

Etude des performances thermiques et dynamiques d'un écoulement de nano-fluides dans une conduite cylindrique

Study of the thermal and dynamic performance of a flow of nano-fluids in a cylindrical pipe

Mohamed-Rabie GUECHI^{1*}, Said ABOUDI²

^{1,2}ICB UMR 6303, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM
Département COMM, F-90010, Belfort, France.

*(mohamed.guechi@utbm.fr)

Résumé – Dans ce travail, on étudie numériquement le comportement convectif d'un écoulement de nano fluides dans une conduite cylindrique horizontale soumise à un flux thermique constant au niveau de sa paroi. On propose de comparer deux approches de l'écoulement, la première dite monophasique basée sur l'utilisation de propriétés effectives du nano-fluide, la seconde dite diphasique basée sur les deux modèles Mixture et Euler-Euler. Les équations de conservation sont résolues à l'aide du code Ansys-Fluent. Les influences de certains paramètres tels que la concentration de nanoparticules, le nombre de Reynolds et le nombre de Peclet sur l'amélioration du transfert de chaleur des nano-fluides ont été étudiées.

Mots clés : convection forcée, nano-fluides, monophasique, diphasique.

Abstract – In this work, we study numerically the convective behavior of a flow of nanofluids in a horizontal cylindrical pipe submitted to a constant wall thermal heat flux. We propose to compare two approaches to flow, the first called monophasic based on the use of effective properties of the nano-fluid, the second called diphasic based on the two models Mixture and Euler-Euler. The conservation equations are solved using the Ansys-Fluent code. The influences of certain parameters such as the concentration of nanoparticles, the Reynolds number and the Peclet number on the improvement of the heat transfer of nano-fluids have been studied.

Keywords: forced convection, nanofluids, monophasic, two phases.

Nomenclature

C_p	Capacité Calorifique, (kJ/kg.K)	<i>Symboles grecs</i>	
H	Enthalpie, (kJ/kg)	ϕ	Fraction volumique des particules
Pe	Nombre de Peclet	<i>Indices et exposants</i>	
Re	Nombre de Reynolds	nf	Nano-fluide
T_b	Température des nano-fluides	p	Particule
T_w	Température le long de la paroi	m	Mélange

1. Introduction

Les écoulements de fluides avec transfert de chaleur est un sujet qui continue à susciter beaucoup d'intérêt. Les fluides tels que l'eau, l'huile minérale et l'éthylène glycol jouent un rôle vital dans de nombreux processus industriels, y compris la production d'électricité, les processus chimiques, les processus de chauffage ou de refroidissement et la microélectronique.

Leur efficacité dépend de leurs propriétés physiques, telles que la conductivité thermique, la viscosité, la densité et la capacité thermique, leur faible conductivité thermique est souvent la principale limitation d'utilisation de ces fluides. Récemment, l'utilisation des nanoparticules comme additifs pour améliorer les performances thermiques des fluides caloporteurs a suscité beaucoup d'intérêt. Choi [1] a été probablement le premier à appeler les fluides mélangés avec des particules de dimensions nanométriques « nano-fluides ». Le terme « nano-fluide » fait référence à un mélange diphasique composé d'une phase continue, généralement un liquide, et d'une phase dispersée constituée de particules métalliques extrêmement fines de taille inférieure à 40 nm appelées « nanoparticules ». Les nano-fluides montrent une meilleure stabilité et des conductivités thermiques considérablement plus élevées, ainsi que des propriétés rhéologiques, et une faible perte de charge, par rapport aux particules en suspension de dimensions millimétriques ou micrométriques, qui présentent un risque élevé de sédimentation et peuvent provoquer une érosion ainsi qu'une perte de charge élevée. Plusieurs publications ont principalement porté sur les techniques de prédiction et de mesure afin d'évaluer la conductivité thermique du nano-fluide [2]. Récemment, Trisaksri et Wongwises [3] se sont basés sur les caractéristiques générales de transfert de chaleur des nano-fluides, en raison de l'importance du problème. Pour le transfert de chaleur dans les conduits, les forces de flottabilité ont un effet significatif sur les champs hydrodynamiques et thermiques, en particulier pour l'écoulement laminaire dans les conduits horizontaux. Ils génèrent des flux secondaires qui conduisent à des nombres de Nusselt et des coefficients de frottement très différents de ceux correspondant à la convection forcée. Dans le cas des fluides caloporteurs classiques, ces phénomènes ont été étudiés de manière approfondie [4]. Dans le cas des nano-fluides, quelques études numériques des écoulements convectifs en régime laminaire à l'intérieur d'un tube horizontal et incliné ont été étudiés considérant les nano-fluides comme des mélanges homogènes monophasés [5], tandis que d'autres utilisaient l'approche diphasique [6]. Le transfert de chaleur par convection avec des nano-fluides peut être modélisé en utilisant l'approche diphasique ou monophasique. La première approche offre la possibilité de comprendre les fonctions de la phase fluide et des particules solides dans le processus de transfert de chaleur. La seconde approche suppose que la phase fluide et les particules sont en équilibre thermique et se déplacent avec la même vitesse. Cette dernière méthode est plus simple et nécessite moins de temps de calcul. Ainsi, il a été utilisé dans plusieurs études théoriques du transfert de chaleur par convection avec des nano-fluides [7]. En raison de plusieurs facteurs tels que la gravité, le frottement entre les particules fluides et solides et les forces browniennes, les phénomènes de diffusion brownienne, de sédimentation et de dispersion peuvent coexister dans le flux principal d'un nano-fluide. Cela signifie que la vitesse de glissement entre le fluide et les particules peut ne pas être nulle [8], il semble donc que l'approche diphasique soit un meilleur modèle pour l'étude des nano-fluides. L'approche diphasique est basée sur une hypothèse de phases dans un milieu continu (continuum). Il fournit une description du champ de la dynamique de chaque phase (modèle eulérien-eulérien ou à deux fluides) ou, alternativement, les trajectoires lagrangiennes de particules individuelles couplées avec la description eulérienne du champ d'écoulement de fluide. L'une des principales approches dans la modélisation de l'écoulement diphasique en suspension est la théorie des mélanges, également appelée théorie des continuums en interaction [9]. La popularité de cette dernière approche dans les applications polyphasiques tient au fait qu'elle est simple à la fois en théorie et en méthode numérique implémentée dans le logiciel Ansys-Fluent. Les calculs requis sont relativement peu coûteux. De plus, il est simple d'introduire un modèle de turbulence dans le modèle de mélange, et surtout, il est raisonnablement précis pour une large gamme d'écoulements diphasiques. Quelques auteurs [10] ont comparé les deux approches : monophasiques, diphasiques et avec deux modèles diphasique (Mixture et Euler-Euler), en convection forcée, en utilisant l'oxyde d'aluminium-eau (Al_2O_3 – Eau) comme nano-fluide avec des propriétés indépendantes de la température.

Plus précisément, ils ont comparé les prédictions du nombre de Nusselt pour une concentration de 1% de Al_2O_3 avec plusieurs corrélations et un ensemble de valeurs expérimentales. Ils ont également examiné l'effet de la concentration volumique sur la température de la paroi. Ils ont conclu que le modèle Mixture est plus précis que les deux autres modèles. Pour le problème considéré, d'autres auteurs [11], ont rajouté le modèle diphasique VOF (Volume of Fluid), mais avec un écoulement convectif en régime laminaire, ils ont constaté que les trois modèles diphasiques donnent des prévisions du coefficient de transfert de chaleur par convection plus proches des données expérimentales que le modèle monophasique. Dans la présente étude, la convection forcée d'un nano-fluide composé d'eau et de différentes nanoparticules à la fois en métal pur (Al, Cu) et en oxyde métallique (Al_2O_3 , CuO), dans un tube cylindrique horizontal a été étudiée numériquement en 2D. Deux approches différentes ont été appliquées pour simuler les nano-fluides, approche monophasique et approche diphasique (modèle Mixture, Euler-Euler). Le modèle eulérien a été mis en œuvre pour la première fois pour étudier un tel champ d'écoulement. Les résultats obtenus sont comparés aux prédictions correspondantes du modèle monophasé. Ils sont présentés en forme de profil de distributions de températures, de coefficients de transfert de chaleur et de nombres de Nusselt et Peclet.

2. Description et modélisation du problème

2.1. Configuration géométrique

La figure 1 montre la configuration géométrique considérée. Il se compose d'un tube cylindrique de longueur L et d'un diamètre D . Le nano-fluide considéré est un mélange composé de fluide de base (Eau) et de particules (Al_2O_3 , CuO, Cu) respectivement, d'un diamètre de 50 nm. Le fluide entre avec une température $T_{in} = 300$ K, et un flux de chaleur constant appliqué sur la paroi extérieure $q_w = 1000$ W/m². La simulation a été réalisée sur la base de l'approche monophasique (homogènes) et de l'approche diphasique avec les deux modèles (Mixture, Euler-Euler).

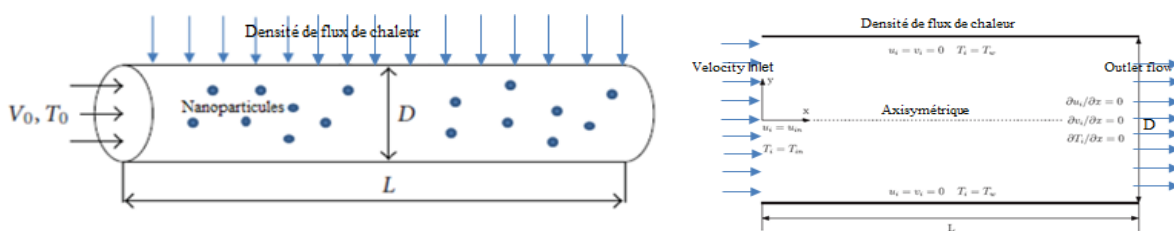


Fig.1 : Configurations géométriques du problème étudié.

2.2. Modélisation CFD

L'approche CFD utilise une technique numérique pour résoudre les équations de la dynamique de fluide pour des conditions aux limites et une géométrie d'écoulement données.

Dans ce modèle, le coefficient d'échange thermique et la distribution de température à travers un tube circulaire ont été simulés à l'aide du logiciel Ansys-Fluent, pour les deux champs d'écoulement (écoulements monophasiques et diphasiques), avec un écoulement à l'intérieur de tube supposé généralement en régime laminaire.

2.2.1. Modèle Monophasique

En supposant que les nanoparticules sont bien dispersées dans le fluide de base, les propriétés physiques efficaces des mélanges étudiés peuvent être évaluées en utilisant certaines formules classiques bien connues pour les fluides diphasiques.

Ce modèle traite le nano-fluide comme un fluide homogène aux propriétés efficaces et utilise les équations différentielles exprimant la conservation de la masse, la quantité de mouvement et l'énergie.

- Equation de la conservation de masse :

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} \cdot V_m) = 0 \quad (1)$$

- Equation de la quantité de mouvement :

$$\rho_{nf} \cdot V_m \cdot \nabla V_m = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{nf} \nabla V_m) \quad (2)$$

- Equation d'énergie :

$$\rho_{nf} \nabla \cdot (V_m H) = -\nabla \cdot (k_{nf} \cdot \nabla T) \quad (3)$$

Dans cette étude, les définitions appropriées des relations de propriétés thermo physiques des nano-fluides ont une grande importance. Les formules suivantes sont utilisées pour calculer les propriétés thermiques et physiques du nano-fluide.

- La densité ρ_{nf} et la chaleur spécifique C_{nf} du nano-fluide.

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (4)$$

$$C_{nf} = (1 - \varphi)C_f + \varphi C_p \quad (5)$$

- La viscosité du nano-fluide est estimée à :

$$\mu_{nf} = \mu_f \cdot \left(\frac{1}{(1+\varphi)^{0.25}} \right) \quad (6)$$

- La conductivité thermique du nano-fluide a été obtenue par Hamilton et Crosser pour des particules sphériques avec $n=3$.

$$k_{nf} = k_f \cdot \left(\frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\varphi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \varphi(k_f - k_p)} \right) \quad (7)$$

2.2.2. Modèle diphasique

Il existe deux approches générales pour modéliser les écoulements diphasiques. Pour les fractions à faible volume, l'approche la plus appropriée est le Lagrangien-Eulérien qui analyse le fluide de base par l'hypothèse eulérienne et la phase des particules (solide) par l'hypothèse lagrangienne. Pour les fractions de volume solide plus élevées, l'approche appropriée est Eulérien-Eulérien. En raison de la très petite taille des particules pour les nano-fluides, le nombre de particules dans le domaine, même pour une très petite fraction de volume, est extrêmement important. Les plus populaires sont le VOF (volume de fluide), le Mixture et l'Euler-Euler [11,12].

- **Modèle Mixture**

Le modèle de mélange (Mixture) résout les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie pour le mélange ainsi qu'une équation de fraction volumique pour les

phases secondaires. Il utilise ensuite une corrélation pour calculer la vitesse relative entre les phases. Les équations de conservation s'écrivent :

- Equation de la masse :

$$\nabla \cdot (\rho_m \cdot V_m) = 0 \quad (8)$$

- Equation de la quantité de mouvement :

$$\rho_m \cdot V_m \cdot \nabla V_m = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_m \nabla V_m) + \rho_m g + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k}) \quad (9)$$

- Equation de l'énergie :

$$\nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k V_k H_k) = -\nabla \cdot (k_m \cdot \nabla T) \quad (10)$$

- **Modèle Eulérien**

Dans le modèle eulérien, il existe différents types de couplage entre les phases. La pression est partagée par toutes les phases, tandis que les équations distinctes de la continuité, de la quantité de mouvement et d'énergie sont utilisées pour différentes phases, y compris les phases primaire et secondaire. Le volume de chaque phase est calculé en intégrant sa fraction volumique dans tout le domaine, tandis que la somme de toutes les fractions volumiques des phases est égale à l'unité [11].

- Equation de conservation de la masse :

$$\nabla \cdot (\varphi_q \rho_q \cdot V_q) = 0 \quad (11)$$

Ou, $\sum_{q=1}^n \varphi_q = 1$ et toutes les propriétés sont calculées avec $N = \sum_{q=1}^n \varphi_q N_q$ (n : nbre de phases)

- Equation de quantité de mouvement (qth phase) :

$$\nabla \cdot (\varphi_q \rho_q V \cdot V) = -\varphi_q \nabla P + \varphi_q \nabla \cdot (\mu_q \nabla V) + \varphi_q \rho_q g + \sum_{p=1}^n R_{pq} + F_{lift,q} \quad (12)$$

- Equation de conservation de l'énergie (qth phase) :

$$\nabla \cdot (\varphi_q \rho_q V_q H_q) = -\nabla \cdot (k_q \nabla \cdot T_q) - \sum_{p=1}^n h(V_p - V_q) \quad (13)$$

2.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites utilisées pour résoudre les équations de base du fluide pour les différentes approches sont :

- Entrée de tube (z = 0) : Velocity inlet ($V_r = V_\theta = 0$; $V_z = V_{inlet}$; $T = T_{inlet}$).
- Sortie de tube (z = L) : Outlet flow (le champ d'écoulement entièrement développé).
- Interface solide-liquide (r = D/2) : $-k_{eff} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) = q_{wall}$; $V_r = V_\theta = V_z = 0$.
- Symétrie : axis.

3. Résultats & Discussions

Les résultats ont été obtenus pour une concentration des nanoparticules φ de l'ordre de 0 %, 1%, 4%, 6%. L'eau a été prise comme fluide de travail et Cu, CuO et Al₂O₃, comme nanoparticules, avec différents nombres de Reynolds et de Peclet, (le nombre de Peclet Pe décrit

l'effet de la dispersion thermique causée par la micro-convection et la micro-diffusion des nanoparticules suspendues).

Les valeurs du coefficient d'échange de la paroi et la variation de nombre de Nusselt dans le cas d'un écoulement monophasique sont présentées sur la fig 2, et la fig.3, pour $\phi = 4\%$ avec plusieurs valeurs du nombre de Peclet. Les profils du coefficient d'échange sont croissant en raison de la quantité importante de la chaleur échangé avec le nano-fluide, avec l'augmentation du nombre de Peclet d'une part et de la nature des nanoparticules utilisées d'autre part (métaux pur ou à base d'oxyde), le nombre de Nusselt et l'échauffement du fluide le long du tube sont presque dépendents de nombre de Reynolds et de la concentration des nanoparticules (fig 3), on constate que cette augmentation est presque linéaire.

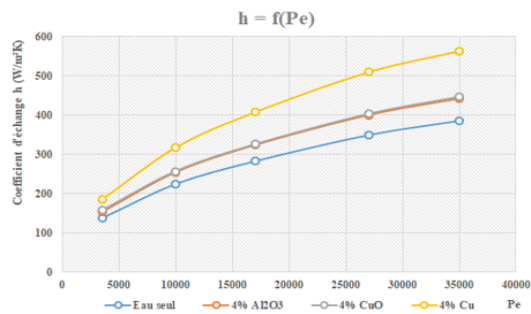


Figure 2 : Evaluation du coefficient d'échange en fonction de nombre de Peclet pour différentes nanoparticules ($\phi=0\%, 4\%$)

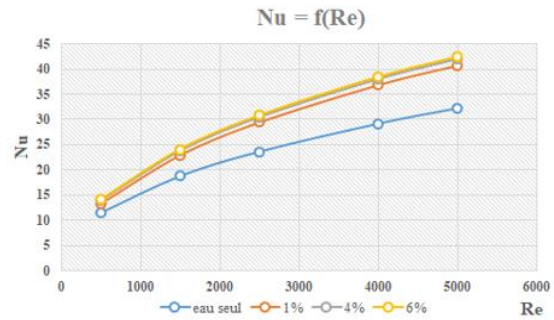


Figure 3 : Nbre de Nusselt en fonction de nombre de Peclet pour différentes concentrations volumiques ($\phi=0\%, 1\%, 4\%, 6\%$)

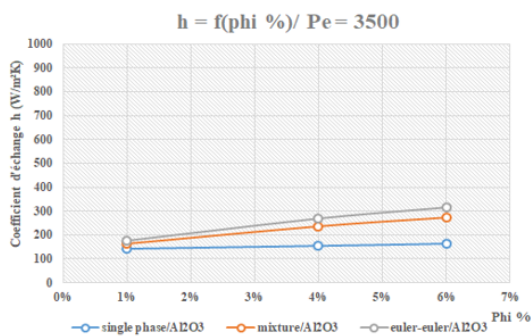


Figure 4 : Comparaison des valeurs calculées du coefficient de transfert de chaleur avec différentes approches multiphasiques (Al_2O_3 , $\phi=1\%, 4\%, 6\%$, $Pe=3500$)

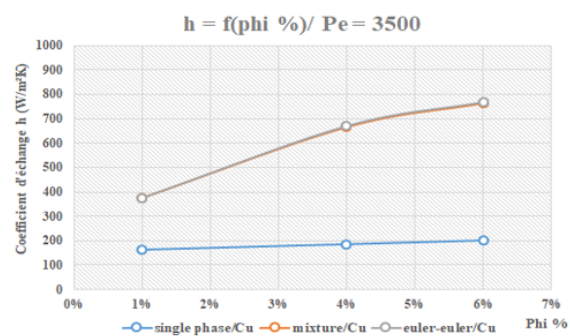


Figure 5 : Comparaison des valeurs calculées du coefficient de transfert de chaleur par convection avec différentes approches multiphasiques (Cu , $\phi=1\%, 4\%, 6\%$, $Pe=3500$)

On voit clairement que l'augmentation de la fraction volumique favorise le transfert thermique entre le fluide et la paroi chaude. Ceci est dû à l'amélioration de la conductivité thermique du nano-fluide, lorsque la fraction volumique des nanoparticules augmente. L'amélioration des performances du nano-fluide résulte non seulement de sa conductivité thermique élevée, mais également de l'effet de mouvement aléatoire et de la dispersion des nanoparticules. Le nombre de Peclet Pe est un paramètre qui peut décrire de tels effets. Les figures 4 et 5, montrent une comparaison de l'évolution de coefficient d'échange thermique obtenue avec les trois modèles étudiés pour un nombre de Peclet constant $Pe = 3500$, avec une fraction volumique de nanoparticules allant de 1%, 4%, 6%. La figure 4 est spécifiquement dédiée à l'oxyde métallique Al_2O_3 tandis que la figure 5 est dédiée au cas du Cu . D'après les résultats sur les deux figures, on constate une grande différence, si on utilise un matériau pur ou un oxyde métallique comme nanoparticules sur les valeurs du coefficient d'échange. Si la concentration est plus faible, les différences entre le modèle monophasique et le modèle diphasique ne sont pas sensibles (supérieur à 10% pour Al_2O_3). Avec l'augmentation de ϕ , les résultats obtenus avec les deux modèles diphasiques acquièrent presque les mêmes estimations

(inférieurs à 10% pour le Cu) tandis que la prédiction pour le modèle monophasique reste sous-estimée, ces résultats sont en accord avec des résultats issus de la littérature [11], [12]. En comparant, l'effet de la variation du nombre de Peclet et des différents modèles multiphasiques utilisés, sur l'évolution de la valeur de coefficient d'échange en utilisant un matériau pur (Cu) et deux oxydes métalliques (Al_2O_3 , CuO) comme nanoparticules, avec une concentration volumique de l'ordre de 1% et 4%, on constate que les valeurs du coefficient d'échange thermique augmente progressivement comme le montre les figures 6 et 7, on peut dire que c'est presque linéaire, mais le valeur la plus élevée d'après les résultats est donnée pour des nanoparticules constitués par un matériau pur [13].

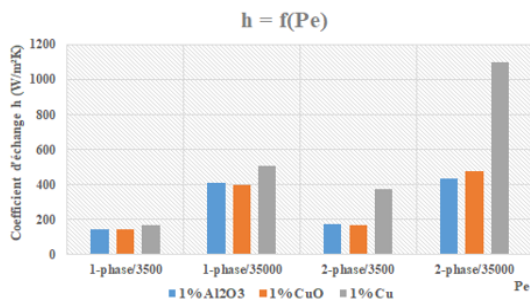


Figure 6 : Comparaison des valeurs calculées du coefficient de transfert de chaleur par convection avec différentes approches multiphasiques (Al_2O_3 , CuO, Cu, $\phi=1\%$, $Pe=3500 ; 35000$)

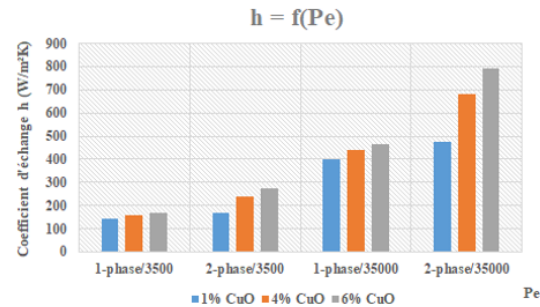


Figure 7 : Comparaison des valeurs calculées du coefficient de transfert de chaleur par convection avec différentes approches multiphasiques (CuO, $\phi=1\%, 4\%, 6\%$, $Pe=3500 ; 35000$)

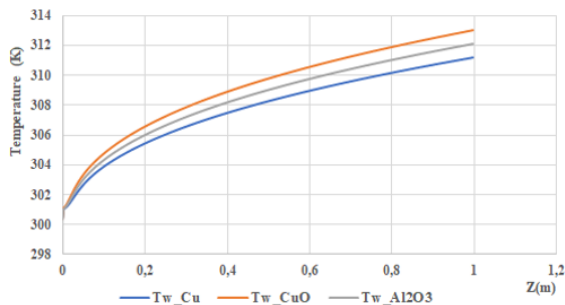


Figure 8 : Profils de la température des nano-fluides le long de la paroi pour une concentration volumique ($\phi=4\%$)

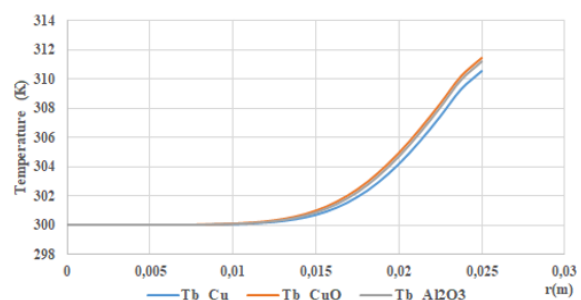


Figure 9 : Profils de la température des nano-fluides à la sortie du tube pour une concentration volumique ($\phi=4\%$)

On peut observer que la température T_w le long de la paroi varie en fonction de la nature des nanoparticules fig.8, Il est intéressant de noter que la température du fluide le long de la paroi du tube augmente en fonction de la nature des nanoparticules utilisées (Cu, CuO, Al_2O_3) respectivement et semble être plus importante vers la sortie, indiquant qu'un taux de transfert de chaleur plus élevé peut alors être atteint. De la même façon, pour la position radiale, fig.9, la température des nano fluides varie. Ces résultats ont évidemment indiqué les effets bénéfiques dus aux nanoparticules, effets qui peuvent s'expliquer par le fait qu'avec la présence de telles particules, les propriétés thermiques du mélange résultant sont, en fait, devenues considérablement plus importantes. Pour une valeur spécifique de $\phi = 4\%$, il a été constaté que les valeurs de la conductivité thermique k et du produit ρC_p ont augmenté respectivement de 12% et 27% par rapport à celles correspondant au cas $\phi = 0\%$. Le nano fluide offre, comme on peut s'y attendre, une capacité thermique supérieure à celle du fluide de base conventionnel (eau). On peut également noter qu'avec une conductivité thermique plus élevée du mélange, le transfert de chaleur de la paroi au fluide serait, par conséquent, plus important.

4. Conclusion

Dans le présent travail, les modèles de la CFD (Computational Fluid Dynamics) ont été utilisés pour prédire le coefficient de transfert de chaleur convectif de différents nano-fluides dans un tube circulaire soumis à un flux de chaleur. Les équations de la continuité, de la quantité de mouvement et de l'énergie ont été résolues numériquement à l'aide du logiciel Ansys-Fluent. Le modèle monophasique et le modèle diphasique ont été utilisés pour prédire la distribution de la température et le calcul du coefficient de transfert de chaleur. Il a été démontré dans notre cas et dans la littérature [12], que les modèles diphasiques (Mixture, Eulérien) sont plus précis que le modèle monophasique. Les effets de certains paramètres importants tels que le nombre de Peclet, la fraction volumique des particules et le type de nano-fluide sur le taux de transfert de chaleur ont été étudiés. Le coefficient de transfert de chaleur des nano-fluides augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et du nombre de Peclet.

Références :

- [1] Choi US. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles. ASME FED 1995;231: 99-103.
- [2] Y. Mori, K. Futagami, S. Tokuda, M. Nakamura, forced convective heat transfer in uniformly heated horizontal tubes 1st report-experimental study on the effect of buoyancy, *Int. J. Heat Mass Transfer* 9 (1966) 453-463.
- [3] Trisaksri V, Wongwises S. Critical Review of Heat Transfer Characteristics of the Nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2005.
- [4] D.P. Siegwarth, T.J. Hanratty, Computational and experimental study of the effect of secondary flow on the temperature field and primary flow in a heated horizontal tube, *Int. J. Heat Mass Transfer* 13 (1970) 27-42.
- [5] M. Akbari, A. Behzadmehr, Developing mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube with uniform heat flux, *Int. J. Numer. Meth. Heat Fluid Flow* 17 (2007) 566-586.
- [6] A. Behzadmehr, M. Saffar-Avval, N. Galanis, Prediction of turbulent forced convection of a nano-fluid in a tube with uniform heat flux using a two-phase approach, *Int. J. Heat Fluid Flow* 28, (2007) 211-219.
- [7] S.E. Maige, C.T. Nguyen, N. Galanis, G. Roy, Heat transfer behaviors of nanofluids in a uniformly heated tube *Super Lattices Microstruct.*, 35 (3-6) (2004), 543-557.
- [8] Y.M. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 21 (2000) 58-64.
- [9] C.T. Crowe, T.R. Troutt, J.N. Chung, Numerical models for two-phase turbulent flows *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 28 (1996)11-43.
- [10] R. Lotfi, Y. Saboohi, A.M. Rashidi, Numerical study of forced convective heat transfer of nanofluids: comparison of different approaches, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 37(2010)74-78.
- [11] M. Akbari, N. Galanis, A. Behzadmehr, Comparative analysis of single and two-phase models for CFD studies of nanofluid heat transfer, *International Journal of Thermal Sciences* 50 (2011) 1343-1354.
- [12] M.K. Moraveji, R.M. Ardehali, CFD modeling (comparing single and two-phase approaches) on thermal performance of Al₂O₃/water nanofluid in mini-channel heat sink. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 44 (2013), 157-164.
- [13] Fard, M.H., Esfahany, M.N., Talaie, M.R., Numerical study of convective heat transfer of nanofluids in a circular tube two-phase model versus single-phase model. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 37 (2010) 91-97.