

## Étude numérique du transfert de chaleur des nanofluides dans un canal plan application au panneau solaire thermique

Mohamed Chaour<sup>1,2\*</sup>, Sofiane Boukroune<sup>1,2</sup>, Billel Hamadi<sup>1,2</sup>, Toufik Achour<sup>1,2</sup>, Djamel Boucherma<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Mechanics Research Centre, P.O. Box 73B, Constantine 25000, Algeria.

<sup>2</sup> Research Center in Industrial Technologies CRTI, P.O. Box 64, Cheraga, 16014 Algiers, Algeria.

\*Adresse E-mail de l'auteur principal: [chaour.m@crm-constantine.dz](mailto:chaour.m@crm-constantine.dz)

DOI: <https://doi.org/10.58452/jpcr.v2i1.153>

### Article history

Received March 12, 2023

Accepted for publication May 02, 2023

### Résumé

Ce travail présente une étude numérique bidimensionnelle des phénomènes de la convection mixte laminaire des nanofluides dans un canal plan horizontale remplie d'eau et de différents nanoparticules (Cu-eau, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau) pour une fraction volumique des nanoparticules ( $\phi$ ) comprise entre 0 et 0,2. La paroi inférieure dissipe la chaleur à une température chaude constante et la paroi supérieure considérée adiabatique. La viscosité dynamique et la conductivité thermique effective du nanofluide sont approximées respectivement par le modèle de Brinkman et de Maxwell-Garnetts. Les équations du phénomène considéré sont établies et discrétisées par la méthode des différences finies. Le système d'équations ainsi obtenu est résolu par la méthode du balayage ligne par ligne basée sur l'algorithme de Thomas (TDMA) en exécutant un programme de calcul élaboré en langage FORTRAN. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules ( $\phi$ ) favorise le taux du transfert de chaleur et donne des effets importants sur la structure de l'écoulement et sur le nombre de Nusselt moyen, et le nanofluide Cu-eau est un bon transporteur de chaleur par rapport au nanofluide Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau.

**Mots Clés :** Convection mixte laminaire, nanofluide, canal plan, nanoparticule, méthode des différences finies.

## 1. Introduction

Les liquides classiques à faible conductivité thermique tels que l'eau, l'huile ou l'éthylène glycol sont fréquemment rencontrés dans les applications industrielles telles que les centrales solaires à concentration, contrairement aux solides. Afin d'améliorer la conductivité thermique, des nanoparticules solides sont ajoutées au liquide car leur conductivité thermique effective est nettement supérieure à la conductivité thermique du fluide dans lequel les particules sont dispersées. L'utilisation de nanoparticules métalliques à haute conductivité thermique augmentera remarquablement la conductivité thermique effective de ces types de fluide. Ces dernières années, les nanofluides ont attiré davantage d'attention dans diverses applications industrielles. Par exemple, Beck et al. [1] ont mesuré dans leurs travaux la conductivité thermique de nanoparticules d'alumine dispersées dans de l'eau, de l'éthylène glycol et des mélanges éthylène glycol + eau. Une autre étude de Xu et al. [2] présente une étude théorique et numérique sur l'écoulement d'un nanofluide dans un canal vertical. L'objectif de cette étude est de comprendre les effets de la convection mixte, de la taille des particules et du nombre de Grashof sur les caractéristiques de l'écoulement. Les résultats montrent que la convection mixte a un impact significatif sur les champs de température et de vitesse, et que l'ajout de nanoparticules améliore les performances de refroidissement. Cette étude fournit des informations utiles pour le

développement de systèmes de refroidissement à haute performance utilisant des nanofluides. Cimpean et Pop [3] a étudié la simulation numérique de l'écoulement de convection mixte entièrement développé d'un nanofluide à travers un canal incliné rempli de trois types de nanofluides (Cu-eau,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau ou  $\text{TiO}_2$ -eau). Les parois du canal sont chauffées par un flux thermique uniforme et un débit constant est considéré à travers le canal. Les équations de Navier-Stokes sont résolues à l'aide d'une méthode de différences finies, tandis que la méthode de contrôle de volume fini est utilisée pour calculer les transferts de chaleur et de masse. L'effet des paramètres de convection mixte, de l'angle d'inclinaison du canal, du nombre de Rayleigh et du taux de volume de la phase solide sur les caractéristiques d'écoulement, de transfert de chaleur et de transfert de masse est étudié en détail. Les résultats montrent que le transfert de chaleur et de masse est amélioré avec l'augmentation du taux de volume de la phase solide et que l'effet de la convection mixte devient plus important avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison du canal.

La qualité des nanofluides dépend non seulement du type de nanoparticules, mais aussi de leur forme. Ceci a été étudié par Aaiza et al. [4] qui ont utilisé quatre formes différentes de nanoparticules avec une fraction volumique égale dans des fluides de base conventionnels. L'effet de différentes formes de nanoparticules telles que des plaquettes, des lames, des cylindres et des briques de taille égale sur la vitesse et la température des nanofluides a été déterminé avec différents résultats. Une autre étude de Kim et al. [5] a examiné l'impact de la forme des nanoparticules en forme de brique, de plaquette et de lame sur la stabilité et la conductivité thermique des nanofluides contenant des particules d'alumine bohémite dans l'eau. Les résultats ont montré que les nanoparticules en forme de brique ont la meilleure stabilité de suspension et montrent la plus grande amélioration de la conductivité thermique par rapport aux nanoparticules en forme lame.

Les effets des champs magnétiques sur les nanofluides ont été largement utilisés pour améliorer les transferts de chaleur et de masse dans les fluides. Par exemple, Das et al. [6] Cet article présente une étude numérique de l'écoulement magnétohydrodynamique à convection mixte dans un canal vertical rempli de nanofluides. Les équations de Navier-Stokes, de la chaleur et de la concentration sont résolues numériquement à l'aide de la méthode des volumes finis. Les effets de la force de Lorentz, de la convection mixte, de la concentration de nanoparticules et du nombre de Hartmann sur le comportement de l'écoulement et le transfert de chaleur sont étudiés en détail. Les résultats montrent que l'application d'un champ magnétique peut améliorer les performances de refroidissement en réduisant la couche limite thermique et en augmentant la turbulence. Les nanoparticules augmentent la conductivité thermique du fluide et améliorent ainsi les performances de refroidissement. Les résultats de cette étude fournissent des informations importantes pour la conception et le développement d'échangeurs de chaleur à haute performance utilisant des nanofluides sous l'influence de champs magnétiques. Autre étude de Rashidi et al. [7] présente une étude numérique sur le transfert de chaleur par convection mixte de nanofluides dans un canal avec des parois sinusoïdales, sous l'influence d'un champ magnétique externe. Les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie ont été résolues numériquement en utilisant la méthode des volumes finis. Les résultats montrent que l'application d'un champ magnétique externe avec la présence de nanoparticules dans le fluide modifie considérablement les caractéristiques de l'écoulement et les transferts de chaleur dans le canal et conduit également à une amélioration significative des performances de transfert de chaleur. Les parois sinusoïdales du canal ont un effet important sur les caractéristiques de l'écoulement et les transferts de chaleur, en particulier lorsque la force de poussée d'inertie est dominante.

Au cours des dernières années, le terme "fluide hybride" est apparu et est devenu une source d'intérêt pour de nombreux chercheurs. Il fait référence à l'utilisation de nanoparticules hybrides en différentes proportions au sein du fluide de base pour améliorer et développer les propriétés de transfert de chaleur thermique, en particulier la conductivité thermique. Iqbal et al. [8] ont étudié les performances d'un nanofluide hybride composé de Cu-CuO/eau qui s'écoule dans un canal vertical et est soumis à un courant de Hall et à un rayonnement thermique. Zainal et al. [9] font partie des chercheurs intéressés par ce type de fluide mixte, où ils ont étudié l'écoulement de convection mixte le long d'une plaque verticale avec des conditions aux limites convectives. Elsaid et al. [10] ont présenté une étude sur l'écoulement de convection mixte d'un hybride-nanofluide ( $\text{H}_2\text{O}$ -Cu/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dans un canal vertical, soumis à un flux radiatif thermique. Les conditions aux limites convectives sont également étudiées pour différents paramètres tels que le nombre de Rayleigh, le nombre de Reynolds et la fraction de volume de nanoparticules. Les résultats de l'étude indiquent que les fluides hybrides et le rayonnement thermique ont une influence claire sur le comportement de la vitesse et de la

température

Le présent travail considère l'écoulement de convection mixte entièrement développé dans un canal horizontal rempli de nanofluides, qui est entraîné par de différentes nanoparticules et de fraction volumique des nanoparticules ( $\phi$ ) et la paroi inférieure chauffée simultanément par une source de chaleur à température constante. L'objectif de la présente étude est de paramétrer l'effet de différentes nanoparticules et de la fraction volumique des nanoparticules pour sélectionner la meilleure nanoparticule favorisant le taux de transfert de chaleur et la structure de l'écoulement.

## 2. Méthode

### 2.1. Configuration géométrique

Le modèle physique considéré est schématisé sur la figure 1. On considère un canal rectangulaire plan et horizontal dans lequel s'écoule un nanofluide en écoulement laminaire. La paroi supérieure du canal est soumise adiabatique et la paroi inférieure est maintenue à une température chaude  $T_C$ . L'écoulement est supposé ascendant entrant à une température  $T_0$  ( $T_C > T_0$ ) et une vitesse uniforme  $U_0$ . Le fluide de base utilisé est newtonien, l'écoulement est incompressible, bidimensionnel. La dissipation visqueuse est négligeable, les propriétés thermo physiques des nanofluides sont constantes, sauf pour la variation de la masse volumique qui est estimée par l'approximation de Boussinesq.

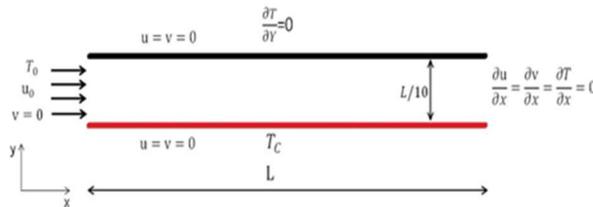


Figure 1. La géométrie

conditions aux limites.

du problème étudié et les

### 2.2. Modèle mathématique

On suppose que l'écoulement et le transfert de chaleur sont bidimensionnels, que les propriétés du fluide sont constantes et l'approximation de Boussinesq est valide. Les équations adimensionnelles transitoires en termes de température  $T$ , de vorticité  $\omega$  et de fonction de courant  $\psi$  sont données par les expressions suivantes:

Equation d'énergie :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right] \quad (1)$$

Equation de la vorticité :

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \omega}{\partial X} + V \frac{\partial \omega}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial Y^2} \right) - \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} \text{Ri} \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (2)$$

Equation de la fonction de courant :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} = \omega \quad (3)$$

Champs de vitesse :

$$U = \frac{\partial \psi}{\partial Y} \quad (4)$$

$$V = - \frac{\partial \psi}{\partial X} \quad (5)$$

Coefficient de transfert thermique

$$Nu = - \left( \frac{k_{nf}}{k_f} \right) \left( \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)_{Y=0} \quad (6)$$

Les variables adimensionnelle sont définies par:

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{H}, \tau = t \frac{U_0}{L}, U = \frac{u}{U_0}, V = \frac{v}{U_0}, \theta = \frac{(T-T_0)}{(T_C-T_0)} \quad (7)$$

Les paramètres figurant dans ces équations sont les nombres de Reynolds  $Re$ , de Prandtl  $Pr$ , de Grashof  $Gr$  et de Richardson  $Ri$  et sont définis par les relations suivantes :

$$Re = U_0 \cdot \frac{L}{\nu_f}; Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}; Gr = \frac{g \cdot \beta_f \cdot \Delta T L^3}{\nu_f^2}; Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (8)$$

Dans notre travail on utilise le modèle à une seule phase qui considère le nanofluide comme milieu continu. En supposant que les nanoparticules sont bien dispersées dans le fluide de base, on peut donc calculer les propriétés du nanofluide par les formules suivantes:

La masse volumique :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (9)$$

La chaleur spécifique :

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_s \quad (10)$$

Le coefficient de dilatation thermique :

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_s \quad (11)$$

La diffusivité thermique :

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (12)$$

La viscosité du nanofluide est donnée par Brinkman [11] :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (13)$$

La conductivité thermique effective du nanofluide est déterminée par le modèle de Maxwell-Garnetts [12] :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)} \quad (14)$$

Les propriétés thermophysiques du fluide pur (eau) et celles des nanoparticules (Cu et  $Al_2O_3$ ) sont données dans le Tableau 1 à la température  $T = 25^\circ C$ .

	Eau	Cu	$Al_2O_3$
<b>Cp (J/kg.k)</b>	4179	385	765
<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	997.1	8933	3970
<b>k (W/m.k)</b>	0.613	400	40
<b><math>\alpha</math> (m<sup>2</sup>/s)x10<sup>-7</sup></b>	1.47	1163.1	131.7
<b><math>\beta</math> (k<sup>-1</sup>)x10<sup>-5</sup></b>	21	1.67	0.85

Tableau 1. Propriétés thermo physiques du fluide pur et des nanoparticules

### 2.3. Formulation numérique

Les équations (1-5) ont été discrétisées à l'aide de la méthode des différences finies. Un schéma centré est utilisé pour les dérivations spatiales des termes diffusifs. Pour la discrétisation des termes convectifs, le schéma upwind a été utilisé. L'intégration des équations (1) et (2) par rapport au temps est assurée par la méthode de Crank-Nicholson et la méthode TDMA a été utilisée pour leur résolution. L'équation discrétisée de la fonction de courant (3) est résolue point par point par l'algorithme de Gauss.

Le code numérique établi en langage Fortran a été vérifié et validé en comparant nos résultats obtenus du cas de la ventilation par convection forcée d'une enceinte carrée dont la paroi verticale gauche soumise à une température constante tandis que les parois restantes sont considérées adiabatiques. L'entrée est placée en bas à gauche de la paroi inférieure, et la sortie sur la paroi supérieur, en face à l'entrée. Les valeurs du nombre de Nusselt moyen calculés sur la paroi chaude ont été comparées avec ceux obtenus par Angirasa [13]. L'écart relatif en termes de valeur du nombre de Nusselt moyen n'excède pas les 4%, pour les deux cas du nombre de Richardson comme montré dans le tableau 2.

Ri	Nu <sub>moy</sub> , [13]	Nu <sub>moy</sub> , present travail	Erreur (%)
0.1	19.3	18.62	3.52
1.0	17.7	17.12	3.27

Tableau 2. Comparaison du nombre de Nusselt moyen, entre notre simulation et celles d'Angirasa [13]

### 3. Résultats

Les résultats, sont obtenus pour l'eau comme fluide pure, les mélanges Cu-eau et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau avec le nombre de Reynolds Re = 112, le nombre de Richardson Ri = 200 et la fraction volumique des nanoparticules (φ) variant de 0,00 à 0,20.

#### 3.1. Champs dynamique et thermique

La figure 2 montre l'effet de la fraction volumique des nanoparticules sur le champs dynamique. On observe que l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules entraîne une diminution des valeurs des lignes de courant et son emplacement se déplace légèrement vers la zone centrale du canal. Ceci peut s'expliquer par l'importance des forces visqueuses par rapport aux forces d'Archimède dans le cas des nanofluides.

En examinant la figure 3, décrivant l'évolution du champ de température pour les deux nanoparticules utilisées (Cu et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en fonction de la fraction volumique, on montre que les températures élevées sont localisées dans des espaces au voisinage de paroi chaude, on remarque aussi que les isothermes ont tendance à devenir horizontales lorsque la fraction volumique augmente.

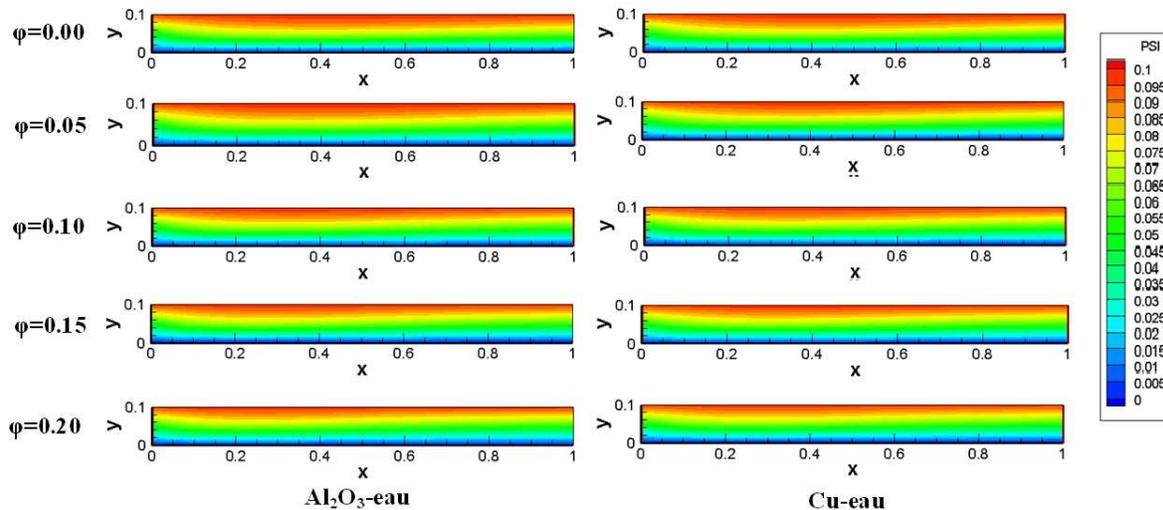


Figure 2. Champs dynamique à différentes valeurs de fraction volumique pour les deux nanoparticules (Cu et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

#### 3.2. Transfert thermique

Pour évaluer le taux de transfert de chaleur au niveau de paroi chaude dans les deux nanoparticules utilisées (Cu et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), la figure 4, illustre une comparaison de profils de variations de nombres de Nusselt locale à différentes valeurs de fraction volumique le long de la paroi chaude. À première vue, on constate que le maximum du transfert de chaleur se situe au coin gauche de la paroi. On peut voir aussi que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la valeur de fraction volumique.

La variation du nombre de Nusselt moyenne en fonction de la fraction volumique des nanoparticules utilisées (Cu et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) est représenté par la figure 5. On remarque que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique et de la conductivité thermique des nanoparticules. Pour les faibles valeurs de la fraction volumique  $\varphi=0.05$ , les deux nano fluides Cu-eau et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -eau, les courbes représentant le nombre de Nusselt moyen sont proches les unes des autres. Ceci est dû à la conductivité thermique du nano fluide. Pour des valeurs de la fraction volumique, telles que  $\varphi=0.05$ , les courbes du nombre de Nusselt moyen s'éloignent les unes des autres. On constate que l'amélioration du transfert de la chaleur convectif est due à l'augmentation de la fraction volumique de nanoparticule.

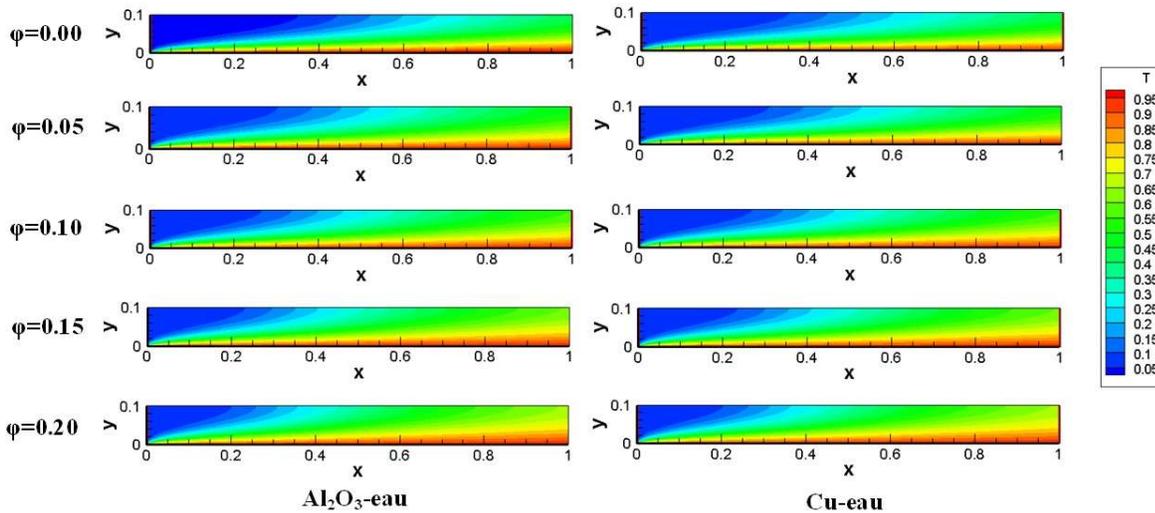


Figure 3. Isothermes à différentes valeur de fraction volumique pour les deux nanoparticules (Cu et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

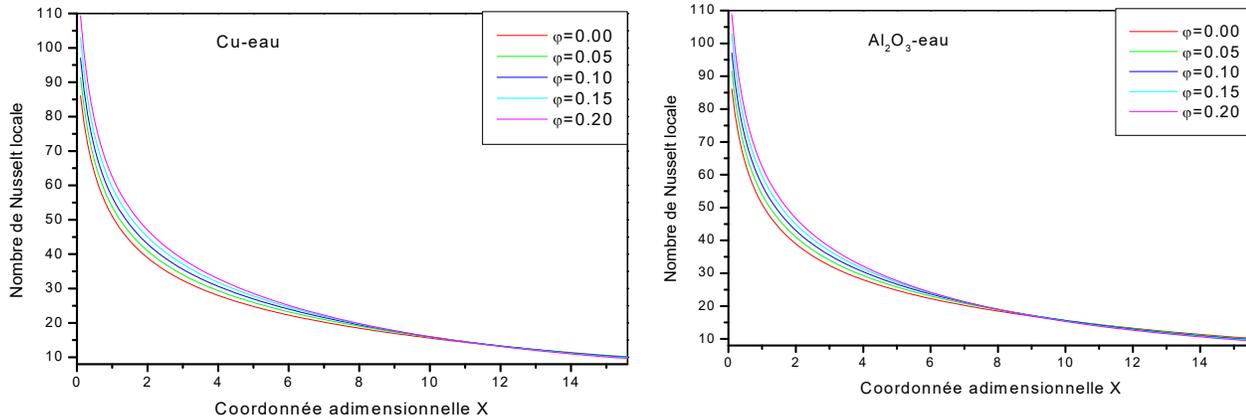


Figure 4. Nombre de Nusselt local le long de paroi chaude pour différents fraction volumique

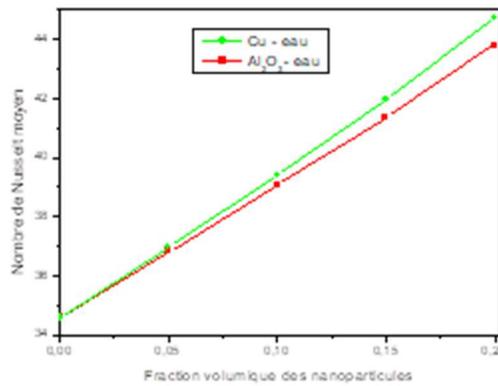


Figure 5. Nombre de Nusselt moyen en fonction de fraction volumique

#### 4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté une étude numérique de la convection mixte des nanofluides dans un canal horizontale. Pour les nanofluides utilisés dans cette étude, nous avons considéré deux différentes nanoparticules (Cu (Cuivre), Oxyde d'Aluminium ( $Al_2O_3$ )) dans un fluide de base, comme l'eau. L'effet de certains paramètres tels que, le type des nanoparticules et la fraction volumique en nanoparticules, sur le champs dynamique et le transfert de chaleur a été étudié. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- L'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules ( $\phi$ ) décélère l'écoulement et favorise le transfert thermique entre le fluide et la paroi chaude du canal.
- L'amélioration du transfert thermique le plus élevé est obtenu en utilisant les nanoparticules de Cu.

## Références

- [1] Michael P. Beck, Yanhui Yuan, Pramod Warriar, Aryn S. Teja, The thermal conductivity of alumina nanofluids in water, ethylene glycol, and ethylene glycol + water mixtures, *J Nanopart Res* 12 (2010) 1469–1477.
- [2] Hang Xu, Tao Fan, Ioan Pop, Analysis of mixed convection flow of a nanofluid in a vertical channel with the Buongiorno mathematical model, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 44 (2013) 15–22.
- [3] Dalia Sabina Cimpean, Ioan Pop, Fully developed mixed convection flow of a nanofluid through an inclined channel filled with a porous medium, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 907–914.
- [4] Gul Aaiza, Ilyas Khan and SharidanShafie, Energy Transfer in Mixed Convection MHD Flow of Nanofluid Containing Different Shapes of Nanoparticles in a Channel Filled with Saturated Porous Medium, *Nanoscale Research Letters* (2015) 10:490.
- [5] Hyun Jin Kim, Seung-Hyun Lee, Ji-Hwan Lee, Seok Pil Jang, Effect of particle shape on suspension stability and thermal conductivities of water-based bohemite alumina nanofluids, *Energy* 90 (2015) 1290-1297.
- [6] S. Das, R.N. Jana, O.D. Makinde, Mixed convective magnetohydrodynamic flow in a vertical channel filled with nanofluids, *Engineering Science and Technology, an International Journal* xxx (2015) 1-12.
- [7] M.M. Rashidi, Mohammad Nasiri, Marzieh Khezerloo, Najib Laraqi, Numerical investigation of magnetic field effect on mixed convection heat transfer of nanofluid in a channel with sinusoidal walls, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 401 (2016) 159–168.
- [8] Z. Iqbal, N.S. Akbar, E. Azhar, E.N. Maraj, Performance of hybrid nanofluid (Cu-CuO/water) on MHD rotating transport in oscillating vertical channel inspired by Hall current and thermal radiation, *Alexandria Engineering Journal* 57 (2018) 1943–1954.
- [9] N.A. Zainala, R. Nazara, K. Naganthra, I. Pop, MHD mixed convection stagnation point flow of a hybrid nanofluid past a vertical flat plate with convective boundary condition, *Chin. J. Phys.* 66 (2020) 630–644.
- [10] Essam M. Elsaid, Mohamed S. Abdel-wahed, Mixed convection hybrid-nanofluid in a vertical channel under the effect of thermal radiative flux, *Case Studies in Thermal Engineering* 25 (2021) 100913.
- [11] Brinkman, H.C., *The viscosity of concentrated suspensions and solution*. J. Chem. Phys., 20, 571– 581, 1952.
- [12] Maxwell, C., *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford University Press, Cambridge, UK., 1904.
- [13] D. Angirasa, "Mixed convection in a vented enclosure with an isothermal vertical surface", *Fluid Dynamics Research* 26 (2000) 219-233.