoire de ces matériaux et leur définition, ainsi qu'une explication détaillée de leurs constituants, leurs classifications, et leur essentielle structure.

Finalement nous exposerons les avantages, les limites et quelques domaines d'application.

## I. Matériaux composites

### I.1. 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 [1].

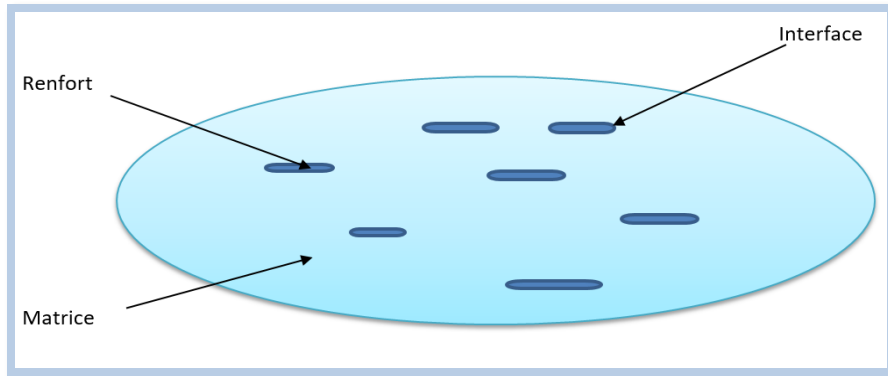
Bien que les matériaux composites soient connus sous diverses formes à travers l'histoire de l'humanité, l'histoire des composés modernes est apparue au XVIIIe siècle, lorsque l'utilisation des matériaux composites s'est étendue à la plupart des domaines industriels.

### I.2. Définition

Un matériau composite est la conjonction de plusieurs matériaux élémentaires non miscibles de natures différentes, se complétant. Pour obtenir un nouveau matériau ayant des propriétés supérieures à celui des composants pris séparément.

## II. constituants des matériaux composites

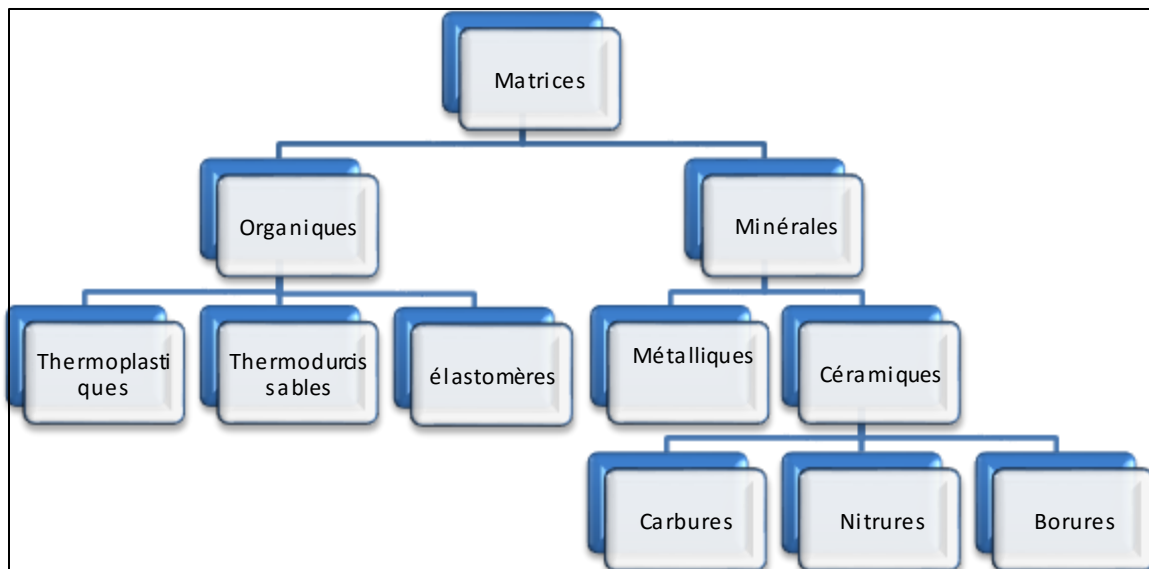
En générale un matériau composite est constitué principalement d'une matrice, des additions, des renforts et des interfaces, les propriétés de ce matériau dépendant directement à la nature et la proportion de ses différents constituants.



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

### II.1. La matrice

La matrice est la phase continue qui lie et maintient les fibres, transmet et répartie les efforts extérieurs vers le renfort. D'un autre côté elle donner la forme à la pièce et garantir ses caractéristiques géométriques [2]. La figure ci-dessous représente les types de matrices les plus courants.



**Figure (I.2) :** Les Différentes types de matrice [3]

### II.1.1. Matrices organiques

Les matrices organiques sont largement utilisées pour la fabrication des matériaux composites, grâce à leurs caractéristiques (Protection contre la corrosion et attaques chimiques, faible coût et facilité de mise en œuvre...). Par ailleurs, la matière organique désignée un polymère qui peut être défini comme un enchaînement de monomères (Un monomère est une molécule composée principalement de carbone et d'hydrogène). Généralement, les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables, ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés, le plus souvent, ils sont amorphes et parfois cristallisés [4], ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques et une faible masse volumique [5]. Il existe trois grandes familles de matière organique (thermoplastique, thermodurcissable et élastomères).

#### II.1.1.1. 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 [6].

#### II.1.1.2. 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 [7], mais ils possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport aux thermoplastiques [6].

#### II.1.1.3. Matrices élastomères(ME)

Les matrices élastomères sont des polymères naturels ou synthétiques dont la structure particulière conféré une importante élasticité (jusqu'à 500% d'allongement par rapport à la taille initiale), elles sont largement utilisées en tant que solutions antivibratoires. A titre d'exemple, nous pouvons citer les élastomères suivants : les silicones d'élastomère, les polyuréthanes, le néoprène, le latex etc.... [8].

### II.1.2. Matrices métalliques(MM)

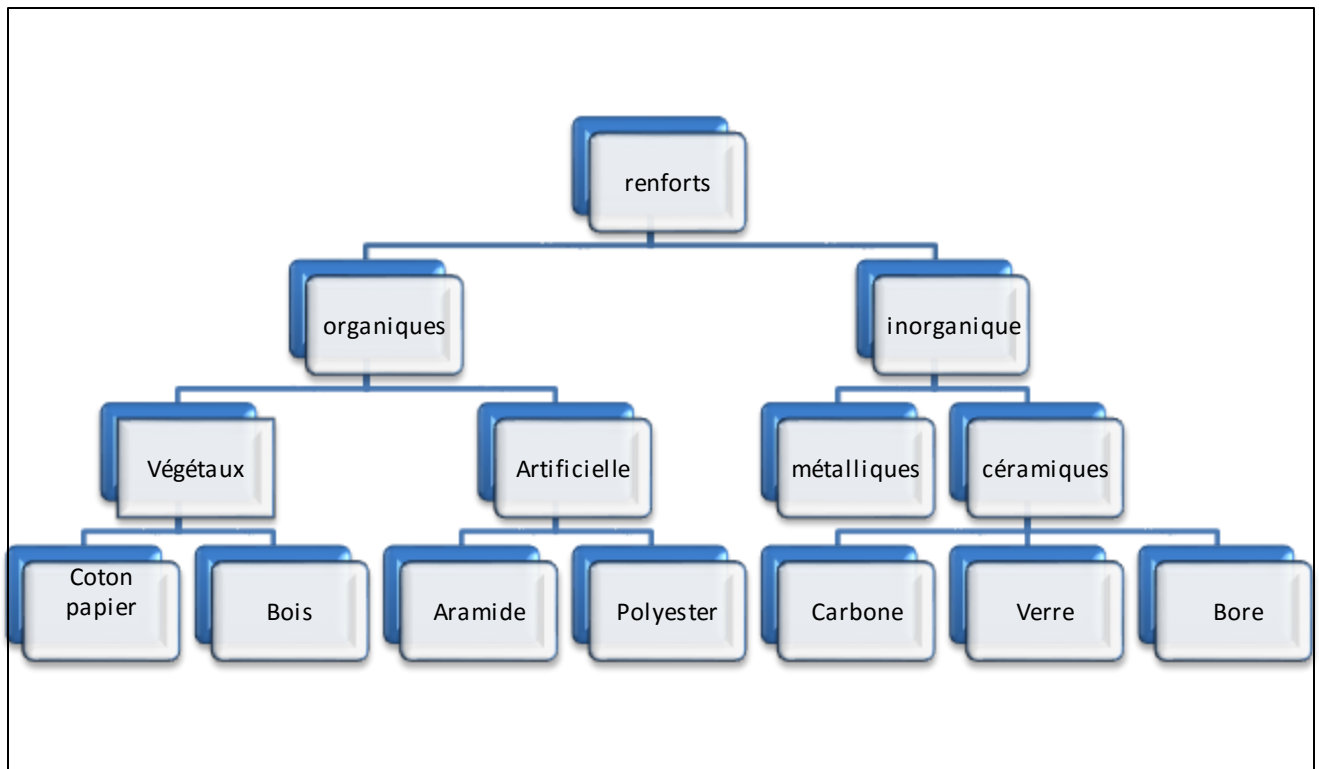
Les matrices métalliques les plus utilisées sont : l'aluminium et son alliage, le nickel, le titane et le magnésium. Ces matrices sont présentes d'excellentes propriétés physiques et chimiques par rapport au matrices organiques telles que : une tenue en température élevée, bonne conductivité électrique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

### II.1.3. Matrices céramiques(MC)

Les matrices les plus utilisées sont composées de carbone, de silicium de carbure (SiC), d'alumine ou de verre [5], 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 [9].

## II.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... [10,11]. La figure ci-dessous représente les types de renforts les plus courants.



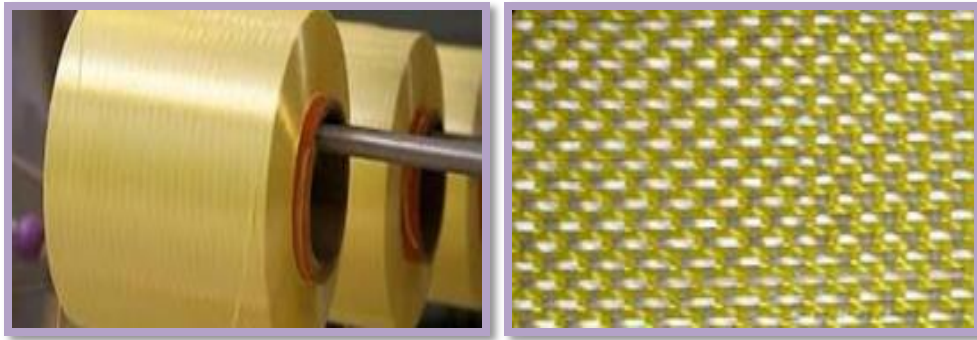
**Figure (I.3) : Les différents types de renfort [12]**

## II.2.1. Renforts organiques

### II.2.1.1. 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 utilisées comme renfort dans les structures composites [13].

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 [14 - 16].



**Figure (I.4) : Fibres d'aramide [17]**

## II.2.2. Renforts inorganiques

Les principales fibres inorganiques sont :

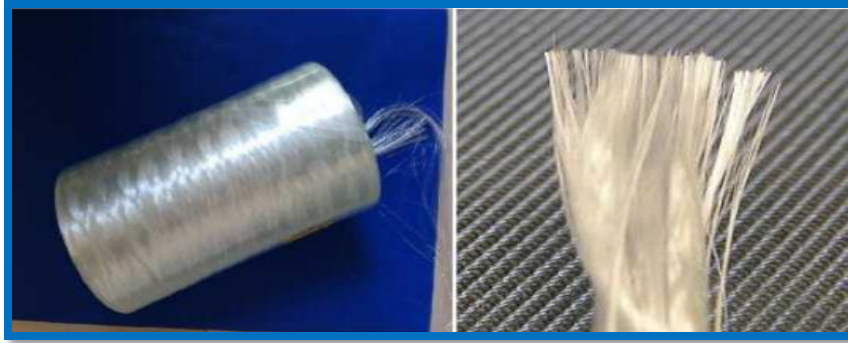
### II.2.2.1. Les fibres de verre

Les fibres de verre sont les plus anciennes (1940) et les moins chères (environ 1euro/kg) des fibres du marché [18], 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) [19]. On distingue généralement différents types des fibres qui est utilisés pour des applications spécifiques, leurs caractéristiques majeures sont répertoriées dans le Tableau ci-dessous

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

**Tableau (I.1) : Caractéristiques générales des fibres de verre [20]**





**Figure (I.5) : Fibres de verre [21]**

### II.2.2.2. Les fibres de carbone

Les fibres de carbone 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 [5]. Ces fibres possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques d'autant plus que leur masse volumique est faible (généralement inférieure à 2000 Kg/m<sup>3</sup>). On outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue en température, en atmosphère non oxydante. En effet, leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500 C° environ [21].



**Figure (I.6) : Fibre de carbone [21]**

### II.2.2.3. 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 [18]. De prix très élevé, cette fibre est réservée à des applications impliquant des conditions très sévères d'emploi [14].

#### II.2.2.4. 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 [22].

#### II.2.2.5. 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.



Figure (I.7) : Fibres métalliques [23]

#### II.2.2.6. 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) [16, 18,19]. 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) [16].

### II.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....).

#### **II.4. L'interface**

L'interface ou (interphase) est la surface de contact entre la matrice et le renfort, elle joue un rôle très important sur le comportement mécanique du composite. Lorsqu'un certain composite subit des dégradations mécaniques et commence à se fissurer suite à une surcharge et la fatigue, les interfaces ont la propriété de transmettre les chargements de la matrice vers le renfort et de dévier ou bloquer les fissures. Ainsi, évitez la rupture brutale de composite et prolonger sa durée de vie.

### **III. 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.

#### **III.1. Classification suivant la nature des constituants**

Selon la nature des constituants (nature de la matrice), les composés 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  $T < 1000\text{ C}^\circ$ ) [9,24].

##### **III.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 [25, 26].

##### **III.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 [26] 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 [25 - 27].

### III.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 [26]. 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 [25,27].

## III.2. Classification suivant la forme des constituants

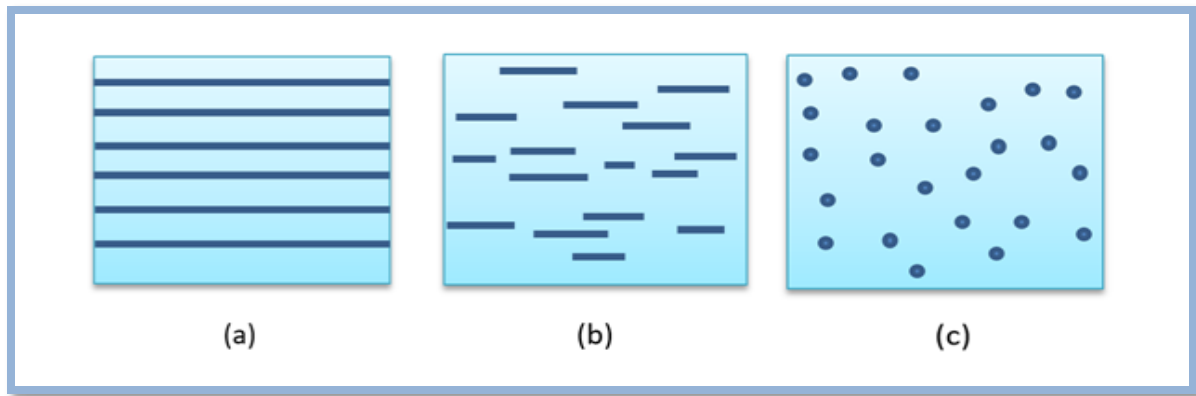
En fonction de la géométrie des constituants (géométrie des renforts), nous pouvons diviser les matériaux composites en deux grandes classes : les matériaux composites à fibres et les matériaux composites à particules.

### III.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 [28]. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues (fibres longues), soit sous forme de fibres discontinues (fibres courtes).

### III.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 [25], 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.... [29].



**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)

#### IV. 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.

##### IV.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) [12]

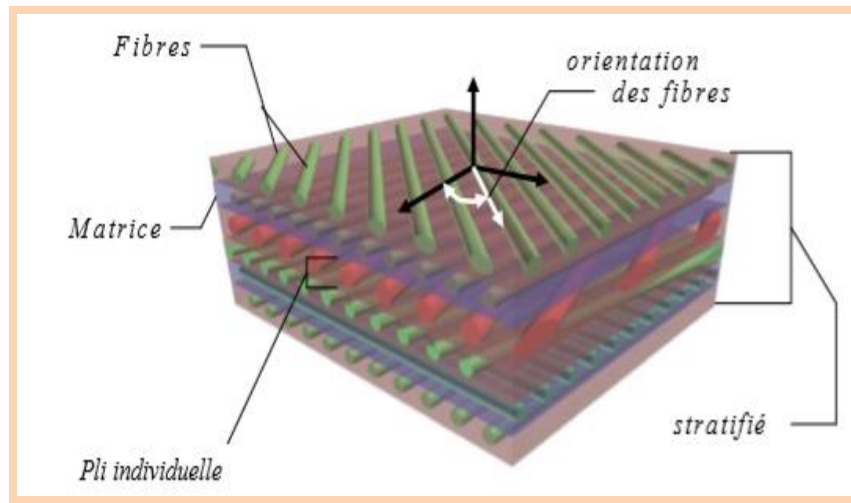


**Figure (I.9)** : structures des matériaux composites monocouches [4].

##### IV.2. Les stratifiés

Les stratifiés ou multicouches sont constitués d'un empilement successif de plusieurs mono-couches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié (La superposition des monocouches) [30]. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre

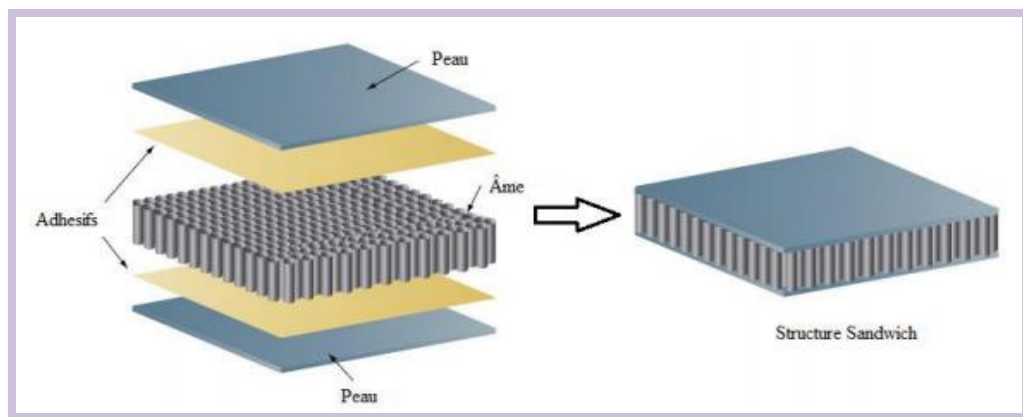
de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure [31].



**Figure (I.10) :** structure d'un composite stratifié [32]

### IV.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 [5, 31].



**Figure (I.11) :** Structure d'un matériau sandwich [33]

## V. 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]

## IV. Domaines d'application

Grâce au procédé d'assemblage associant une fibre à une matrice et les propriétés de très hautes performances de matériau final. Les matériaux composites se substituent de plus en plus aux métaux traditionnels dans la plupart des applications industrielles et inondent de plus en plus notre quotidien. Dans ce qui suit, nous passerons en revue les applications les plus populaires de ces matériaux.

### IV.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 aéronautique utilise principalement des composites en fibre de carbone en raison de leurs caractéristiques de haute performance [36, 37].

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% [6].

#### **IV.2. Industrie des transports terrestres et maritimes**

Dans le domaine des transports, les matériaux composites ont été utilisés dans les voitures, les trains, les navires et autres outils de transport depuis plus d'un demi-siècle, les matériaux composites sont principalement utilisés dans une variété de composants de carrosserie, (capot moteur, tableau de bord, des boucliers amortisseurs de choc, porte, plancher, siège, camion frigorifique, moteur à incendie, wagon couvert etc....).

L'intégration des matériaux composites dans l'industrie des transports terrestres et maritimes a pu réduire substantiellement la consommation de carburant au moyen de l'économie du poids obtenu. La société LOHEAC de transports routiers a pu réduire substantiellement sa consommation de carburant grâce à l'économie du poids obtenue en remplaçant les cabines conventionnelles de ses tracteurs par de nouveaux éléments moulés en une seule pièce. Cette innovation a permis de réduire le poids de la cabine de 875 Kg. Équipée en acier, à 455 Kg seulement et de présenter une plus grande solidité et une meilleure résistance aux dégâts [36].

#### **I.3.Applications électrique et électronique**

Les matériaux composites sont équipés d'une isolation électrique de haute qualité, sans étincelles et de bons agents antimagnétiques. Ils sont utilisés pour la construction de colonnes de distribution, de tuyau isolant, de bague de retenue électrique, de lampadaire, de télégraphpole et d'outil de fonctionnement sous tension.de boîtiers de liaison et de profils pour la séparation des phases de transport de courant afin d'éviter les courts-circuités, .et aussi dans tous les composants électroniques.



#### **IV.4. L'industrie chimique**

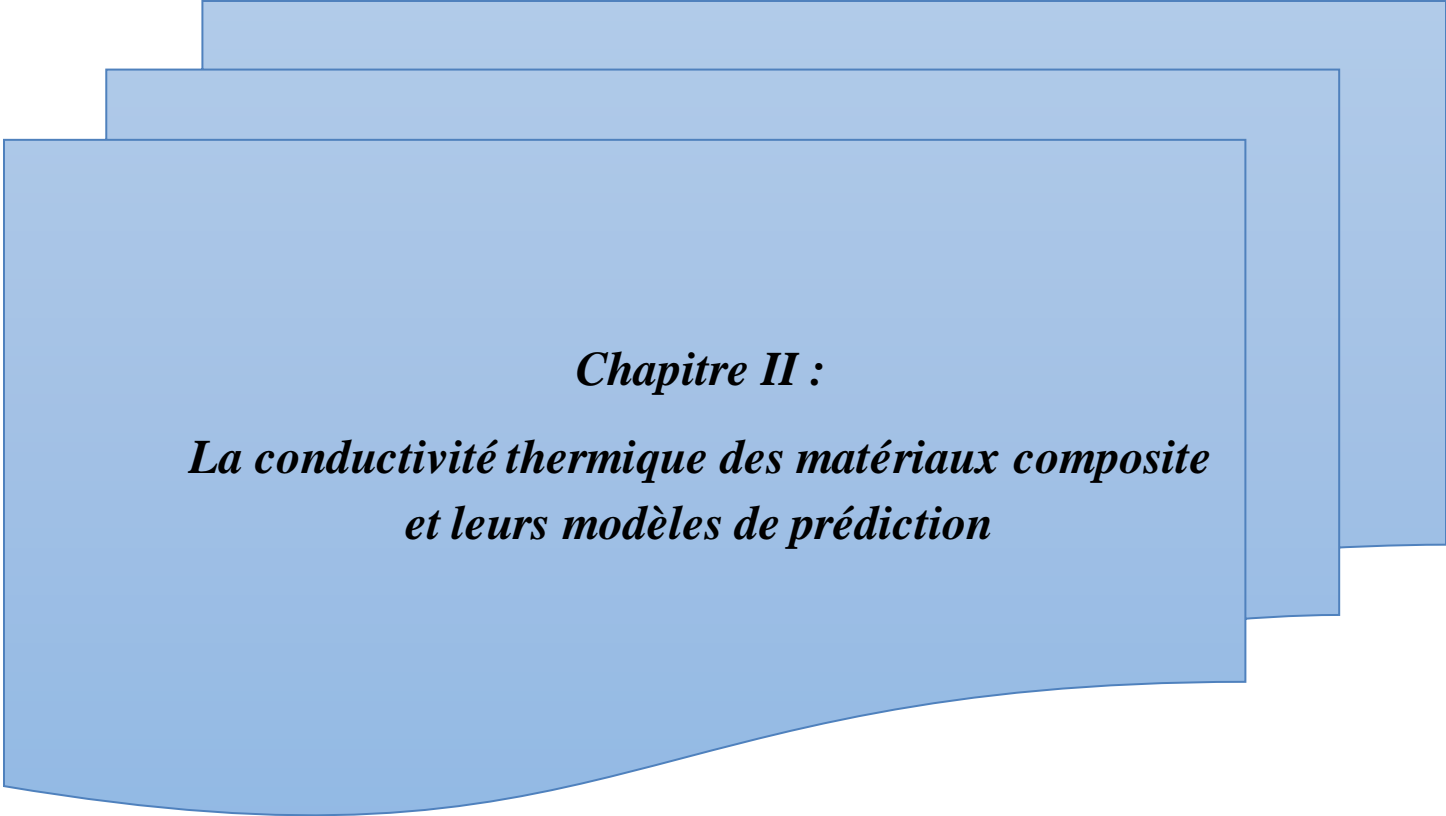
Les matériaux composites sont l'un des matériaux les plus populaires utilisés dans l'industrie chimique (l'industrie des équipements anti-corrosion), en particulier les plastiques renforcés de fibres de verre, sont très résistants aux produits chimiques corrosifs. Comprennent principalement (les laveurs, les conduits, les tuyaux, de réservoirs de stockage, de cheminées et de soufflantes d'échappement, de colonnes, de pompes, de réacteurs, etc....), pour les environnements acides et alcalins.

#### **IV.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....[38,39].

#### **IV.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 fonction, aider à la cicatrisation, corriger les anomalies et ainsi améliorer la qualité de vie des patients [37].



***Chapitre II :***  
***La conductivité thermique des matériaux composite***  
***et leurs modèles de prédiction***

## **Introduction**

Au cours de ce chapitre, nous donnerons un bref aperçu sur la conductivité thermique des matériaux composites. Ensuite nous exposerons une explication détaillée de leurs différents modèles de prédiction.

### **I. La conductivité thermique $k$ des matériaux composites**

La conductivité thermique ( $k$ ) est une grandeur physique qui désigne le pouvoir des matériaux à laisser passer la chaleur (ou l'isoler), ou c'est la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température (s'exprimer en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ ). Plus la conductivité est élevée, plus le matériau laisse passer la chaleur. A l'inverse, plus la conductivité est faible, plus le matériau est isolant [40].

La conductivité thermique des matériaux composites est une grandeur intrinsèque plus couramment étudiée car elle dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

### **II. Les modèles de prédiction de la conductivité thermique effective $K_{eff}$**

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 [41].

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 [41,42], 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 [42].

A cet effet, de nombreux modèles ont été développés pour prédire le comportement de la conductivité thermique dans les matériaux composites anisotropes, ce qui sera expliqué en détail dans ce qui suit.

### II.1. Les modèles analytiques

#### II.1.1. Modèles de premier ordre (ou modèles en série et en parallèle)

D'après cette approche, on peut supposer que la conductivité thermique réelle d'un certain milieu est toujours comprise entre deux valeurs extrêmes, la borne inférieure (modèle série) correspond à un milieu où le flux de chaleur est perpendiculaire aux strates, et la borne supérieure (modèle parallèle) correspond à un milieu où l'orientation des strates et la direction du flux de chaleur sont disposés parallèlement [43]. Ce modèle a été proposé par Wiener en 1912, qui lui a appliqué une analogie électrique au problème du transfert de chaleur dans les matériaux hétérogènes. Les deux phases sont supposées arrangées parallèlement l'une à l'autre. La conductivité thermique effective est alors bornée par les deux valeurs  $k_{inf}$  et  $k_{sup}$ , avec :  $k_{inf} \leq k_{eff} \leq k_{sup}$  [44]

$$\frac{k_{sup}}{k_m} = \varphi_m + \frac{k_{re}}{k_m} \varphi_{re} \quad \text{et} \quad \frac{k_{inf}}{k_m} = \frac{\frac{1}{k_m}}{\frac{\varphi_m}{k_m} + \frac{\varphi_{re}}{k_{re}}} \quad \text{Avec : } \varphi_m = 1 - \varphi_{re}$$

Où :

$k_{eff}$  : la conductivité thermique effective de composite matrice/renfort.

$k_{sup}$  : la conductivité thermique de la borne supérieure.

$k_{inf}$  : la conductivité thermique de la borne inférieure.

$\varphi_m$  : la concentration volumique de la matrice.

$\varphi_{re}$  : la concentration volumique de renfort.

$K_m$  : la conductivité thermique de la matrice.

$k_{re}$  : la conductivité thermique de renfort.

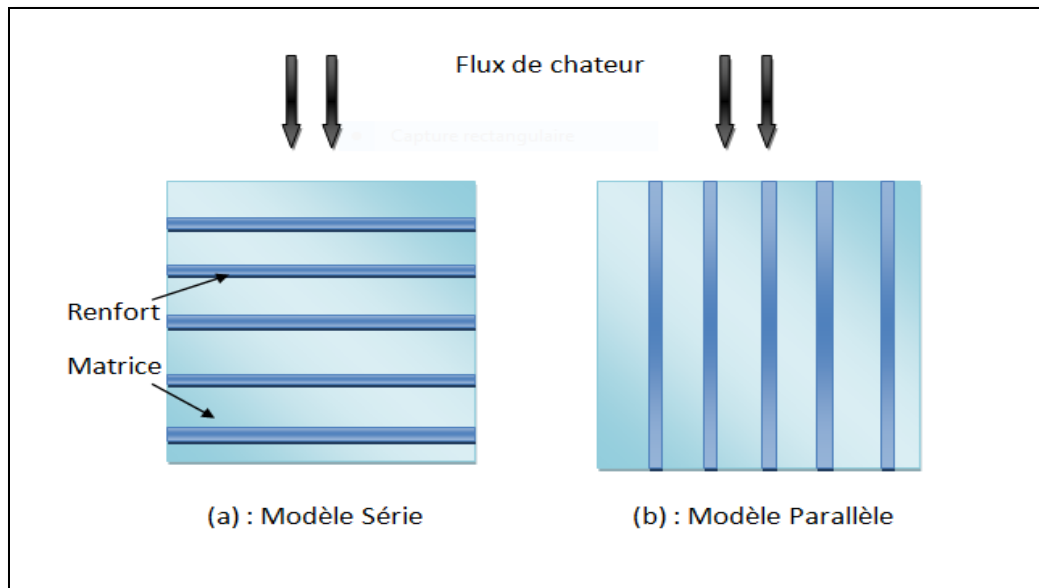


Figure (II.1) : Modèles de premier ordre

### II.1.2. Modèle de Maxwell

L'approche de Maxwell, initialement associée à un problème de conduction électrique dans un milieu hétérogène suppose que le milieu granulaire soit constitué de plusieurs particules sphériques de même diamètre  $D_p$ . L'ensemble du modèle est représenté par un milieu bi-phasique, constitué d'une phase continue et de particules sphériques non poreuses. Ce modèle de calcul concerne les milieux granulaires de forte porosité. Les particules sont séparées d'une distance, et les interactions entre les champs thermiques des particules sont négligées [43,5].

La formule de Maxwell est donnée par :

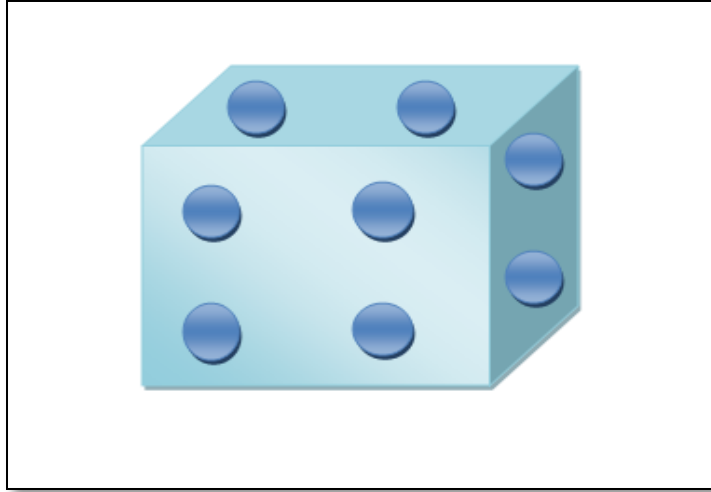
$$k_{eff} = k_m \frac{2k_m + k_{ch} - 2(k_m - k_{re})\phi}{2k_m + k_{ch} + 2(k_m - k_{re})\phi}$$

Où :

$K_{eff}$ ,  $k_m$  et  $k_{re}$  : sont respectivement la conductivité thermique effective de composite, la conductivité thermique de la matrice et la conductivité thermique de renfort

$\phi$  : La fraction volumique des renforts (des sphères) tel que  $\phi_{re} = \frac{V_{re}}{V}$  et  $V = V_m + V_{re}$

$V$ ,  $V_m$  et  $V_{re}$  : sont respectivement le volume de totale de composite, le volume de matrice et le volume de renfort.



**Figure (II.2) : Modèle de Maxwell**

### II.1.3. Modèle de Bruggeman

Ce modèle est l'une des corrélations utilisées pour la prédiction de la conductivité thermique effective, proposé en 1935 par Bruggeman [5]. Elle est basée sur les suppositions de Maxwell [44], et donnée par la formule suivante :

$$1 - \varphi_{re} = \frac{k_{eff} - k_{re}}{k_m - k_{re}} \left( \frac{k_m}{k_{eff}} \right)^{\left( \frac{1}{1+x} \right)}$$

Où :

$k_{eff}$ ,  $k_m$  et  $k_{re}$  : sont respectivement la conductivité thermique effective de composite, la conductivité thermique de la matrice et la conductivité thermique de renfort.

$\varphi_{re}$  : la concentration volumique de renfort.

$X$  : constante qui dépend de la géométrie des inclusions ( $x=2$  pour les inclusions sphérique,  $x=1$  pour les inclusions cylindriques).

### II.1.4. Modèle de Topper [45]

Dans ce modèle, Topper est utilisée un modèle d'énergie série-parallèle pour un système de vides cubiques dans un réseau ordonné. Où le transfert radiatif est négligeable la conductivité thermique équivalente donnée par la formule suivante :

$$\frac{1}{k_{eff}} = \left[ \frac{1 - \varphi_3^{\frac{1}{3}}}{k_m} + \frac{\varphi_3^{\frac{1}{3}}}{k_{re} \varphi_3^{\frac{2}{3}} + k_m (1 - \varphi_3^{\frac{2}{3}})} \right]$$

Pour les sphères réparties dans un simple réseau cubique

$$\frac{1}{k_{\text{eff}}} = \frac{1 - 2\left(\frac{3\phi}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{k_m} + \frac{\tan^{-1} \left[ \frac{\left(\frac{3\phi}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{k_m}{\pi(k_m - k_{re})} - \left(\frac{3\phi}{4\pi}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{2}}}\right]}{\pi(k_m - k_{re}) \left[ \left(\frac{k_m}{\pi(k_m - k_{re})} - \left(\frac{3\phi}{4\pi}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{2}} \right]}$$

Où :

$k_{\text{eff}}$  : la conductivité thermique effective du composite

$k_m$  : la conductivité thermique du matrice.

$k_{re}$  : conductivité thermique de la phase discrète (renforts).

$\phi$  : La fraction volumique des renforts.

### II.1.5. Modèle de Donea [5,45]

En utilisant les principes des variations, Donea a obtenu la limite supérieure  $k^+$  et inférieure  $k^-$  pour la conductivité thermique effective d'un matériau composite statistiquement homogène et contenant deux phases ayant chacune une conductivité thermique isotrope et uniforme.

$$k^+ = \phi k^- (1 - \phi) k_m \quad \text{et} \quad k^- = \frac{\hat{k} k_m}{k_m + (1 - \phi) k}$$

Pour une sphère :  $\hat{k} = k_m \left[ \frac{(P+2)+2S(P-1)}{(P+2)-(P-1)S} \right]$  Avec :  $P = \frac{k_m}{k_{re}}$  et  $S = \left(\frac{a}{b}\right)^3$

Où :

a : le rayon de l'inclusion (renfort).

b : le rayon de la plus grande coquille sphérique possible entourant l'inclusion.

$k_m$  : conductivité thermique de la phase continue (matrice).

$k_{re}$  : conductivité thermique de la phase discrète (renfort).

Pour une dispersion aléatoire des sphères :  $k^+ = k^- = \hat{k}$

### II.1.6. Modèle de Chang et Vachon [46,47]

Le modèle de Chang et Vachon se trouve être un modèle dérivé de celui de modèle de Tsao, Cheng et Vachon supposent une distribution parabolique de la phase discontinue, Ce modèle est valable seulement si  $k_{re} > k_m$ . La conductivité thermique effective est donnée par :

$$\frac{1}{k_{eff}} = \frac{1}{\sqrt{C(k_m - k_{re})[k_m + B(k_{re} - k_m)]}} \ln \frac{\sqrt{k_m + B(k_{re} - k_m) + \frac{B}{2}\sqrt{C(k_m - k_{re})}}}{\sqrt{k_m + B(k_{re} - k_m) - \frac{B}{2}\sqrt{C(k_m - k_{re})}}} + \frac{1-B}{k_m}$$

$$\text{Avec : } C = \sqrt{\frac{3\varphi_{re}}{2}} \quad \text{et} \quad B = -4 \sqrt{\frac{2}{3\varphi_{re}}}$$

Où :

$k_{eff}$ ,  $k_m$  et  $k_{re}$  : sont respectivement les conductivités thermiques du composite, de la matrice et des renfort.

$\varphi_{re}$  : La concentration volumique des renforts.

### II.1.7. Modèle de Hashin et Shtrikman [41,42 ,48]

En 1965, Hashin et Shtrikman s'inspirèrent de l'approche de Maxwell et, en utilisant l'hypothèse de la perturbation, développèrent un modèle plus performant des propriétés thermiques d'un matériau multiphasé pour différents types d'inclusions. La distribution des tailles prise par Hashin et Shtrikmann n'est pas aléatoire mais elle a des caractéristiques particulières et la conductivité thermique des dopants est supérieure à celle de la matrice ( $k_{re} > k_m$ ). Les dopants sont des sphères de conductivité  $k_{re}$  et de rayon  $R_{re}$  entourés par une coquille de conductivité  $k_m$  et de rayon  $R_m$ . La distribution est telle qu'elle remplit tout le volume avec  $\varphi_{re} = \left(\frac{R_m}{R_{re}}\right)^3$ . La conductivité thermique effective  $k_{eff}$  s'exprime suivant Hashin et Shtrikman par :

$$\frac{k_{eff}}{k_m} = \frac{1+(d-1)\varphi_{re}\beta}{1-\varphi_{re}\beta} \quad \text{Avec : } \beta = \frac{k_{re}-k_m}{k_{re}+(d-1)k_m}$$

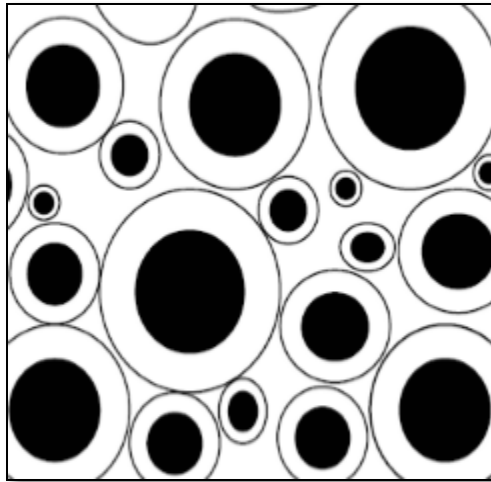
Où :



$d$  : est un paramètre qui représente la dimension du système et définit la forme des renforts. Dans le cas d'un renfort (inclusion) sphérique  $d=3$ , et pour les cylindres  $d=2$ .

$\varphi_{re}$  : La concentration volumique des renforts.

$k_{re}, k_m$  : Les conductivités thermiques des renforts et de la matrice, respectivement



**Figure (II.3)** : Assemblage de sphères ou de cylindres dans un composite Selon le modèle de Hashin et Shtrikman pour  $k_{re} > k_m$ . La matrice est représentée en blanc et la phase dispersée en noir [5,46]

### II.1.8. Modèle de Hatta et Taya

En 1985, Hatta et Taya développent un modèle de prédiction de la conductivité thermique effective pour des fibres courtes de différentes orientations. Cette approche prend en compte la forme et les interactions entre les fibres de différentes orientations [46,49]. La formule de Hatta et Taya est donnée par :

$$k_{eff} = k_m \left[ 1 - \frac{\varphi_{re}(k_{re}-k_m)[(k_{re}-k_m)(2s_{33}+s_{11})+3k_m]}{3(k_{re}-k_m)^2(1-\varphi_{re})s_{33}s_{11}+k_m(k_{re}-k_m)R+3k_m^2} \right]$$

Avec:  $R=3(s_{11}+s_{33})-\varphi_{re}(2s_{11}+s_{33})$

Où  $R$  facteur lié à la géométrie des inclusions.

Si les inclusions sont sphériques, alors  $S_{11}=S_{22}=S_{33}=\frac{1}{3}$  et la formule se réduit à

$$k_{eff} = k_m \left[ 1 + \frac{\varphi_{re}}{\frac{(1-\varphi_{re})}{3} + \frac{k_m}{k_{re}-k_m}} \right]$$

## II.2. Les modèles semi-analytiques ou (semi-empiriques)

### II.2.1. Modèle de Lewis et Nielsen

En 1970, Lewis et Nielsen ont modifié l'équation Halpin-Tsai pour inclure l'effet de la forme des particules et l'orientation ou le type de garnissage pour un système à deux phases. Ce modèle est simple, donne de bons résultats et couvre une gamme de formes et de motifs de particules [5,47,50]. La conductivité thermique effective d'un composite selon le modèle de Lewis-Nielsen est donnée par :

$$k_{eff} = k_m \left( \frac{1+AB\varphi}{1-B\varphi\omega} \right) \text{ Avec : } B = \frac{\frac{k_{re}-1}{k_m}}{\frac{k_{re}+A}{k_m}} \quad \text{et} \quad \omega = 1 + \left( \frac{1-\varphi_{max}}{\varphi_{max}^2} \right) \varphi$$

Où :

$\varphi_{max}$  : La fraction volumique d'empilement maximum des inclusions.

$k_m$  est la conductivité thermique de la matrice.

$k_{re}$  la conductivité thermique des renfort.

$\varphi$  est la fraction volumique des renfort.

A : constante qui dépend de la forme et de l'orientation des inclusions dans le composite. Le Tableau suivante représente quelques valeurs de A:

Type d'inclusion	Direction du flux thermique	A
Cubes	Quelconque	2
Sphères	Quelconque	2,5
Fibre unidirectionnelle	Perpendiculaire	1,5
Fibres aléatoires	Quelconque	1,58
Collectif de spheres	Quelconque	$3.5 / (\varphi_{max}-1)$

**Tableau (II.1) :** quelques valeurs de A pour différents types d'inclusions [5,49]

### II.2.2. Modèle d'Agari [44,46]

Le modèle proposé par Agari est basé sur la généralisation des modèles série et parallèle. Ce modèle e modèle peut être appliqué pour des systèmes à phases multiples et pour tous les types d'inclusions. La formule d'Agari est donnée par:

$$\log k_{eff} = \varphi C_2 \log k_{re} + (1 - \varphi) \log(C_1 K_m)$$

Où :

$C_1$ : facteur d'effet sur la cristallinité de la matrice polymère

$C_2$ : facteur intervenant lors de la formation de chaine conductrice de particule.

### II.2.3. Modèle de Hamilton et Crosser [5,45]

Hamilton et Crosser définissent la conductivité thermique d'un mélange à deux composants comme suit :

$$k_{eff} = \frac{k_c(1 - \varnothing) \left. \frac{dT}{dx} \right|_1 + k_d \varnothing \left. \frac{dT}{dx} \right|_2}{(1 - \varnothing) \left. \frac{dT}{dx} \right|_1 + \varnothing \left. \frac{dT}{dx} \right|_2}$$

Le rapport des gradients thermiques peut être déterminé à partir des travaux théoriques de Maxwell et Fricke

$$\frac{\left. \frac{dT}{dx} \right|_d}{\left. \frac{dT}{dx} \right|_c} = \frac{nk_c}{k_d + (n - 1)k_c}$$

On les remplace dans l'équation précisant on obtient :

$$k_{eff} = \left[ \frac{k_d + (n - 1)k_c - (n - 1)\varnothing(k_c - k_d)}{k_d + (n - 1)k_c - \varnothing(k_c - k_d)} \right]$$

$n$ : est une constante empirique. Pour une particule sphérique, Maxwell a montré analytiquement que  $n = 3$ . Pour les particules non sphériques, Hamilton et Crosser ont corrélé de nombreux ensembles de données tel que :  $n = \frac{3}{\psi}$  Avec :  $(0,58 < \psi < 1)$

La sphéricité  $\psi$ : est définie comme étant le rapport de la surface d'une sphère, avec un volume égal à celui de la particule, à la surface des particules. D'une manière similaire, la conductivité thermique d'un mélange multi-phases est exprimée par :

$$k_{eff} = k_c \left[ \frac{1 - \sum_{i=2}^m \frac{\phi_i(n_i-1)(k_c-k_i)}{k_i+(n_i-k_i)k_i}}{1 + \sum_{i=2}^m \frac{\phi_i(k_m-k_i)}{k_i+(n_i-1)k_i}} \right]$$

Où :

$k_i$  : Conductivité thermique d'une phase  $i$ .

$k_m$  : Conductivité thermique de la matrice.

#### **II.2.4. Modèle de Springer et Tsai [5]**

Selon Springer et Tsai la conductivité thermique d'un composite à filaments unidirectionnels dans la direction le long des filaments, s'exprime par :

$$k_{eff} = k_m \left[ \phi \frac{k_{re}}{k_m} + (1 - \phi) \right]$$

Dans la direction normale au filament, une analogie entre la réponse d'un composite unidirectionnel à une charge longitudinale de cisaillement et un transfert de chaleur entraîne :

$$k_{eff} = k_m \left[ \left(1 - \frac{s}{2b}\right) + \frac{a}{b} \int_0^s \frac{dy}{(2a-h) + \frac{k_m}{k_{re}}} \right]$$

Où :

$s$  : représente la dimension transversale maximale du filament.

$h$  : la largeur du filament.

$a$  et  $b$  : sont les dimensions du volume élémentaire dans lequel le filament est monté.

Pour les filaments cylindriques dans un carré on a :

$$k_{eff} = k_m \left[ 1 - 2 \sqrt{\frac{\phi}{\pi}} + \frac{1}{B} \left( \pi - \frac{4}{\sqrt{1 - \frac{B^2 \phi}{\pi}}} \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \frac{B^2 \phi}{\pi}}}{1 + \sqrt{\frac{B^2 \phi}{\pi}}} \right) \right]$$

$$\text{Avec : } B = 2 \left( \frac{k_m}{k_{re}} - 1 \right)$$

### II.3. Les modèles empiriques

#### II.3.1. Modèle de Norton [45]

Le modèle de Norton était basé sur l'hypothèse suivante : la matrice polymère qui constitue le réseau de mousse est si complexe qu'il serait impossible de modéliser le transfert d'énergie conducteur et radiatif dans la mousse. La conductivité thermique d'une mousse de polymère avec une teneur en gaz connue est mesurée expérimentalement. En soustrayant la conductivité thermique du gaz en supposant qu'il avait le même volume total, il donnerait la conductivité "efficace" du polymère pour cette structure et cette densité particulières :

$$K_{\text{eff, polymère}} = k_{\text{mesurée}} - k_{\text{gaz}}$$

La conductivité thermique de la mousse avec un gaz différent est alors supposée être :

$$K_{\text{mousse}} = k_{\text{eff, polymère}} + k_{\text{gaz}}$$

#### II.3.2. Modèle de Progelfhof et Throne [45,51]

En ajustant les données expérimentales pour plusieurs plastiques en mousse, Progelfhof et Throne ont constaté que l'équation empirique suivante était la meilleure

$$:k_{eff} = k_m \left[ 1 + A \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^B \right] \quad \text{Avec : } A = \frac{k_m}{k_{re}}$$

Où :

B : constante empirique

$\rho$  et  $\rho_0$  : respectivement les masses volumiques apparentes de la mousse et du squelette solide.

### **II.3.3. Modèle de Ratcliffe [5,45]**

Ratcliffe a proposé une corrélation de géométrie moyenne et a analysé environ 150 ensembles de données et déterminé la variation des points de données individuels avec la corrélation. Sur la base d'un effet de variation moyen, il a préparé un graphique définissant les limites probables (supérieure et inférieure) de la conductivité thermique effective du milieu biphasé. Sur la base de ces résultats, il a présenté un nomogramme pour prédire la conductivité thermique effective.

$$k_{eff} = k_m^{\phi} k_{re}^{(\phi-1)}$$

### **II.4. Les méthodes expérimentales**

On distingue deux grandes catégories des méthodes expérimentales pour mesurer la conductivité thermique des matériaux (les méthodes en régime stationnaire et les méthodes en régime instationnaire). Le choix d'une méthode de mesures dépend de plusieurs paramètres.

- Le type de produit : milieu granulaire, milieu semi-infini.
- Le type de régime thermique car il peut être stationnaire, transitoire, ou quasi établi
- Le type de forme géométrique du milieu (2D, 3D, axisymétrique, ...)
- Les dimensions et les rapports de dimensions.
- La simplicité de la méthode.
- Les tolérances (ou précisions) de certains paramètres

#### **II.4.1. Les méthodes en régime stationnaire (permanent)**

Les méthodes en régime stationnaire sont particulièrement conçues pour mesurer les conductivités thermiques des milieux isolants se basant sur un modèle unidirectionnel et stationnaire [52]. Elles consistent à supposer le milieu en équilibre thermique, et soumis à un flux stationnaire en fonction du temps. Le principe de mesure repose sur l'exploitation des mesures de la température en divers points du milieu, l'utilisation des équations de Fourier et les conditions aux limites nous permettent de déterminer les grandeurs physiques du milieu [53].

Le champ d'application de ces méthodes est relativement limité, en raison des difficultés expérimentales présentent tel que : l'existence de résistance de contact et les fuites axiales et radiales ainsi que les difficultés de mesure de la température surtout celles de la surface [53]. Parmi ces méthodes, nous mentionnons : plaque chaude gardée, gradient de température, fil chaud, cylindres coaxiaux et méthode des boites [54].

### II.4.2. Les méthodes en régime instationnaire (non-permanent)

Les méthodes en régime instationnaire sont plus souvent utilisées pour des matériaux biologiques qui sont généralement hétérogènes et avec un pourcentage d'humidité élevé. Leur principe de mesure basée sur l'évolution temporelle de la température, le modèle développé à partir de l'équation de conservation de l'énergie qui permet de trouver une relation directe entre les paramètres d'entrée et les grandeurs mesurées [43,52].

Le champ d'application de ces méthodes est très vaste, grâce à plusieurs avantages : mesures directes des paramètres thermophysiques du milieu, la durée d'excitation thermique est courte, ainsi qu'elles sont faciles à mettre en œuvre. En contreparties de ses bons résultats, ces méthodes présentent un défaut dû à un grand nombre de limitations liées aux difficultés d'analyse des données obtenues, problème de mise au point de matériaux à étudier, et au problème de l'évaluation de la précision de la méthode. Parmi ces méthodes on rencontre la méthode à deux fluxmètres, la méthode du fil chaud, Hot Disk, le plan chaud, ruban chaud et la méthode flash [42,53].

### II.5. Les méthodes numériques

Actuellement, il existe trois grandes méthodes numériques utilisé pour la résolution des systèmes des équations à dérivé partielles régissant les défèrent problèmes physique tel que le transfert de chaleur et masse. Ces méthodes sont : les méthodes des différences finies, des volumes finis et des éléments finis.

#### II.5.1. 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.

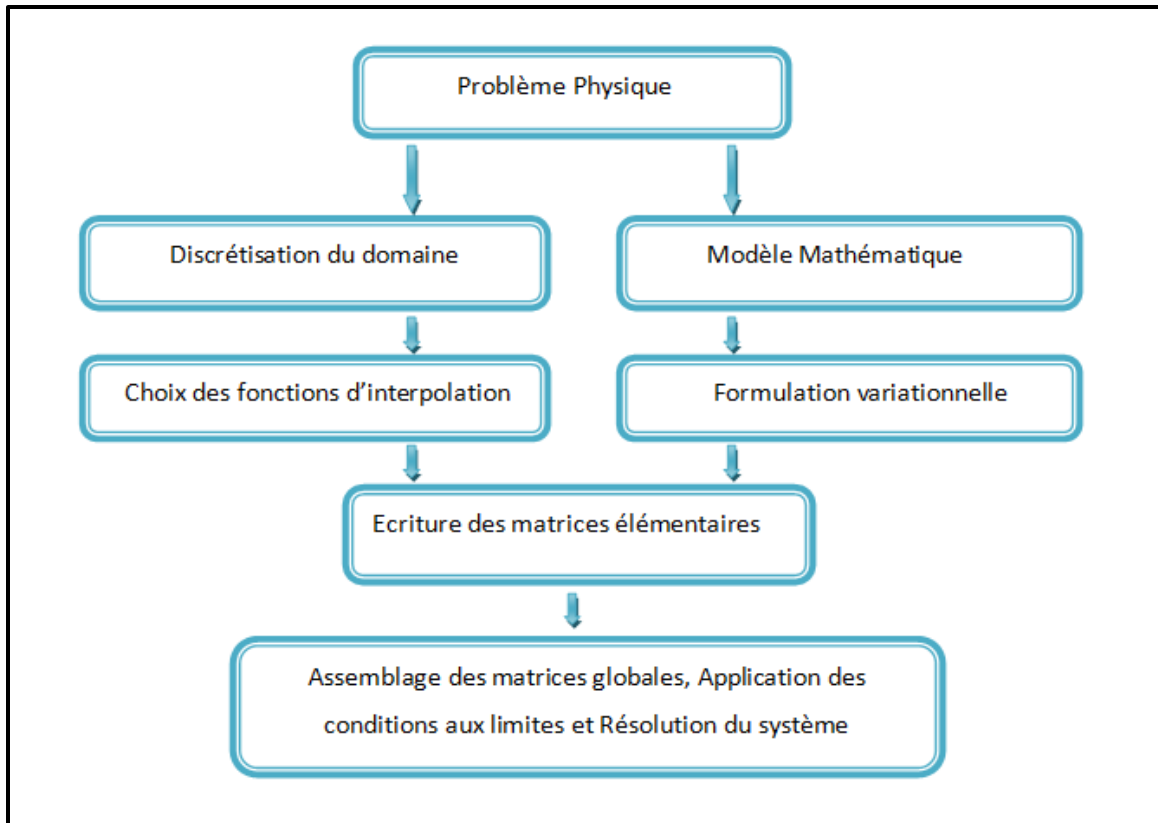
La méthode des différences finies est relativement simple de mise en œuvre, mais présente l'inconvénient d'avoir une faible qualité d'approximation des variables et difficilement applicable aux domaines à géométrie complexe, elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières régulières 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 [55].

### II.5.2. 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) [56]. Cette méthode a été introduite pour la première fois en 1956 par Turner, Clough, Martin et Topp [57,58]

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 :

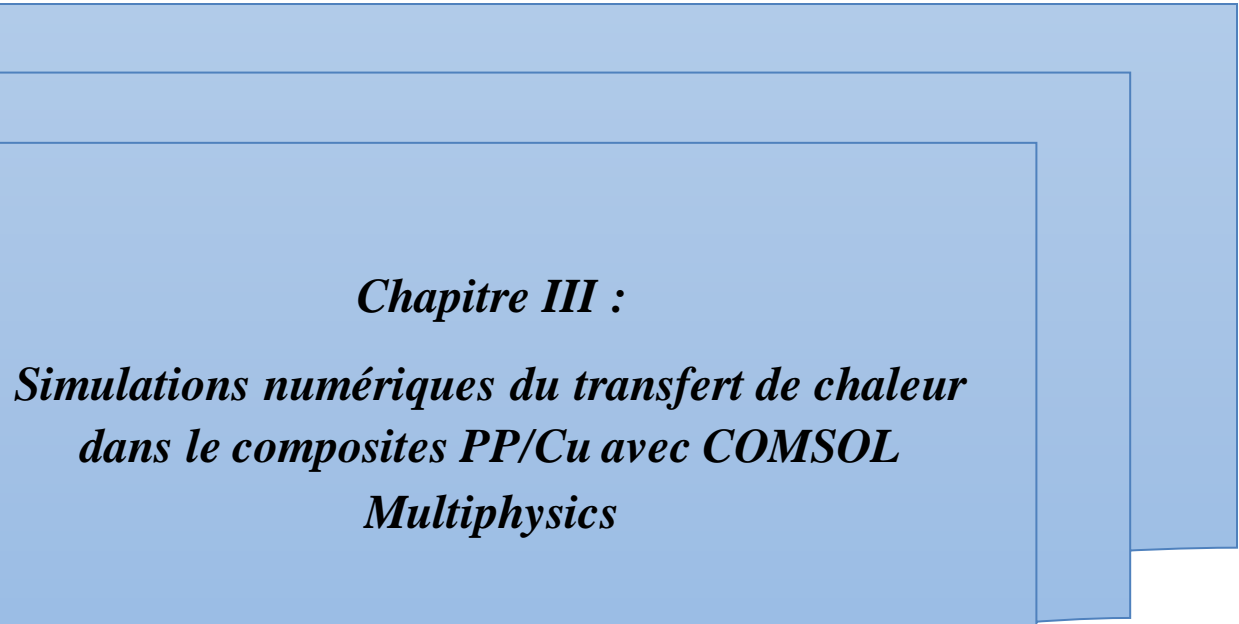




**Figure II.4 :** Etapes générales de la méthode des éléments finis [59]

### II.5.3. 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 [55, 60,61].



***Chapitre III :***

***Simulations numériques du transfert de chaleur  
dans le composites PP/Cu avec COMSOL***

***Multiphysics***

## **Introduction**

Aujourd'hui, la simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les recherches scientifiques parce qu'elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels et de prédire son évolution. Au cours de ce chapitre, nous allons illustrer l'approche numérique suivie pour la détermination de la conductivité thermique effective de composite (PP/Cu). Ensuite nous présentons et interprétons les résultats obtenus et comparez-le avec les valeurs analytiques pour les trois modèles (modèle de Maxwell, modèle de Hashin et Shtrikman et modèle de Hatta et Taya)

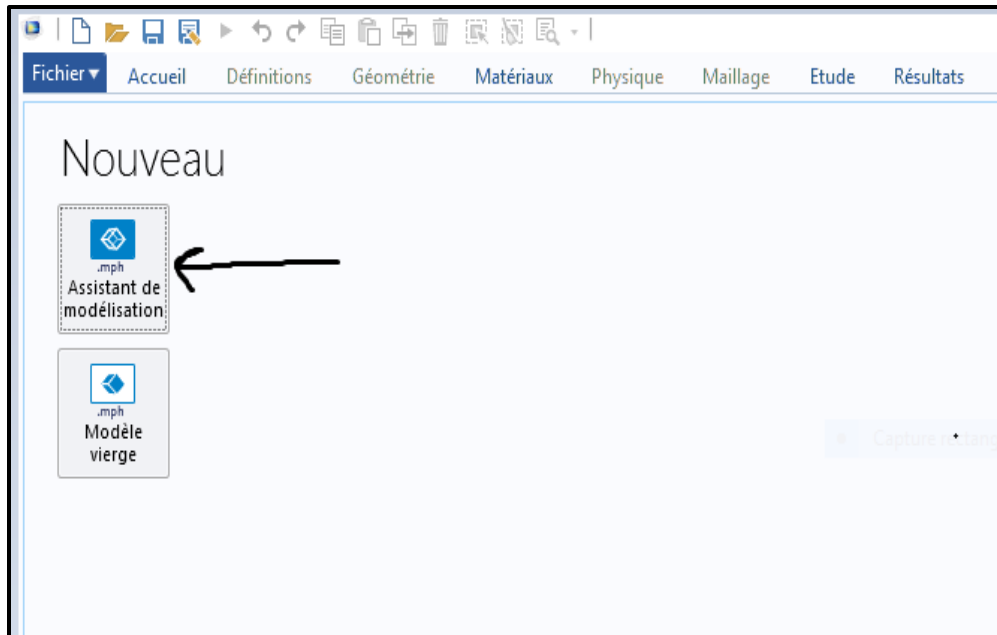
### **I. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics**

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) [62]. 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 [63].

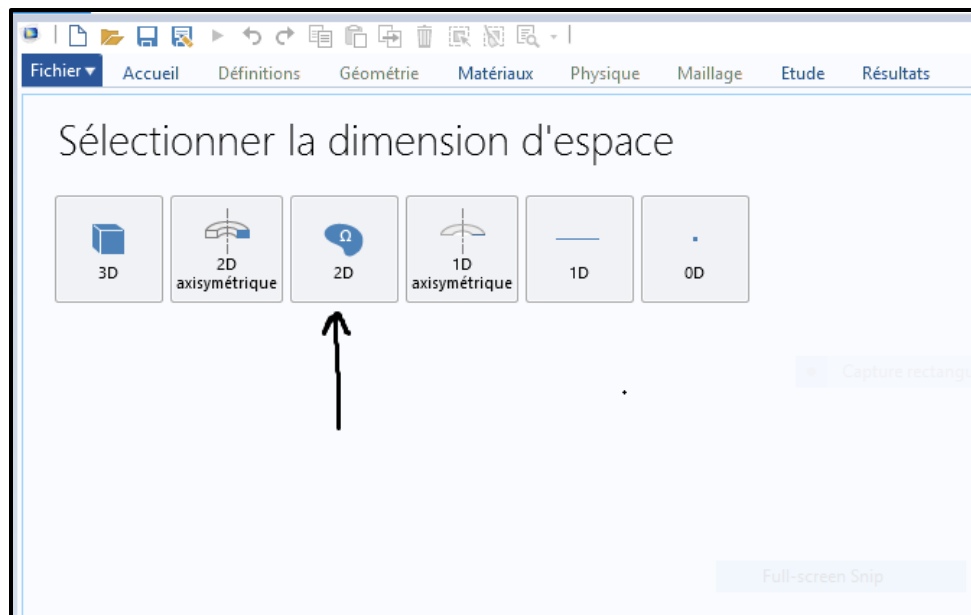
Le logiciel COMSOL basé principalement sur la méthode des éléments finis permet de traiter de nombreux problèmes grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées. Il possède de plus un environnement graphique permettant de réaliser rapidement des figures relativement complexes (en 1D, 1D-axisymétrique, 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 [64].

Pour déterminer la conductivité thermique effective d'un composite à particules sphériques numériquement par le logiciel COMSOL Multiphysics en régime stationnaire, nous suivons les étapes suivantes :

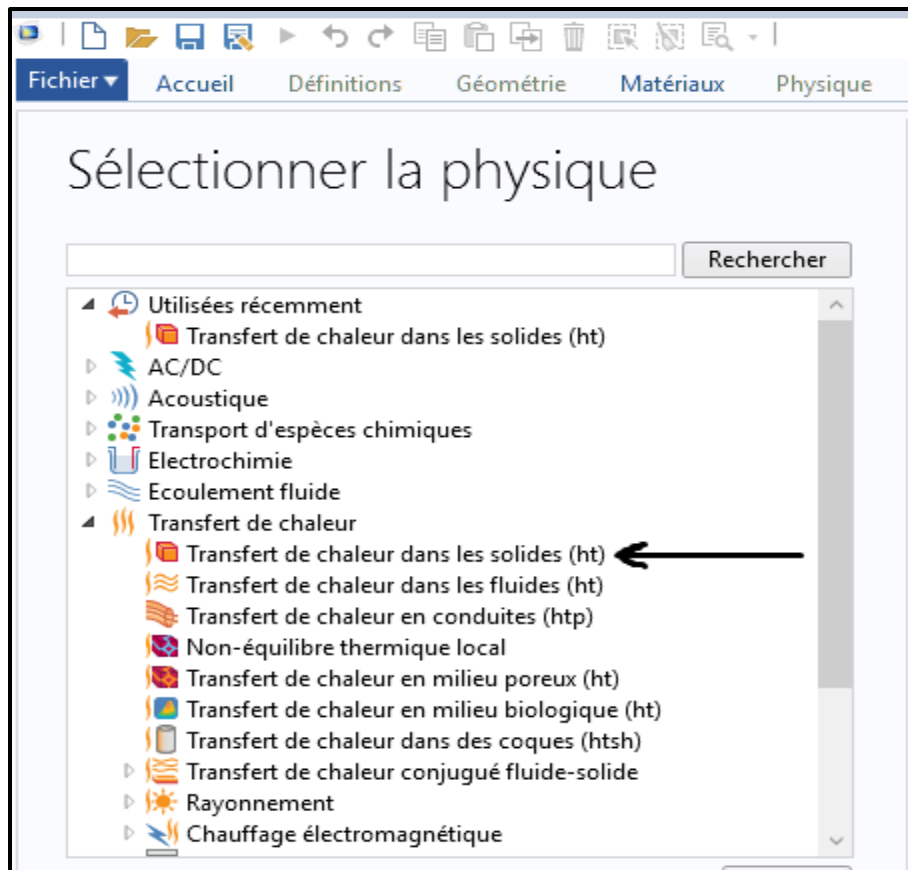
- ✓ Après l'ouverture de logiciel COMSOL Multiphysics, nous obtenons la fenêtre illustrée dans la figure suivant :



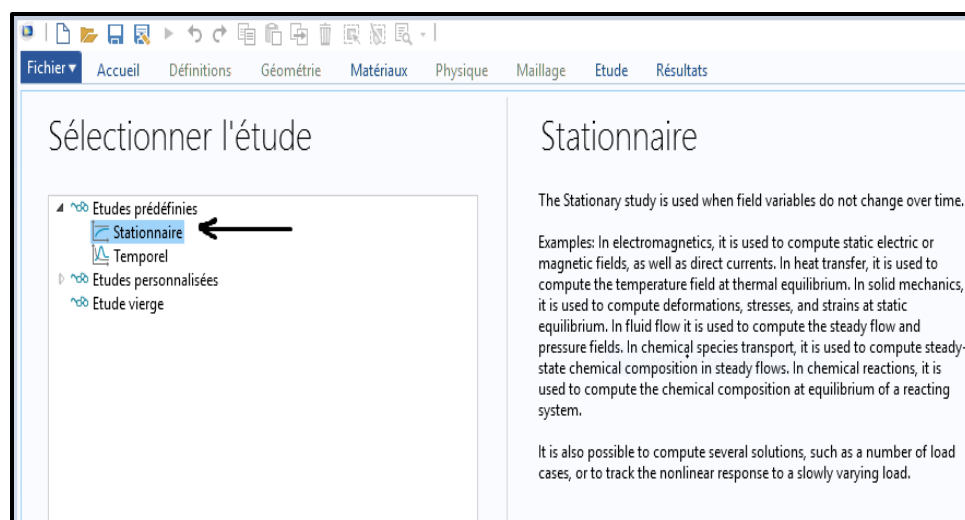
- ✓ Nous cliquons sur l'assistant de modalisation. Une fenêtre est apparue qui contient les principales dimensions de l'espace, nous choisissons la dimension qui correspond à notre étude (2D)



- ✓ Après cela, une autre fenêtre apparaît qui comprend tous les phénomènes physiques qui peuvent être traités par ce logiciel. On choisit donc le phénomène physique pertinent au problème à étudier (transfert de chaleur dans les solides)

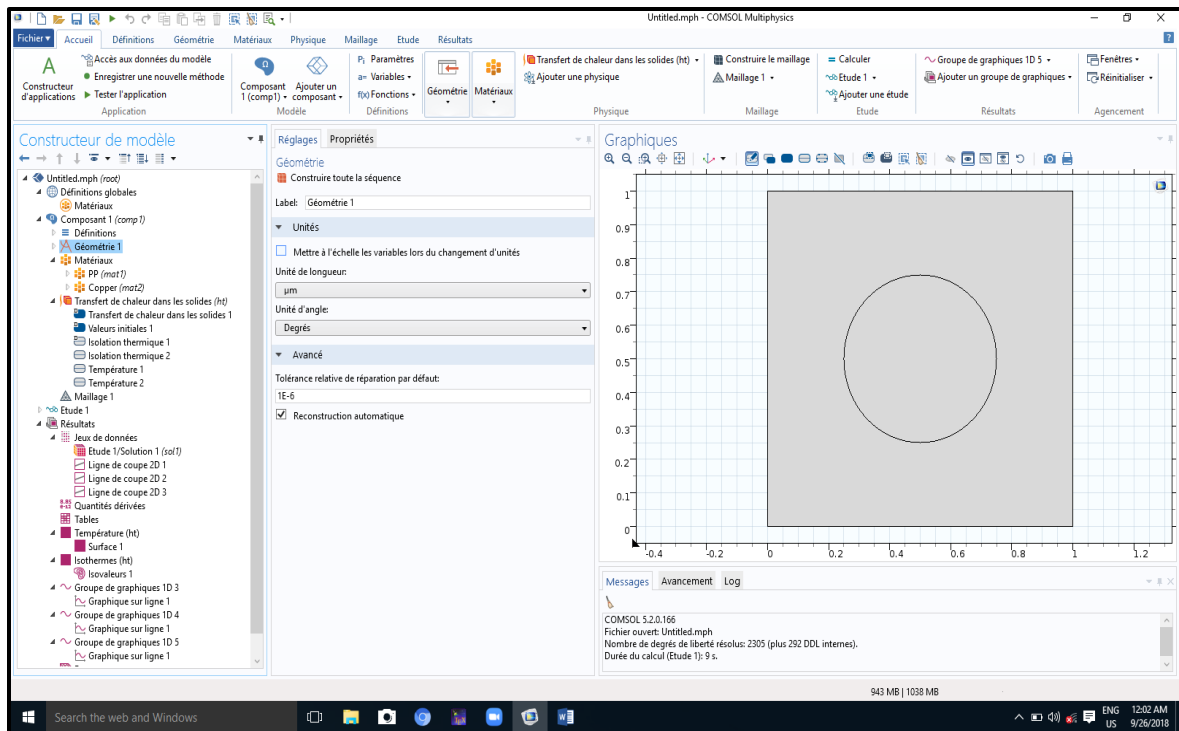


- ✓ Après avoir choisi le phénomène physique à étudier on choisit le régime d'étude (dans ce cas, nous choisissons le régime stationnaire)



- ✓ Le choix de la géométrie : Le logiciel COMSOL Multiphysics dispose de fonctions de création et d'édition géométriques assez complètes. Le logiciel offre également des fonctionnalités avancées grâce à un module d'importation géométrique qui permet de travailler avec des géométries existantes conçues dans d'autres logiciels de conception.

Dans notre conception on a choisi de modéliser une partie de composite sous forme de carrée (2D) ( $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ ) centré par une sphère de rayon 0.5m. L'unité de longueur utilisée est le  $\mu\text{m}$ .



- ✓ Après avoir choisi la géométrie, nous sélectionnons les matériaux adéquats qui constituent le composite dans le répertoire (Matériels) ou inséré-le dans le cas où il n'existe pas, puis la détermination de la localisation de chaque matériau dans la géométrie, en plus de déterminer les conditions aux limites sur chaque frontière de la géométrie choisie.
- ✓ Maillage : Le logiciel propose des outils de maillage automatique et semi-automatique 1D, 2D, et 3D dont les paramètres sont contrôlés par l'utilisateur. 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.
- ✓ Résolution du problème à l'aide d'un des différents solveurs : Régler les paramètres du solveur et lancer les calculs dans le répertoire études.
- ✓ La visualisation des résultats : Comsol Multiphysics trace les variables obtenues par la simulation.

## II. Étude en régime permanent

Dans notre travail, nous allons effectuer une étude sur le problème de transfert de chaleur par conduction et estimé la conductivité thermique effective de composite PP/Cu en régime permanent, les paramètres thermophysiques (la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la capacité thermique et la masse volumique) utilisé dans les calculs sont :

Matériaux	k (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	a (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	Cp (J. kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	ρ (g cm <sup>-3</sup> )
Polypropylène (PP)	0,22	1,35 × 10 <sup>-7</sup>	1700	0,9
Cuivre (Cu)	389	1,14 × 10 <sup>-4</sup>	381	8.96

**Tableau (III.1) :** Paramètres thermophysiques des matériaux

- ✓ Le type de renfort est des particules sphériques de cuivre de rayon  $r_1 = 0.5\mu m$ .
- ✓ Les concentrations volumiques des renforts utilisés sont : 5%, 10%, 15% ,20%, 30%, 40%.

### II.1. Formulation mathématique

Pour résoudre le problème transfert de chaleur par conduction dans le matériau composite (PP/Cu) en régime stationnaire, ont utilisé une simulation numérique bidimensionnelle basée sur la méthode des éléments finis, où les transferts de type radiatifs et convectifs sont négligeables.

Afin de modéliser le transfert conductif au sein de ces composites, il n'est pas possible de produire des géométries représentant la globalité de l'échantillon étudié. La configuration choisie est représentée par une cellule élémentaire modélisée par une particule de Cu de forme circulaire centrée dans la matrice pp de forme carrée, en suppose que la résistance de contacts entre la matrice et les renforts est négligeable.

En générale, le transfert thermique par conduction dans un certain matériau est décrit par l'équation :

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

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

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

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

$$\phi = \iint k \frac{\partial T}{\partial n} dS$$

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

$$k_{eff} = \frac{\phi}{S} \frac{L}{(T_1 - T_2)}$$

Où :

$\rho$  : 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  $(W.m^{-1}K^{-1})$

$\phi$  : Le flux de chaleur  $(W.m^{-2})$

$S$  : La surface élémentaire de composite en mètre carré ( $m^2$ )

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

$L$  : La longueur la cellule élémentaire en mètre ( $m$ )

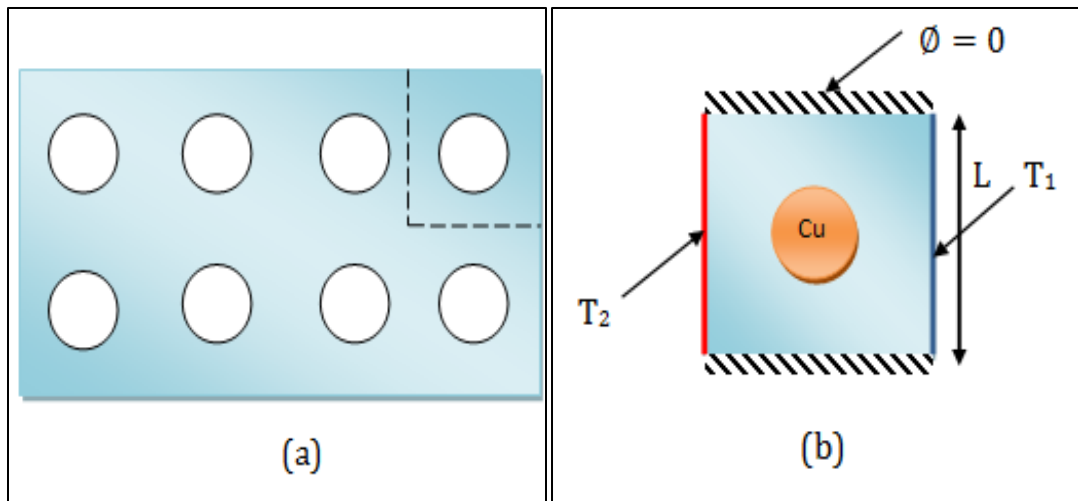
$k_{eff}$  : La conductivité thermique effective du composite en  $(W.m^{-1}K^{-1})$

## II.2. Conditions aux limites

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

- ✓ On applique deux températures différentes  $T_1 = 298K$  et  $T_2 = 323K$  sur les faces perpendiculaires à la direction de flux de la chaleur
- ✓ Pour produire un flux unidirectionnel, on suppose que les deux faces parallèles à la direction de l'écoulement de la chaleur sont isolées (adiabatiques)  $\phi = 0$  ou  $(\vec{n} \cdot (k \vec{\nabla} T) = 0)$ .

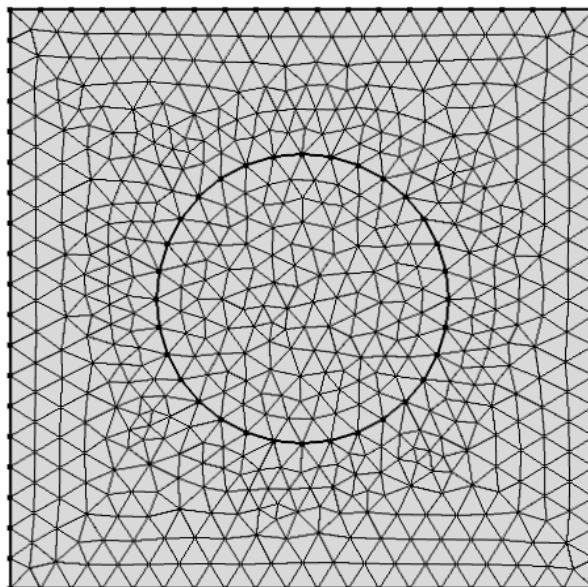




**Figure (III.1)** : Géométrie physique et conditions aux limites  
(a) : Composite, (b) : Cellule élémentaire de composite PP/Cu

### II.3. Le maillage de la géométrie

Le maillage de la géométrie choisi dans cette étude est le suivant :



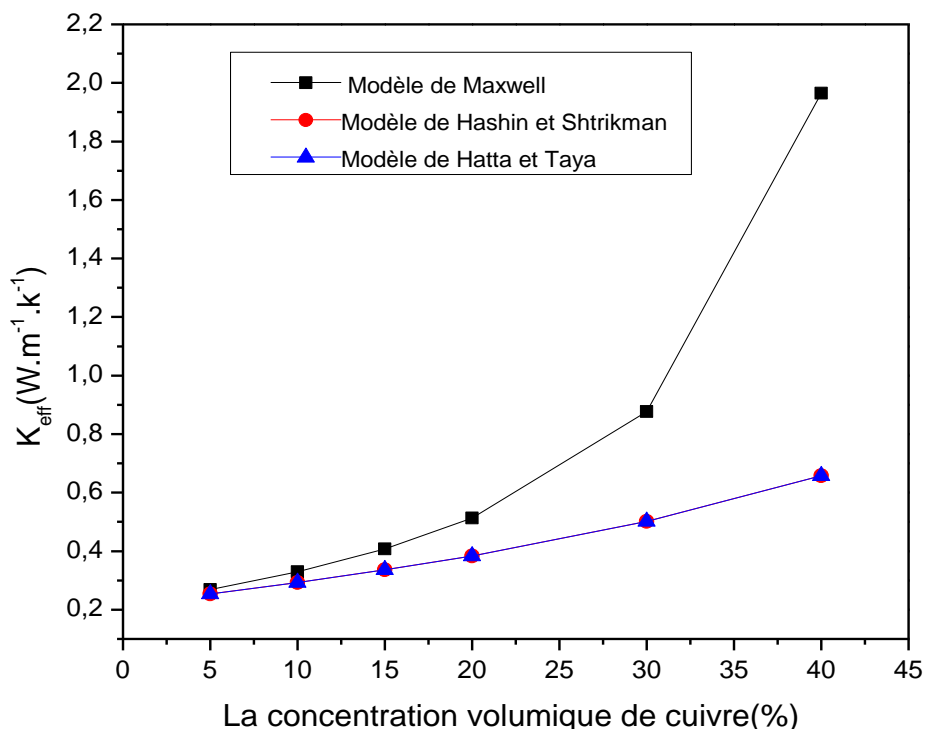
**Figure (III.2)** : Maillage de la géométrie

### III. Résultats et discussions

#### III.1. Résultats analytiques

La figure (III.3) montre des valeurs analytiques de la conductivité thermique de composite PP/Cu en fonction de la concentration volumique de particules sphériques de cuivre donnée pour trois modèles (modèle de Maxwell, modèle de Hashin et Shtrikman et le modèle de Hatta et Taya). D'après cette figure, on remarque clairement une augmentation non linéaire de la conductivité thermique avec l'augmentation de concentration volumique de cuivre, on remarque aussi que les deux modèles (le modèle de Hashin et Shtrikman et le modèle de Hatta et Taya) sont en accord, par contre le modèle de Maxwell donne des valeurs de conductivité plus importantes.

L'augmentation de la conductivité thermique effective est due à la valeur la plus élevée de conductivité thermique de cuivre et la différence remarquée entre ces modèles analytiques est principalement due aux hypothèses retenues par chaque modèle.

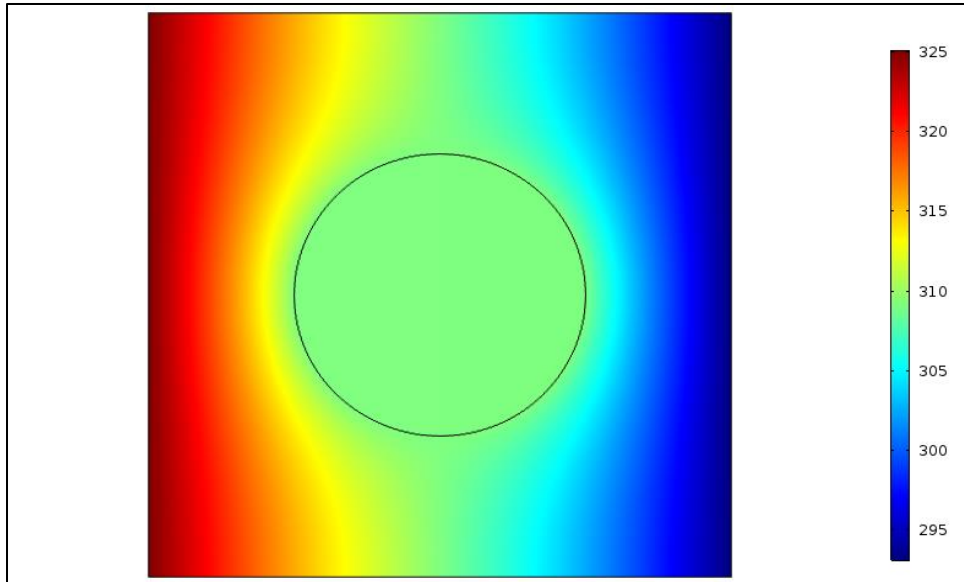


**Figure (III.3) :** La variation de conductivité thermique de composite PP/Cu en fonction concentration volumique de cuivre (pour trois modèles analytique)

## III.2. Résultats numériques

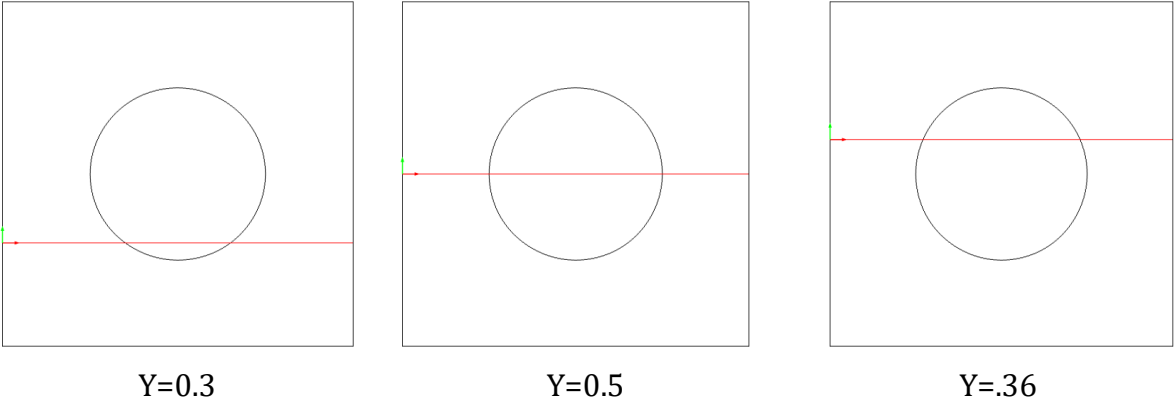
### III.2.1. Distribution de la température dans le matériau composite

La distribution de la température dans le composite PP/Cu est présentée dans la figure (III.4)

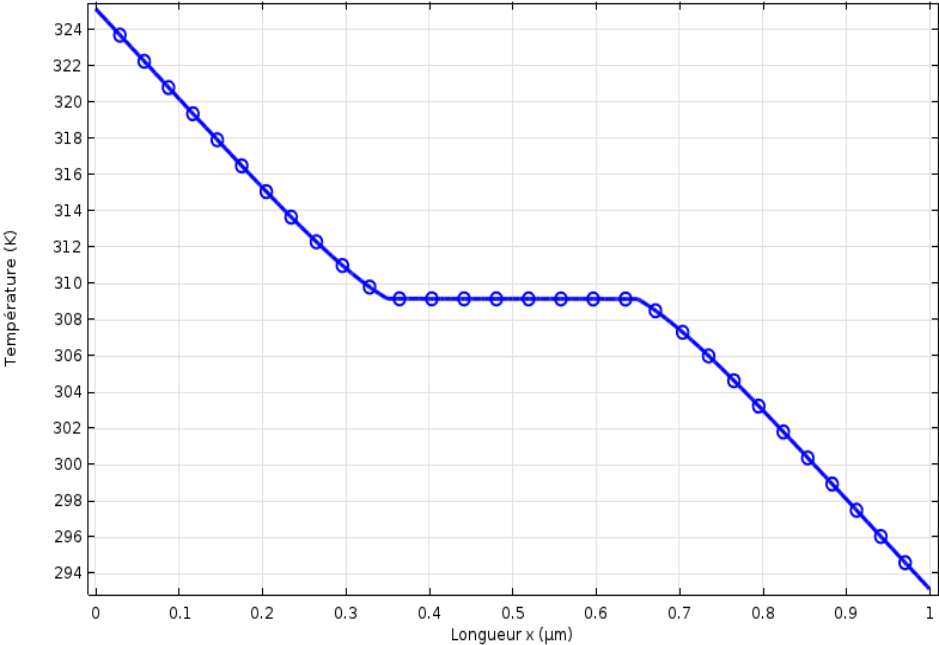


La figure (III.4) représente la distribution de la température dans une cellule élémentaire de composite PP/Cu après l'application des conditions aux limites, où l'on remarque que le flux de chaleur se propage à partir de la frontière chaude vers la frontière froide du composé. On remarque également une diminution de la température en se dirigeant à l'intérieur du composite dans la région occupée par la matrice (PP), et d'autre part, on observe que la température constante dans la région occupée par le cuivre (environ 310K°).

Pour confirmer les observations précédentes, nous avons choisi trois positions différentes ( $Y=0.3$ ,  $Y=0.5$  et  $Y=0.6$ ) du composé PP / Cu comme indiqué sur la figure, puis nous dessinons les courbes de variation de la température en fonction de la dimension de cellule dans les trois cas.



Figure(III.5) : Schéma d'une cellule élémentaire de composite PP/Cu avec les 3 positions Y



Figure( III.6): la variation de la température en fonction de dimension de cellule L pour Y=0.3

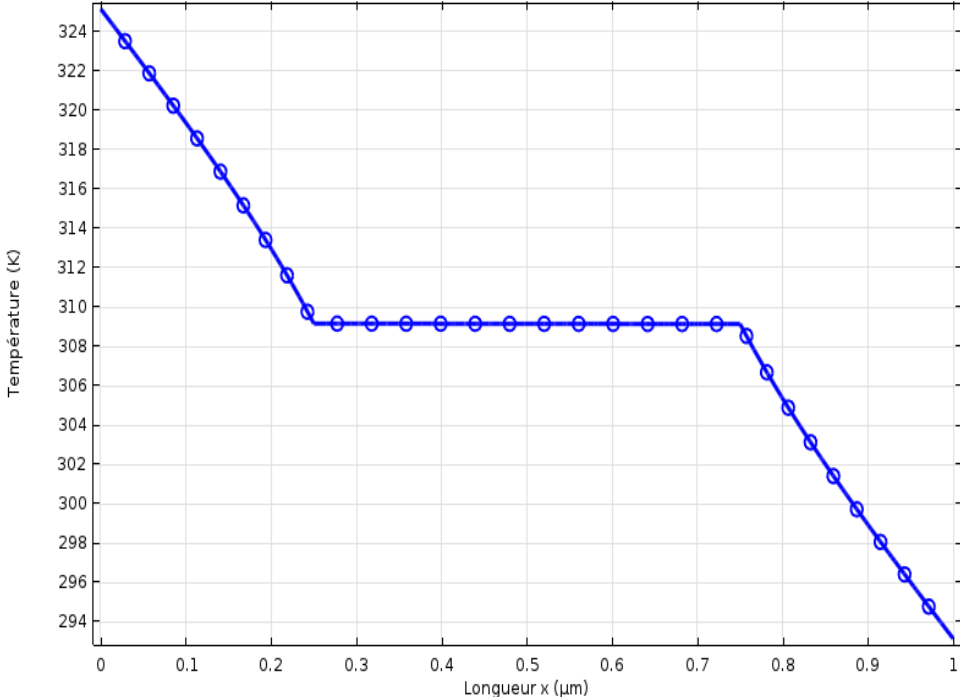


Figure (III.7) : la variation de la température en fonction de dimension de cellule L pour Y=0.5

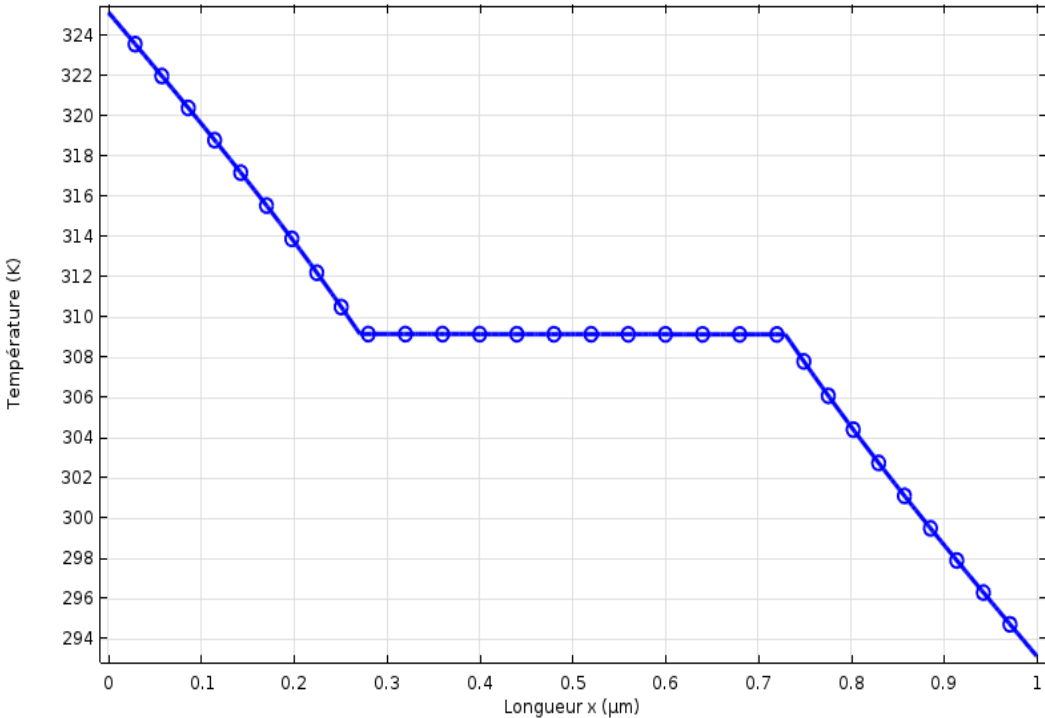


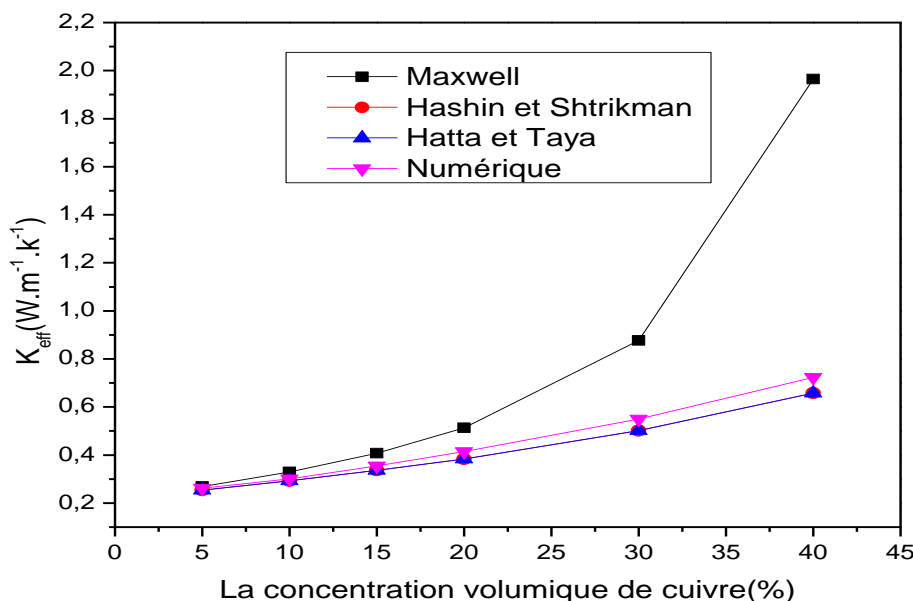
Figure (III.8) : la variation de la température en fonction de dimension de cellule L pour Y=0.6

Les figures (III.6, III.7, III.8) représentent la distribution de la température dans une cellule élémentaire de composite PP/Cu pour différentes positions de Y en fonction de la dimension de cellule (L). Pour tous les figures, nous remarquons une décroissance linéaire de la température en fonction de la dimension de la cellule L dans le domaine occupé par la matrice (PP). Cette observation peut s'expliquer par l'existence d'un gradient thermique très faible dans le composite, ce dernier est dû à la faible conductivité thermique du polypropylène ( $k_{pp} = 0.22 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$ ).

Dans le domaine occupé par le Cu. On remarque que la température est constante, quelle que soit la valeur de Y. Cette stabilité de la température est due à la conductivité thermique élevée du cuivre ( $k_{Cu} = 389 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$ ), qui permet d'atteindre un équilibre thermique instantané.

Donc, nous concluons que l'effet de la position sur la température est négligeable.

### III.2.2. La comparaison entre les résultats numériques et les résultats analytiques



**Figure (III.9) :** Comparaison des résultats numériques et analytiques de la conductivité thermique effective de composite PP/Cu

La figure (III.9) présente une comparaison entre les résultats numériques et les résultats analytiques (trois modèles) de la conductivité thermique effective de composite

PP/Cu 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 cuivre dans les quatre courbes, cette augmentation des valeurs de conductivité thermique du composé est due à la valeur élevée de conductivité thermique du cuivre métallique par rapport à la conductivité thermique de polypropylène ( $k_{Cu} \gg k_{pp}$ ) et à sa concentration volumique dans le composé. On note également que tous les modèles sont en accord dans le cas de petites valeurs des concentrations volumique de cuivre (inférieures à 10%).

Pour les concentrations supérieures à 10%, on ne remarque aucune variation entre le modèle de Hashin et Shtrikman et le modèle de Hatta et Taya avec une petite divergence par rapport aux résultats numérique, alors que nous remarquons une grande divergence dans le modèle Maxwell par rapport aux valeurs numériques.

Donc, le modèle de Hashin et Shtrikman et modélé de Hatta et Taya sont les plus proches aux résultats numériques.

### Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire est destiné à mieux comprendre le phénomène de la conduction thermique dans un matériau composite à matrice polymère renforcé par des particules métalliques (PP/Cu) à travers une simulation 2D en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics.

Nous avons d'abord présenté des généralités sur les matériaux composites, ensuite nous avons présenté une brève description de la conductivité thermique dans les composites, l'importance de leur modélisation et les principaux modèles de leur prédiction. Enfin nous avons effectué une étude numérique de la conductivité thermique effective de PP/Cu en fonction de la concentration volumique des particules de cuivre par la méthode des éléments finis, en négligeant la résistance de contact. On a comparé Les résultats obtenus numériquement avec les résultats analytiques.

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

- La conductivité thermique effective du composé (PP/Cu) augmente avec l'augmentation de la concentration volumique des particules de cuivre (autrement dit, plus la concentration volumétrique de cuivre est élevée, plus la conductivité thermique est élevée).
- Les modèles analytiques de Hashin et Shtrikman et de Hatta et Taya sont en bon accord avec nos résultats, et permet d'obtenir des prédictions proches des résultats numériques.



### References bibliographiques

- [1] R. Reddy Nagavally, «Composite materials - history, types, fabrication techniques, advantages, and applications», International Journal of Mechanical And Production Engineering, Volume- 5, Issue-9, 2017.
- [2] Juan Pedro, Berro Ramirez, « Caractérisation et modélisation de l'endommagement des composites bobines. Application à la prédiction de l'éclatement des réservoirs bobines hyperbares », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, 2013.
- [3] R.Zahi, «Comportement dynamique des rotors à arbre conique en matériaux composites », Thèse de doctorat, Université Djilali Liabés de Sidi Bel Abbas, 2018.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] T.Achour, « Étude des techniques des réparations des structures composites endommagées », Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 2011.
- [7] S. Bensaid, « Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2006.
- [8] K.Nedri, « Analyse de la vibration libre des plaques composites sur fondation élastique », Thèse de doctorat, Université Djilali Liabés de Sidi Bel Abbas, 2016.
- [9] L.Toihri, « Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibre de verre/époxy en traction », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2015.
- [10] K. Kherbouche, « Introduction aux modélisations et aux méthodes de calcul des matériaux composites », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2010.

- [11] H. Abdallaoui ; A.Saddek, «Caractérisation et élaboration d'un matériau composite jute(déches)/polyester», Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf M'sila ,2019.
- [12] B. Hami,« Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'une structure sandwich multicouches », Thèse de doctorat,Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2018.
- [13] A. Rahmane, « Étude du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs » Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine, 2019.
- [14] 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.
- [15] Z.Ould El Hacen, «Renforcement du béton par les matériaux composites », Mémoire de master,Université de Tébessa, 2016.
- [16] 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.
- [17] L.Fenniche ,C.Stambouli, « Optimisation d'un réservoir sous pression type IV en matériaux composites »,Mémoire de master, Université Saad Dahlab de Blida 1 ,2019.
- [18] 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.
- [19] M. Tahar, « Etude de l'endommagement dans un composite stratifié », Mémoire de magister, Université Abde Elhamid Ibn Badis de Mostaganem,2012.
- [20] E. Babacar LY, « Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [21] A. Mezali, R. Talahari, « Elaboration et caractérisation de tubes composites par enroulement filamentaire»,%Mémoire de master,Université M'hamed Bougara-Boumerdes,2016.

- [22] 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.
- [23] H.Djelouahi, «Influence des fibres végétales sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton », *Mémoire de master*, Université M'hamed Bougara- Boumerdes, 2017.
- [24] 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.
- [25] M. Benaissa, « Comportement des matériaux composites aux chocs », *Mémoire de magister*, Université Abd Elhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2012.
- [26] A.Sauget « Développement de matériaux composites fibreux hautes performances à matrices bio-sourcée»,*Thèse de doctorat*, Université de Lorraine,2014.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] L. Boudjema Hayet, « Elaboration de matériaux composites biodégradables issus de ressources renouvelables », *Thèse de doctorat*, Université d'Oran 2,2016.
- [30] K. Rouam, « Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles », *Mémoire de Magister*, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2014.
- [31] 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.

- [32] M. Haddadi « *Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère* », *Mémoire de magister, Université El Haje Lakhdar Batna, 2011.*
- [33] N. Mahmedi, « *Etude de modalisation du comportement mécanique des matériaux composites* », *Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 2010.*
- [34] P. Thori, P. Sharma, M. Bhargava, « *An approach of composite materials in industrial machinery: advantages, disadvantages 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] 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.*
- [38] 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.*
- [39] M. Laarej, « *Etude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite RTM* », *Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.*
- [40] J. K. Carson, J. Wang, M. F. North, and D. J. Cleland, « *A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials* », *International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp. 3075-3083, 2006.*
- [41] 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.*

- [42] 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.
- [43] M. Bessenouci, « Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat », Mémoire de magister, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2010.
- [44] M.Haddadi, «Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère », Mémoire de master, Université Alhadje Lahkedar Batna, 2011.
- [45] R. C. Progelhof, J. L. Throne, R. R. Rurtsch, «Methods for Predicting the Thermal Conductivity of Composite Systems: A Review », Polymer engineering and science, Vol. 16, No. 9, SEPTEMBER, 1976.
- [46] R. Benghanem, « Etude théorique de la conductivité thermique des composites », Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf M'sila ,2017.
- [47] K. Bourai, « Étude du comportement thermique d'un composite bois-polymère pour une application rotomoulage », Thèse de doctorat, Université de Laval, 2010.
- [48] H. Khab, « Etude du comportement hygothermique d'éléments de construction. Application aux toitures », Mémoire de magister, Université Mentouri- Constantine, 2007.
- [49] N. Benmansour, « Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat », Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2015.
- [50] Karol Pietrak, Tomasz S. Wiśniewski, « A review of models for effective thermal conductivity of composite materials», Journal of Power Technologies95(1) (2015) 14–24.
- [51] J. Henon, « Elaboration de matériaux poreux géopolymères à porosité multi-échelle et contrôlée », Thèse de doctorat, Université de Limoges,2012.
- [52] M. Bessebouci, « Caractérisation, modélisation et analyse du comportement thermo-mécanique des matériaux de construction à base pouzzolanique », Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen ,2018.

- [53] M. Filali, « Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures », Thèse de doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse, 2006.
- [54] M. Babacar, « Etude du champ thermique dans une plaque : application à la mesure de la conductivité thermique des matériaux », Mémoire pour obtenir le diplôme d'ingénieur de conception, Université CheikhH Anta Diop, 2005.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] N.Meziani, «Contribution de l'approche en déformation dans la modélisation des structure à contour circulaire», Mémoire de magister, Université Mohamed Khider - Biskra -,2006.
- [58] 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.
- [59] A. Seghir, « Cours méthode des éléments finis », Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2005-2014.
- [60] 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.
- [61] B. Saker, « Calcul des forces d'origine électromagnétique dans les structures électriques », Mémoire de magister, Université Larbi Tebessi-Tebessa, 2012.
- [62] 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.

## Références bibliographiques

---

[63] 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.

[64] 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.

## Résumé

L'objectif principal de cette étude est de simuler en 2D la conductivité thermique effective d'une composite, qui a une matrice polymère chargés par des inclusions métalliques sphériques (PP/Cu), en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics où la résolution numérique est basée sur la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus numériquement sont en accorde convenablement avec les résultants des modèles analytiques de Hatta-Taya et de Hashin-Shtrikman.

**Mots-clés :** Matériaux composites, Conductivité thermique effective, COMSOL Multiphysics, Eléments finis.

## Abstract

The main objective of this study is to simulate in 2D the effective thermal conductivity of an amateur polymer composite loaded with spherical metallic inclusions (PP / Cu), using the COMSOL Multiphysics software where the numerical resolution is based on the method of Finished elements. The results obtained numerically agree well with the results of the analytical models of Hatta-Taya and Hashin-Shtrikman.

**Keywords:** Composite materials, Effective thermal conductivity, COMSOL Multiphysics, Finite elements.

## ملخص

الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو نمذجة عددية للتوصيل الحراري الفعال لمركب بوليمر مطعم بشوائب معدنية كروية (PP / Cu) في بعدين، وذلك باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics حيث تعتمد الدقة العددية على طريقة العناصر النهائية. النتائج التي تم الحصول عليها عددياً متوافقة تقريباً مع نتائج النماذج التحليلية لـ Hatta-Taya و Hashin-Shtrikman.

**الكلمات المفتاحية:** المواد المركبة، الموصلية الحرارية الفعالة، الفيزياء المتعددة كومسول، العناصر المحدودة.