

SIMULATION NUMERIQUE DU TRANSFERT DE CHALEUR DE NANOFLUIDE DANS UN CANAL

BOUHEZZA Aicha¹*, BOUBEGGAR Saousene¹, BOUKERMA Karima¹

¹Département de Technologie, Faculté de Technologie, Université 20 Août 1955 Skikda, 21000 Skikda, Algérie.
 E-mail : Phy_bouhezza@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Dans le présent travail, on étudie numériquement la convection mixte des nanafluides dans un canal plan vertical. Les équations différentielles régissantes sont discrétisées par méthode des volumes finis. La viscosité dynamique et la conductivité thermique effective du nanofluide sont approximées respectivement par le modèle de Brinkman et de Maxwell-Garnetts. Les simulations numériques sont effectuées dans le cas de l'eau pure et des mélanges d'eau et des nanoparticules (Cu et TiO₂) pour une fraction volumique des nanoparticules (ϕ) comprise entre 0 et 0,2 et un nombre de Richardson égale à 1. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules (ϕ) favorise le transfert thermique, et le nanofluide Cu – eau est un bon conducteur de chaleur par rapport au nanofluide TiO₂ – eau.

Mots Clés: *Transfert de Chaleur, Convection Mixte, Nanofluide, Nanoparticule, Canal plan, Cu, TiO₂.*

NOMENCLATURE

C _p	chaleur spécifique à pression constante	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	X	coordonnée adimensionnée dans la direction x	
Gr	nombre de Grashof		Y	coordonnée adimensionnée dans la direction y	
g	accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]	<i>Symboles grecques</i>		
K	conductivité thermique	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	α	diffusivité thermique du fluide	[m ² .s ⁻¹]
H	largeur du canal	[m]	ν	viscosité cinématique	[m ² .s ⁻¹]
L	longueur du canal	[m]	μ	viscosité dynamique	[Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
Nu	nombre de Nusselt		ρ	masse volumique	[kg.m ⁻³]
P	pression adimensionnelle		θ	température adimensionnelle	
p	pression	[Pa]	β	coefficient d'expansion thermique	[K ⁻¹]
Pr	nombre de Prandtl		ϕ	fraction volumique	
Re	nombre de Reynolds		<i>Indices</i>		
Ri	nombre de Richardson		1	paroi gauche	
U	composante de la vitesse adimensionnée dans la direction x		2	paroi droite	
V ₀	vitesse du fluide à l'entrée		nf	nanofluide	
V	composante de la vitesse adimensionnée dans la direction y		f	fluide de base	
T ₀	température du fluide à l'entrée	[K]	s	nanoparticule	
T _w	température imposée à la paroi	[K]			

1. INTRODUCTION

Les écoulements de fluides avec transferts de chaleur est un sujet qui continue à susciter beaucoup d'intérêt. Cet intérêt se traduit par de nombreuses applications technologiques et industrielles. Dans ces applications, le besoin d'améliorer le transfert de chaleur par convection est le but principal de plusieurs recherches. Parmi les méthodes utilisées pour améliorer les échanges thermiques on trouve celle de l'ajout de nanoparticules dans un fluide (nanofluide). En raison de l'importance du problème, un grand nombre d'études numériques et expérimentales [1-8] portent sur ce problème dans différentes configurations géométriques. Dans cette étude nous nous intéressons à l'étude de la convection mixte des nanofluides dans un canal. Pour les nanofluides utilisés dans cette étude, nous avons considéré deux différentes nanoparticules (Cu (Cuivre), Oxyde de Titanium (TiO₂)) dans un fluide de base, l'eau.

2. MODELE MATHEMATIQUE

Le modèle physique considéré est schématisé sur la figure 1. On considère un canal rectangulaire plan et vertical dans lequel s'écoule un nanofluide en écoulement laminaire. La paroi gauche du canal est soumise à une température constante (T_1) et la paroi droite est maintenue à une température constante ($T_2 > T_1$). L'écoulement est supposé ascendant entrant à une température $T_0 = T_1$ et une vitesse uniforme V_0 . Le fluide de base utilisé est newtonien, l'écoulement est incompressible, bidimensionnel et stationnaire. La dissipation visqueuse est négligeable, les propriétés thermophysiques des nanofluides sont constantes, sauf pour la variation de la masse volumique qui est estimée par l'approximation de Boussinesq.

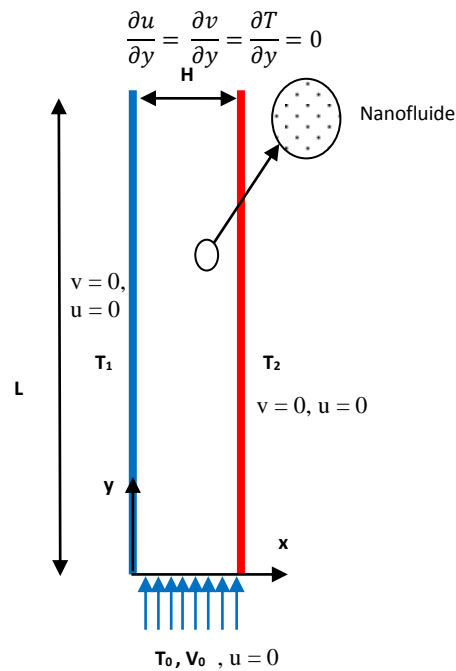


FIGURE 1. La géométrie du problème étudié et les conditions aux limites

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 : $\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s$ (1)

La chaleur spécifique : $(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_s$ (2)

Le coefficient de dilatation thermique : $(\rho \beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho \beta)_f + \phi(\rho \beta)_s$ (3)

La diffusivité thermique : $\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}}$ (4)

La viscosité du nanofluide est donnée par Brinkman [9] : $\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}}$ (5)

La conductivité thermique effective du nanofluide est déterminée par le modèle de Maxwell-Garnetts [10] :

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (6)$$

Les propriétés thermophysiques du fluide pure et des nanoparticules sont regroupées dans le tableau 1 [8] .

	Eau pure	Cu	TiO ₂
Pr	6,2	-	-
ρ (kg.m ⁻³)	997.1	8933	4250
Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4179	385	686,2
k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,613	400	8,9538
β (K ⁻¹)	21×10^{-5}	$1,67 \times 10^{-5}$	$0,9 \times 10^{-5}$
α (m ² .s ⁻¹)	$1,47 \times 10^{-7}$	$1163,1 \times 10^{-7}$	$30,7 \times 10^{-7}$

TABLEAU 1. Propriétés thermophysiques de l'eau et des nanoparticules

Les équations adimensionnelles régissant cet écoulement en coordonnées cartésiennes s'écrivent :

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \left[\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right] \quad (7)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \left[\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right] \quad (8)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \left[\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right] + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} Ri \theta \quad (9)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \frac{1}{RePr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (10)$$

Les variables des équations précédentes sont adimensionnalisées comme suit :

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{v_0}, V = \frac{v}{v_0}, P = \frac{P}{\rho_{nf} v_0^2}, \theta = \frac{T-T_0}{\Delta T}$$

$$Re = \frac{v_0 H}{\nu_f}, Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, Gr = \frac{g \beta_f H^3 \Delta T}{\nu_f^2}, Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (11)$$

Le nombre de Nusselt est défini par : $Nu = - \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=1}$ (12)

Le nombre de Nusselt moyen est défini par : $\bar{Nu} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu dY$ (13)

3. METHODE NUMERIQUE

Le système d'équations différentielles obtenu avec les conditions aux limites associées est discrétisé par la méthode des volumes finis, pour donner un système d'équations algébriques. Les flux convectifs aux faces de volume de contrôle sont calculés à partir d'un schéma loi de puissance [11]. Le couplage vitesse-pression est

traité par l’algorithme SIMPLER [11]. Les équations algébriques sont résolues itérativement à l’aide de l’algorithme de Thomas.

4. RESULTATS

Les résultats, sont obtenus pour l’eau comme fluide pure ($Pr = 6,2$), les mélanges Cu–eau et TiO_2 –eau avec le nombre de Reynolds $Re = 100$, le nombre de Richardson $Ri = 1,0$ et la fraction volumique des nanoparticules (ϕ) variant de 0,00 à 0,20.

4. 1. Effet du type des nanoparticules

La figure 2 représente les évolutions axiales des profils de vitesse axiale. Proche de l’entrée du canal, ces profils sont uniformes dans la partie centrale et symétriques par rapport à l’axe du canal et essentiellement identiques pour les deux cas. En s’éloignant de l’entrée, ces profils uniformes sont de plus en plus déformés, et ils perdent leurs symétries. La convection naturelle induit par les forces d’Archimède a une influence directe sur la vitesse axiale et entraîne un déplacement du maximum de la vitesse axiale vers la moitié droite du canal (proche de la paroi la plus chaude). Cette accélération du fluide dans la moitié droite est accompagnée d’une décélération dans la moitié gauche du canal (proche de la paroi la plus froide).

L’effet du type des nanoparticules sur l’évolution axiale du nombre de Nusselt est présenté sur la figure 3. Cette figure montre que, proche de l’entrée du canal, l’effet du type des nanoparticules sur le transfert thermique est inexistant et les deux courbes de Nu diminuent en accord avec la courbe correspondante à l’eau pure. À mesure qu’on avance dans le canal, les courbes correspondantes aux nanofluides se décrochent pour prendre des valeurs nettement supérieures. Par ailleurs, ces nanoparticules causent un perfectionnement du transfert thermique. En comparant les différents cas, on constate que les valeurs du nombre de Nusselt pour le nanofluide Cu – eau sont supérieures à celles du nanofluide TiO_2 – eau. Ce qui montre que le Cu est un bon conducteur de chaleur par rapport au TiO_2 .

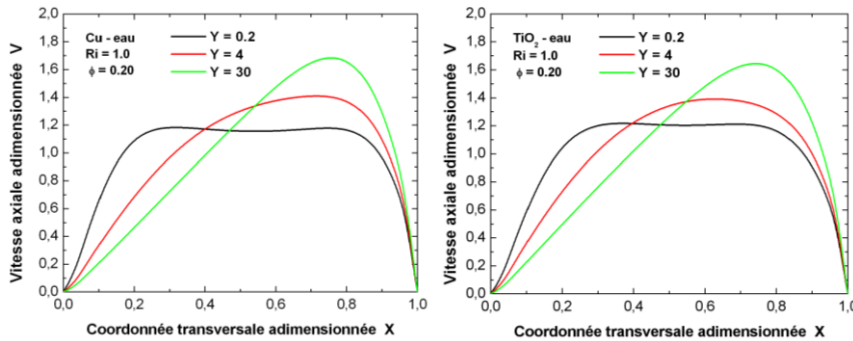


FIGURE 2. Développement axial des profils de la vitesse axiale

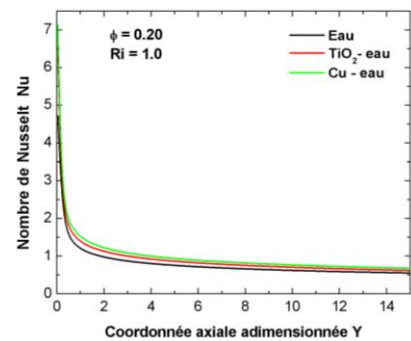


FIGURE 3. Effet du nanofluide sur le développement axial du nombre de Nusselt

4. 2.Effet de la fraction volumique ϕ des nanoparticules

La figure 4 montre l’effet de la fraction volumique des nanoparticules sur la distribution de la vitesse axiale. On observe que l’augmentation de la fraction volumique des nanoparticules entraîne une diminution de la valeur maximale de la vitesse axiale 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.

L’effet de la fraction volumique des nanoparticules ϕ sur l’évolution axiale du nombre de Nusselt pour les deux nanofluides est illustré sur la figure 5. 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 nanofluide, lorsque la fraction volumique des nanoparticules augmente.

La figure 6 représente la variation du nombre de Nusselt moyen (\overline{Nu}) en fonction de la fraction volumique des nanoparticules pour différents nanofluides. On remarque que le nombre de Nusselt moyen augmente avec la fraction volumique en nanoparticules. Cette figure montre aussi l'effet du type des nanoparticules sur la variation du nombre de Nusselt moyen, nous observons que le taux de transfert de chaleur est maximum pour le nanofluide $Cu - eau$.

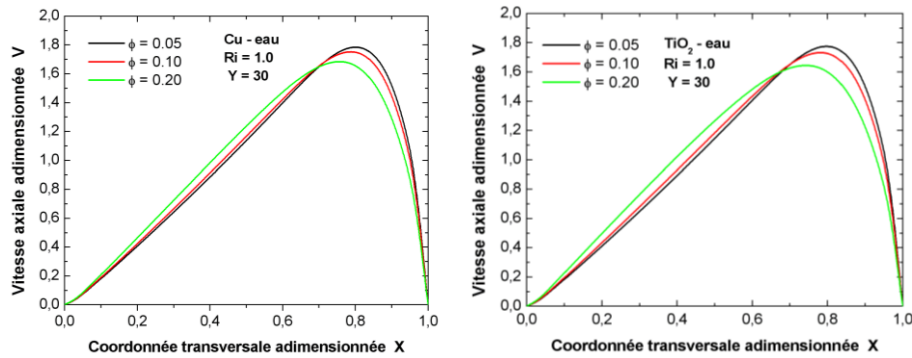


FIGURE 4. Effet de la fraction volumique (ϕ) sur les profils de la vitesse axiale

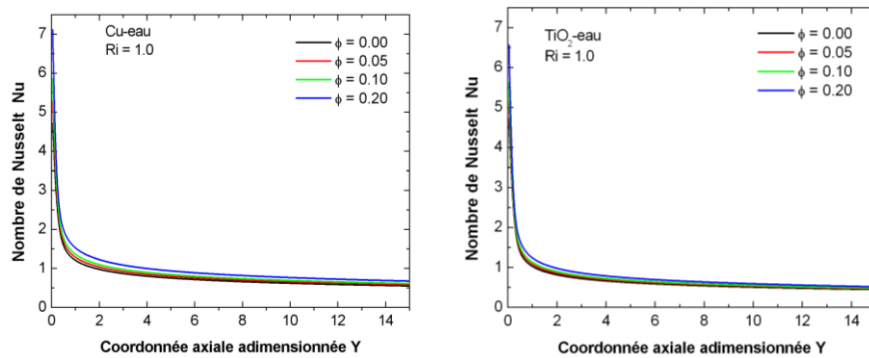


FIGURE 5. Effet de la fraction volumique (ϕ) sur le développement axial du nombre de Nusselt

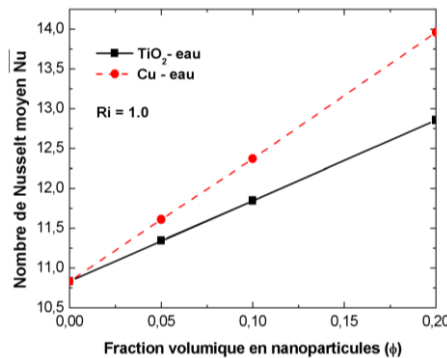


FIGURE 6. Effet de la fraction volumique (ϕ) sur le nombre de Nusselt moyen (\overline{Nu}) pour les deux nanofluides

4. CONCLUSIONS

Dans ce travail, nous avons présenté une étude numérique de la convection mixte des nanofluides dans un canal. Pour les nanofluides utilisés dans cette étude, nous avons considéré deux différentes nanoparticules (Cu (Cuivre), Oxyde de Titanium (TiO₂)) 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 (ϕ) décélère l'écoulement et favorise le transfert thermique entre le fluide et la paroi chaude du canal.
- Le transfert de chaleur en présence des nanoparticules de Cu est amélioré comparativement aux résultats obtenus avec des nanoparticules de TiO₂.

REFERENCES

- [1] A. Raisi, B. Ghasemi, and S. M. Aminossadati, A numerical study on the forced convection of laminar nanofluid in a microchannel with both slip and no-slip conditions, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 59: 114–129, 2011.
- [2] M.Kh. Abdolbaqi, C.S.N. Azwadi, R. Mamat, Heat transfer augmentation in the straight channel by using nanofluids, *Case Studies in Thermal Engineering*, 3, 59–67, 2014.
- [3] HangXu, Ioan Pop, Fully developed mixed convection flow in a vertical channel filled with nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 1086–1092, 2012.
- [4] Oronzio Manca, Sergio Nardini, Daniele Ricci, A numerical study of nanofluid forced convection in ribbed channels, *Applied Thermal Engineering*, 37, 280 – 292, 2012.
- [5] M. Sheikholeslami, D.D. Ganji, Heat transfer of Cu-water nanofluid flow between parallel plates, *Powder Technology*, 235, 873–879, 2013.
- [6] Alireza Beheshti, Mostafa Keshavarz Moraveji, Majid Hejazian, Comparative Numerical Study of Nanofluid Heat Transfer through an Annular Channel, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 67: 100–117, 2015
- [7] Heidary H., Hosseini, R., Pirmohammadi M., Kermani, M.J. Numerical study of magnetic field effect on nano-fluid forced convection in a channel, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, pp. 11–17, 2015.
- [8] Mohamed EL HATTAB, M., MIR, R., EL HAMMAMI, Y., MEDIOUNI, T., Simulation numérique de la convection naturelle des nanofluides Dans une enceinte carrée chauffée par une source de chaleur, *Revue internationale d'héliotechnique*, 45, pp. 51-59, 2013
- [9] Brinkman, H.C., The viscosity of concentrated suspensions and solution. *J. Chem. Phys.*, 20, 571–581, 1952.
- [10] Maxwell, C., A Treatise on Electricity and Magnetism. *Oxford University Press, Cambridge,UK.*, 1904.
- [11] Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, *Hemisphere Publishing*, New York, 1980.