

***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)

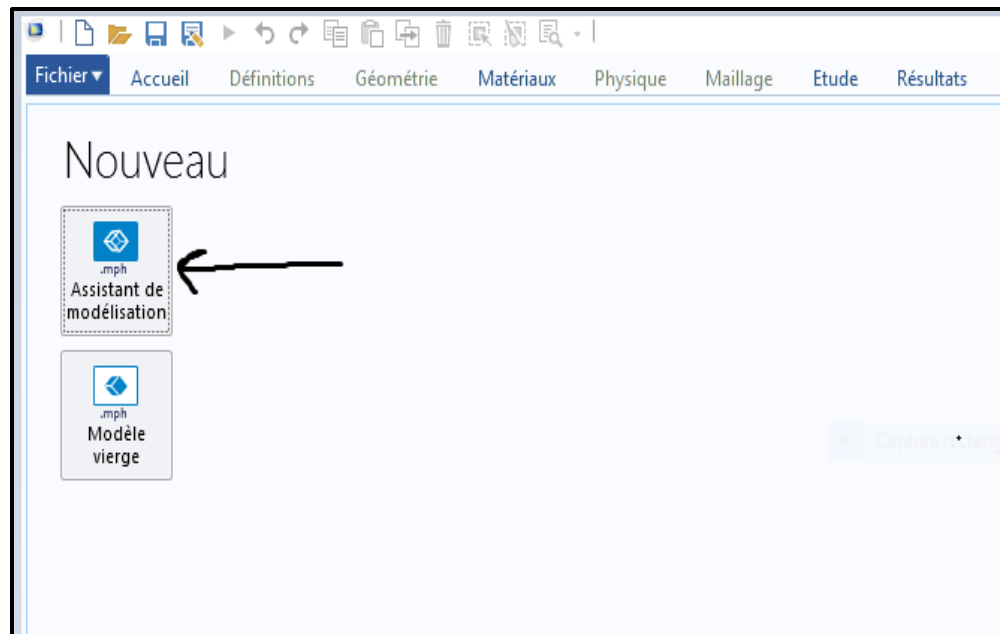
I. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

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].

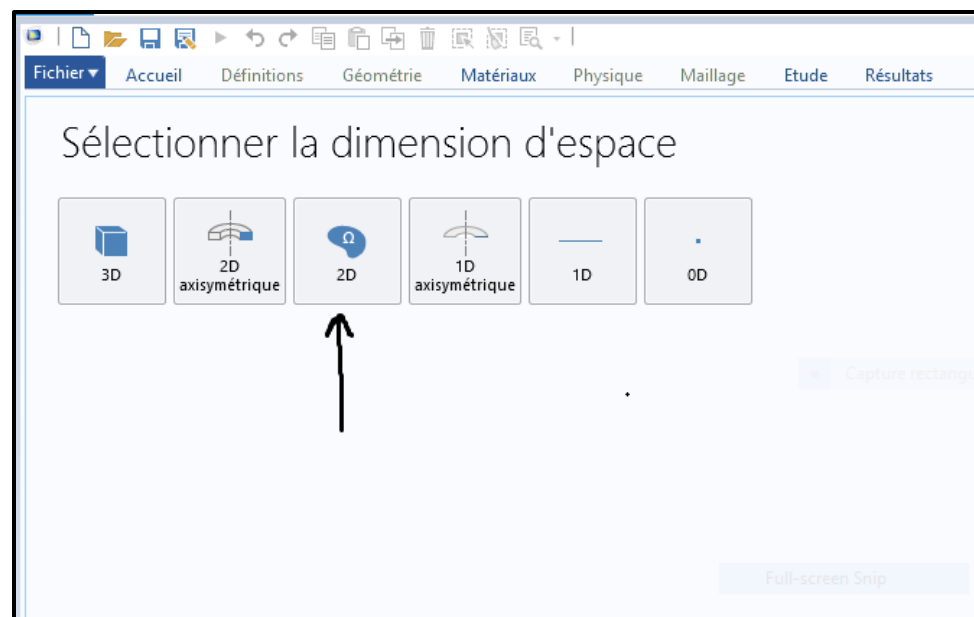
Le logiciel COMSOL basé principalement sur la méthode des éléments finis permet de traiter de nombreux problèmes grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées. Il possède de plus un environnement graphique permettant de réaliser rapidement des figures relativement complexes (en 1D, 1D-axisymétrique,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

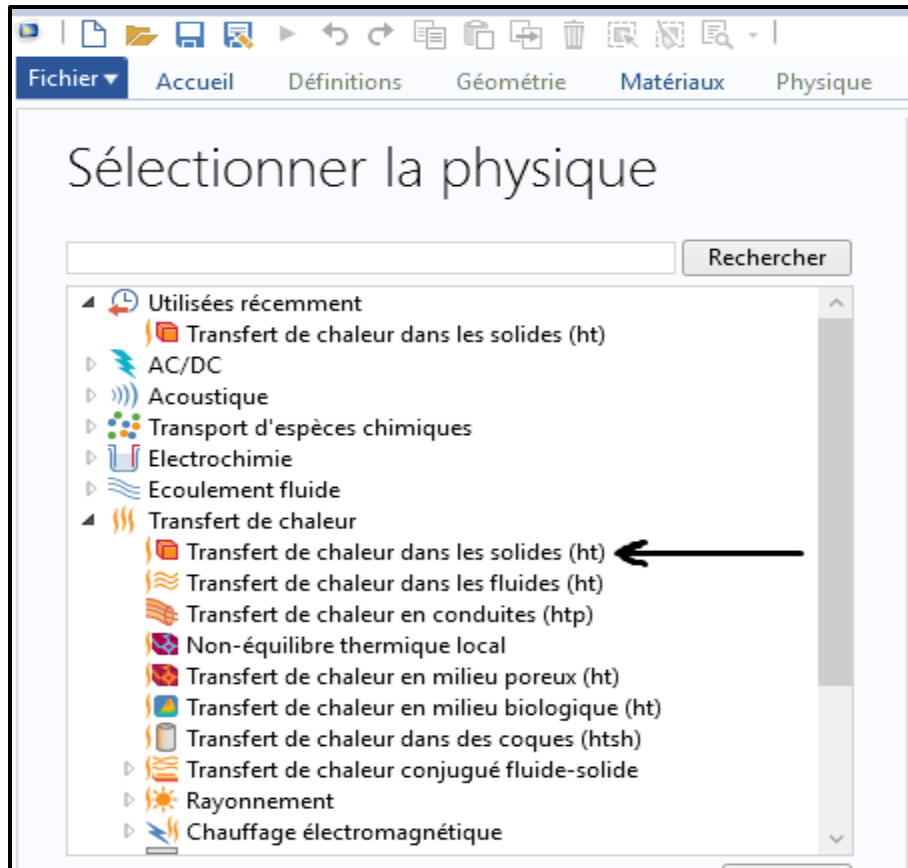
- ✓ Après l'ouverture de logiciel COMSOL Multiphysics, nous obtenons la fenêtre illustrée dans la figure suivant :



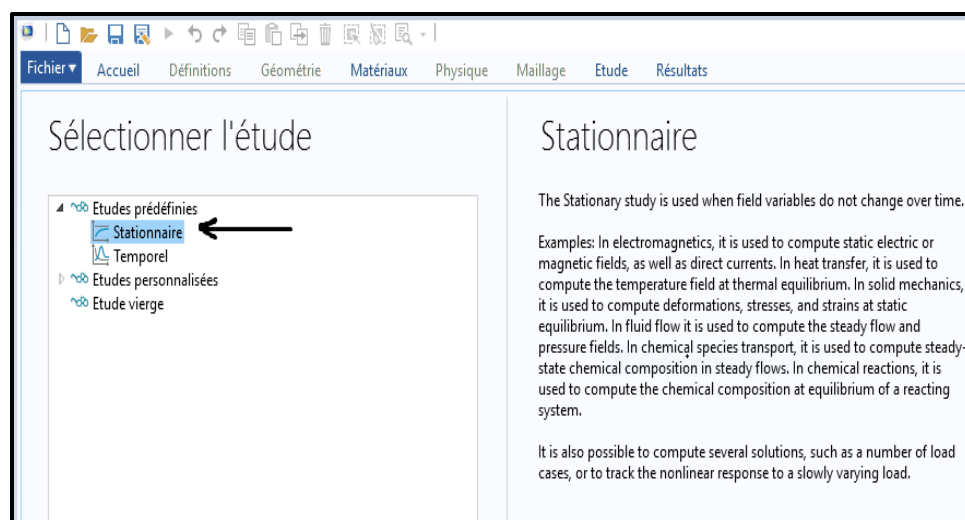
- ✓ Nous cliquons sur l'assistant de modalisation. Une fenêtre est apparue qui contient les principales dimensions de l'espace, nous choisissons la dimension qui correspond à notre étude (2D)



- ✓ 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)

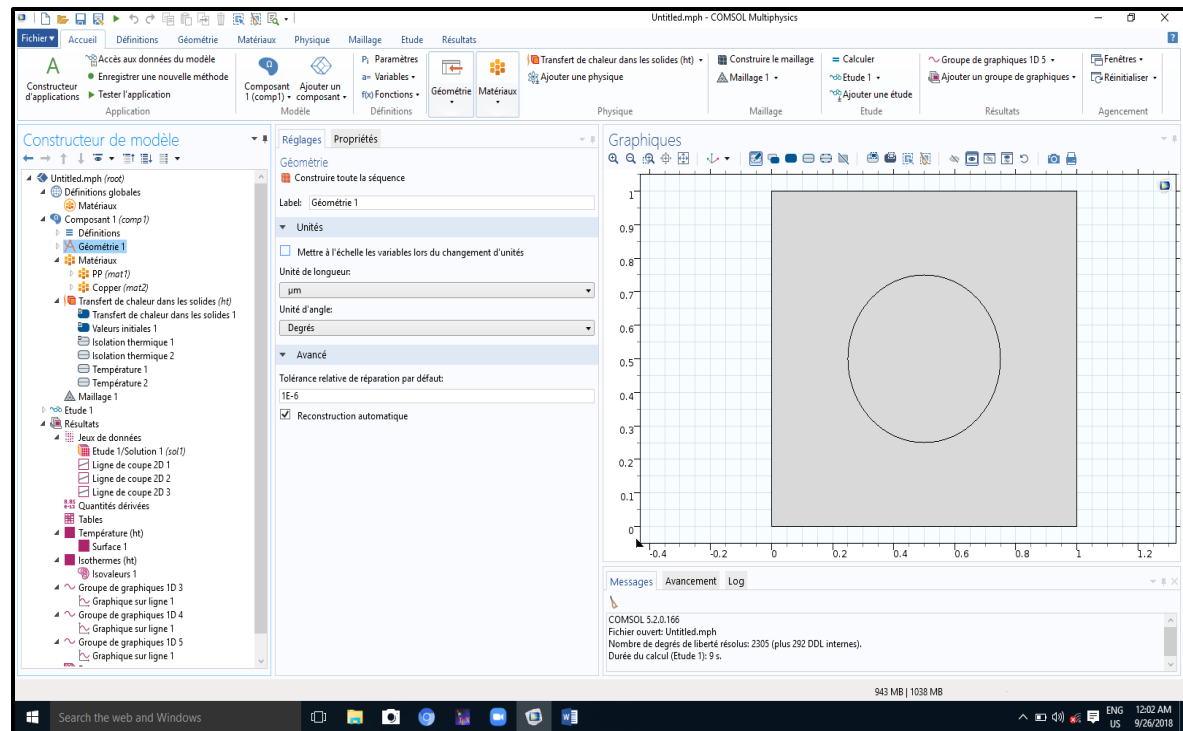


- ✓ Après avoir choisi le phénomène physique à étudier on choisit le régime d'étude (dans ce cas, nous choisissons le régime stationnaire)



- ✓ 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 μm .



- ✓ Après avoir choisi la géométrie, nous sélectionnons les matériaux adéquats constituant le composite dans le répertoire (Matériels) ou inséré-le dans le cas où il n'existe pas, puis la détermination de 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⁻¹.K⁻¹)	a (m²s⁻¹)	Cp (J. kg⁻¹.K⁻¹)	ρ (g cm⁻³)
Polypropylène (PP)	0,22	1,35 × 10 ⁻⁷	1700	0,9
Cuivre (Cu)	389	1,14 × 10 ⁻⁴	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 :

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 ($W.m^{-2}$)

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

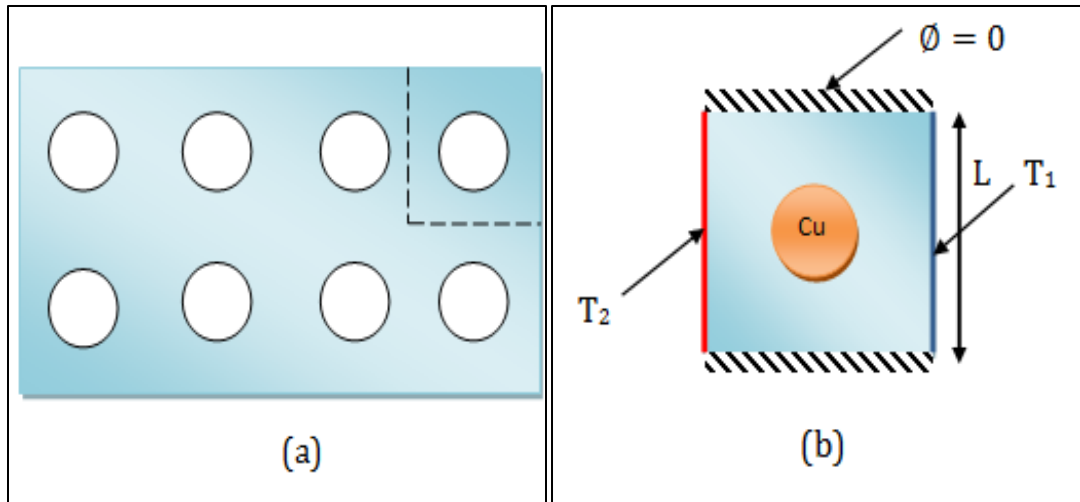


Figure (III.1) : Géométrie physique et conditions aux limites
(a) : Composite, (b) : Cellule élémentaire de composite PP/Cu

II.3. Le maillage de la géométrie

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

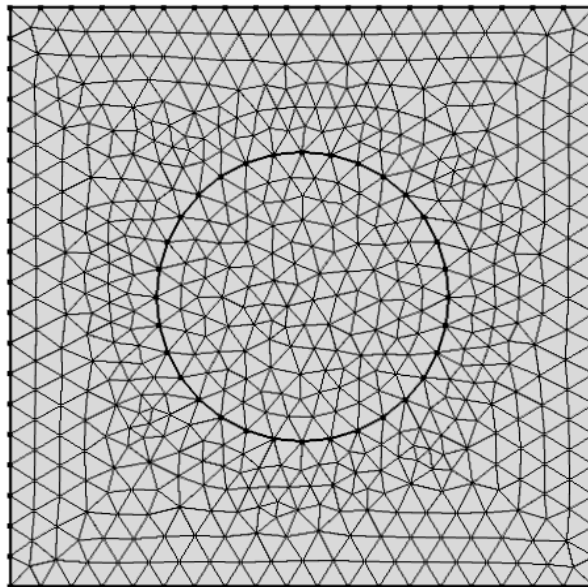


Figure (III.2) : Maillage de la géométrie

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.

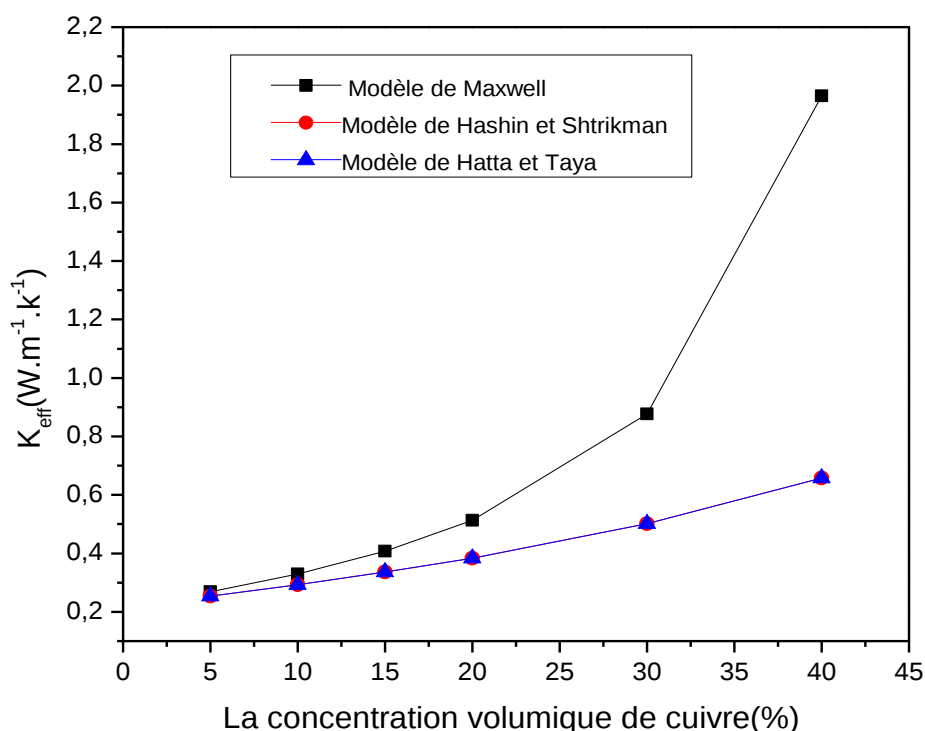


Figure (III.3) : La variation de conductivité thermique de composite PP/Cu en fonction concentration volumique de cuivre (pour trois modèles analytique)

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)

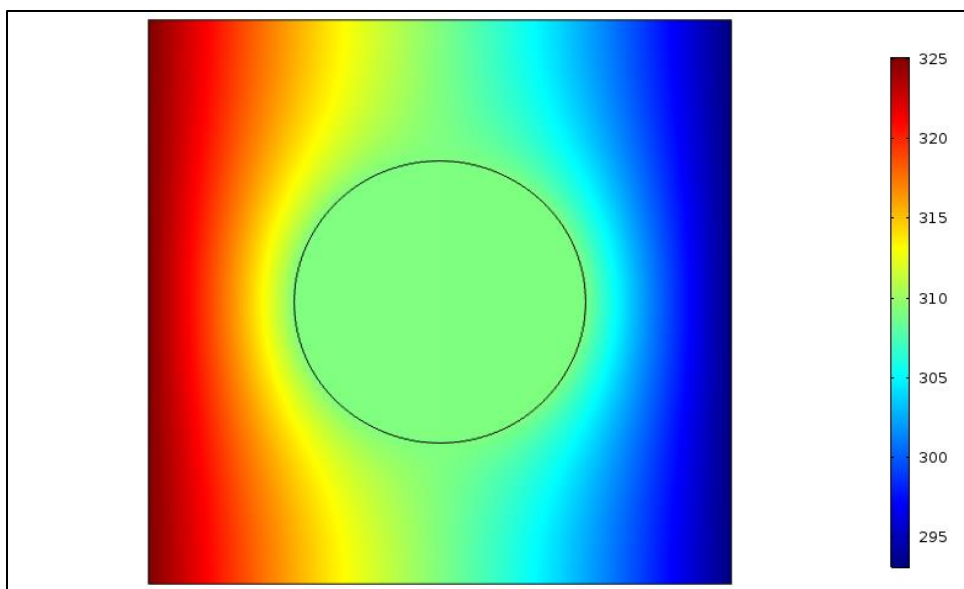
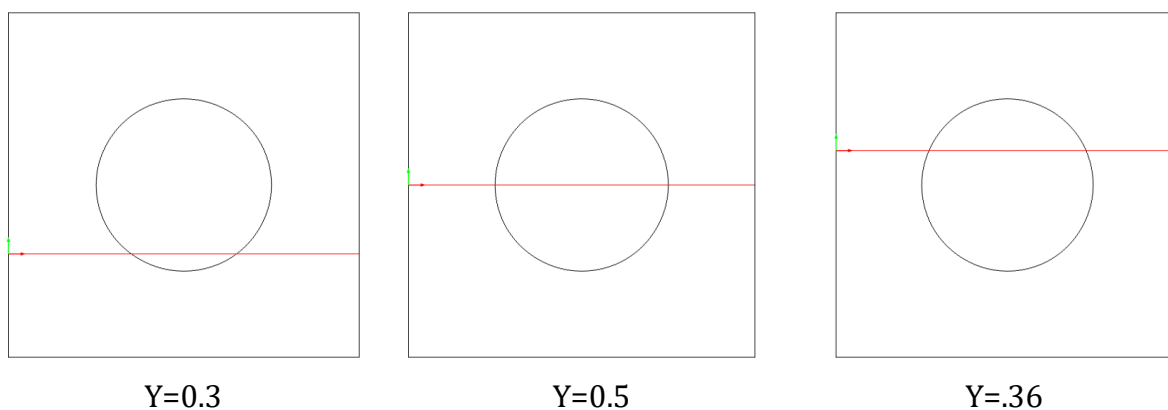


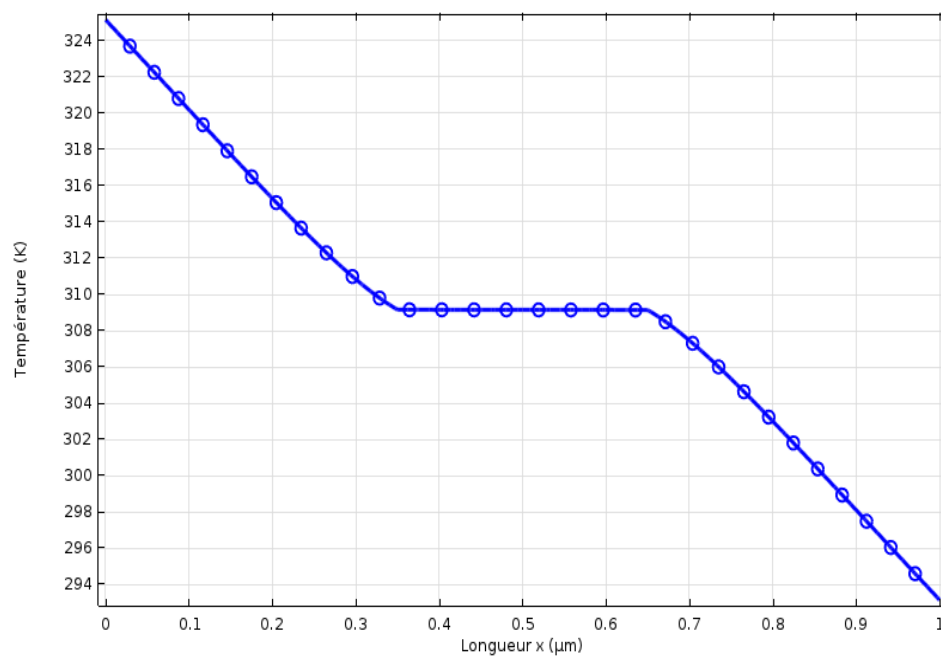
Figure (III.4) : la distribution de la température dans le composite PP/Cu

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

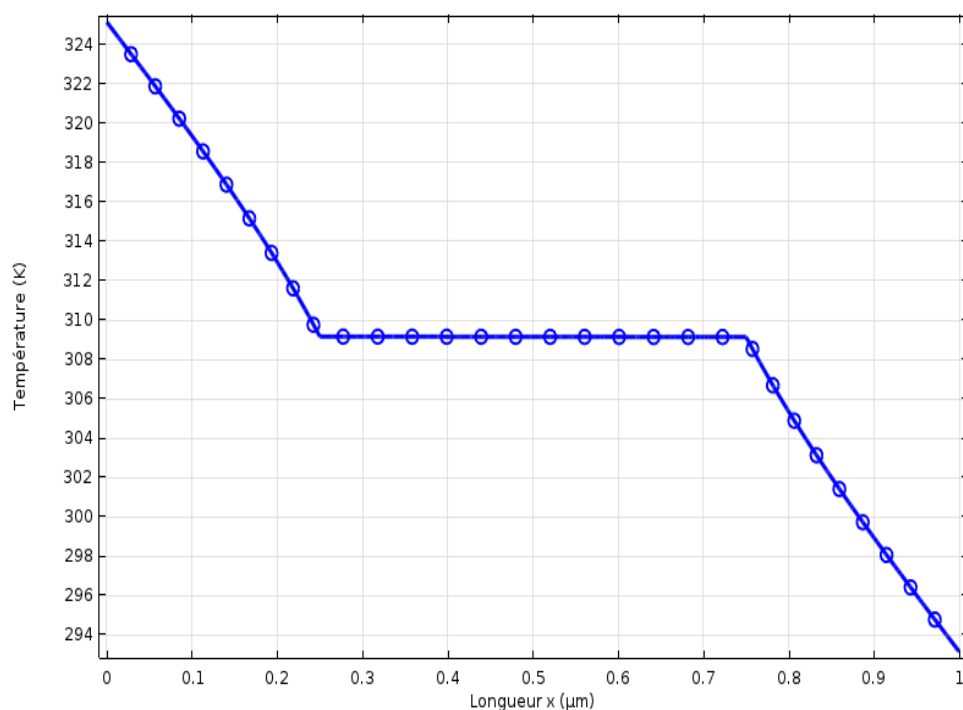


Figure (III.7) : la variation de la température en fonction de dimension de cellule L pour $Y=0.5$

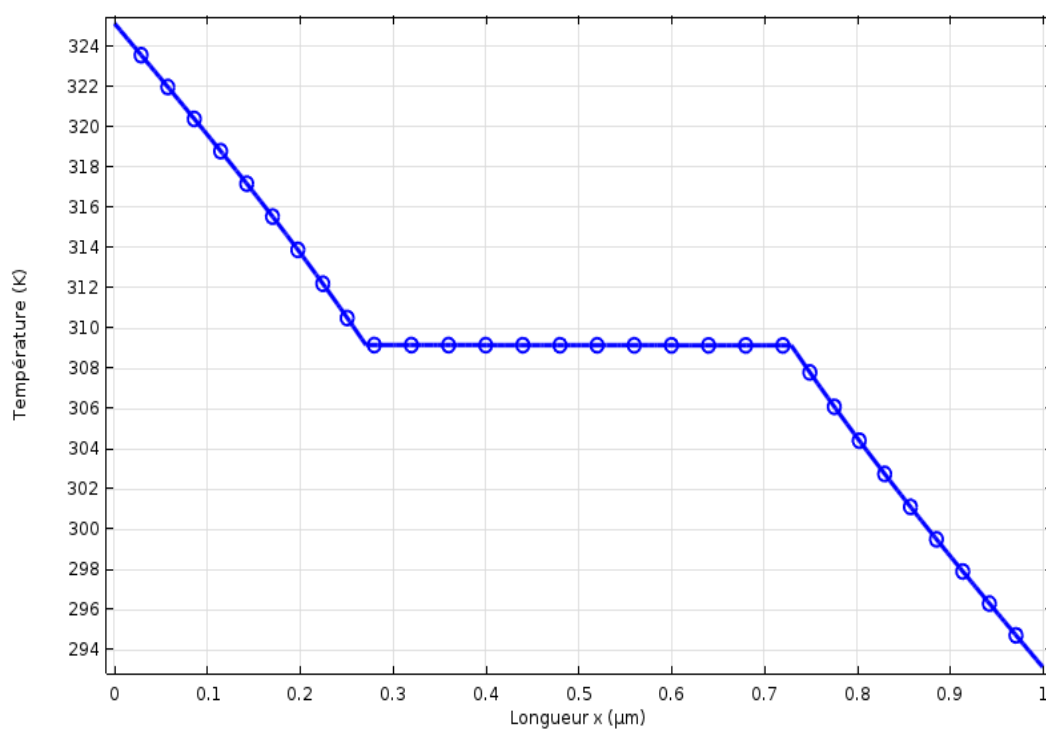


Figure (III.8) : la variation de la température en fonction de dimension de cellule L pour $Y=0.6$

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

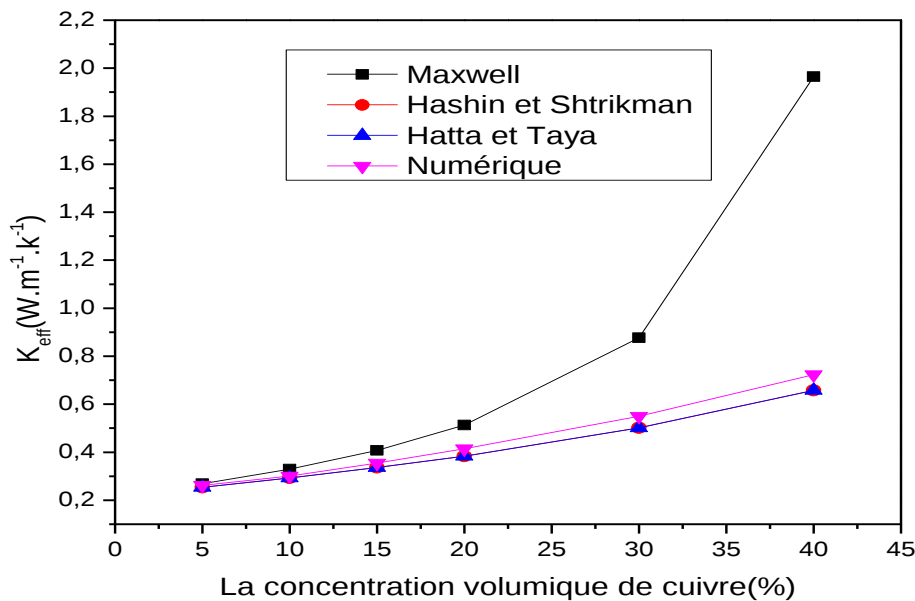


Figure (III.9) : Comparaison des résultats numériques et analytiques de la conductivité thermique effective de composite PP/Cu

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 numériques, alors que nous remarquons une grande divergence dans le modèle Maxwell par rapport aux valeurs numériques.

Donc, le modèle de Hashin et Shtrikman et modèle 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 Abbès, 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 Liabès de Sidi Bel Abbès, 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 Hacem, «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, 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] 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 pourune 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.

- [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 chargée 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 accord convenablement avec les résultats des modèles analytiques de Hatta-Taya et de Hashin-Shtrikman.

Mots-clés : Matériaux composites, Conductivité thermique effective, COMSOL Multiphysics, Éléments 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 بدين، 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.