

Etude Du Comportement Thermique Et Hydraulique Dans Un Canal Triangulaire En Utilisant Le Nano fluide Cu-Eau

Rahima Benchabi

Department of Mechanical Engineering, University of Freres Mentouri, Constantine 1, 25000



Résumé -- Le présent travail est une étude numérique de la convection forcée d'un écoulement bidimensionnel, laminaire et incompressible à travers un canal corrugué à base triangulaire en utilisant des nanoparticules métalliques Cu dispersées dans de l'eau comme fluide de base. Les équations régissant le problème (l'écoulement et le transfert de chaleur) ont été résolues en utilisant la méthode des volumes finis. Le logiciel FLUENT d'ANSYS 15.0 a été utilisé pour réaliser les simulations numériques. Ces simulations numériques ont été réalisées pour différentes valeurs du nombre de Reynolds allant de 100 jusqu'à 1000 et pour des nanoparticules métalliques de diamètre $dp = 30$ nm avec des fractions volumiques de 0% et 5%.

Mots clés -- Ansys-Fluent, canal corrugué, convection forcée, nanoparticules métalliques, volumes finis

Abstract – The present work is a numerical study of the forced convection of a two-dimensional, laminar and incompressible flow through a triangular-based corrugated channel using metallic nanoparticles dispersed in water as the base fluid. The equations governing the problem (flow and heat transfer) were solved using the finite volume method. ANSYS 15.0 FLUENT software was used to perform the numerical simulations. These numerical simulations were carried out for different values of the Reynolds number ranging from 100 to 1000 and for metallic nanoparticles of diameter $dp = 30$ nm with volume fractions of 0% and 5%.

Keywords -- Ansys-Fluent, corrugated channel, forced convection, metallic nanoparticles, finite volumes.

I. INTRODUCTION

Le transfert de chaleur joue un rôle important dans divers processus industriels. Il se manifeste sous trois modes (conduction, convection et rayonnement). Parmi les différents domaines industriels où l'on trouve leurs applications on peut citer, par exemple, le refroidissement des réacteurs nucléaires et des systèmes électroniques. D'autre part, les études de la convection forcée dans les canaux corrugués remplis de nanofluides constituent depuis plusieurs années, l'objet de plusieurs recherches, du fait de son implication dans de nombreux domaines d'applications industrielles. Durant ces deux dernières décennies, beaucoup d'auteurs se sont intéressés à ce domaine d'application.

Ahmed et al. [1] ont présenté une étude numérique qui concerne un écoulement de nanofluide (Cu-eau) s'écoulant à travers un canal corrugué à base triangulaire chauffé isothermiquement. Les simulations sont réalisées pour des fractions volumiques comprises entre 0 et 0,05 et un nombre de Reynolds allant de 10 à 1000. Les résultats montrent que le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation des fractions volumiques du nanofluide, mais cette amélioration est accompagnée d'une augmentation de la chute de pression et il a été constaté que l'amélioration du transfert de chaleur dépend principalement de la fraction volumique du nanofluide et du nombre de Reynolds.

Ahmed et al. [2] ont étudié numériquement le transfert de chaleur par convection forcée d'un nanofluide (Cu-eau) dans un canal trapézoïdal. Cette étude a aussi porté sur les effets des paramètres géométriques tels que le pas du canal, l'amplitude, le

nombre de Reynolds et les fractions volumiques du nano-fluide sur les vecteurs vitesses, les contours de température, la chute de pression et le nombre de Nusselt moyen. Les résultats montrent que le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation des fractions volumiques du nanofluide et avec l'amplitude du canal, mais cette amélioration est accompagnée d'une augmentation de la perte de charge. Aussi, les auteurs ont noté que quand le pas diminue le nombre de Nusselt augmente et la chute de pression diminue.

Ahmed et al. [3] ont présenté un travail numérique pour étudier le transfert de chaleur dans un canal droit et corrugué à trois bases différentes (trapézoïdale, triangulaire et sinusoïdale) remplie du nanofluide (CuO-eau). Les auteurs ont étudié les effets de fraction volumique des nanoparticules et le nombre de Reynolds sur la température, la vitesse et le nombre de Nusselt. Les auteurs concluent que le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation des fractions de volume des nanoparticules et du nombre de Reynolds pour les trois corrugations considérées. Cette étude a aussi montré que le canal à base trapézoïdale donne le meilleur transfert de chaleur par rapport aux autres canaux. Dans le but d'améliorer le transfert de chaleur, Tokgoz et al. [4] ont étudié numériquement les caractéristiques de transfert de chaleur du nanofluide Al_2O_3 à base d'eau dans un canal rectangulaire pour différents angles de phase. Les simulations sont effectuées pour des nombre de Reynolds compris entre 500 et 2000 et des fractions volumiques variant de 0 à 0,08. Les résultats montrent que l'addition des nanoparticules dans le fluide de base et l'utilisation des canaux corrugués augmentent le transfert de chaleur. Ahmed et al. [5] ont effectué une étude numérique concernant un écoulement turbulent d'une convection forcée à travers un canal triangulaire avec différentes fractions volumiques des nanoparticules (Al_2O_3 , CuO, SiO_2 et ZnO) à diamètre variable. Les résultats montrent que le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation des fractions volumiques du nanofluide et la diminution du diamètre des nanoparticules. En plus, le nanofluide SiO_2 -eau présente une augmentation de transfert de chaleur et qu'elle est la plus élevée par rapport à celle des autres nanofluides. Srinivas el al. [6] ont réalisé une étude numérique sur les effets du diamètre des nanoparticules et les fractions volumiques du nanofluide Au-eau, de l'amplitude du canal et du nombre de Reynolds sur le transfert de chaleur dans différents canaux corrugués (triangulaire, trapézoïdale, sinusoïdal et carré). Les auteurs ont montré que le canal corrugué à base carrée donne le meilleur transfert de chaleur par rapport aux autres canaux. Une étude expérimentale suivie d'une étude numérique a été réalisée par Ahmed et al. [7]. Les auteurs se sont intéressés à l'amélioration du transfert de chaleur dans différentes formes de canaux corrugués (trapézoïdal, sinusoïdal et canal droit) en utilisant le SiO_2 comme nanoparticules. Les résultats montrent que le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et que le canal trapézoïdal donne le meilleur transfert de chaleur, suivi du sinusoïdal, puis du canal droit. Ahmed et al. [8] ont considéré un écoulement laminaire d'une convection forcée du nanofluide Al_2O_3 -eau avec différentes fractions volumiques comprise entre 0 et 0.05 dans un canal corrugué sinusoïdal avec des angles de corrugation variant de 0° à 180° et pour une gamme de nombre Reynolds variant de 100 à 800. Les résultats montrent que le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds ; des fractions volumiques des nanoparticules et aussi avec la diminution de l'angle de corrugation. Les caractéristiques du transfert de chaleur du nanofluide SiO_2 -eau s'écoulant à travers un canal de symétrie en forme demi-cercle sous un régime turbulent ont été étudiées numériquement par Ajeel et al. [9]. Dans leur étude, la concentration des nanoparticules varie entre 0% et 8% et pour une rangée du nombre de Reynolds variant de 10000 à 30000. Les résultats montrent que le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds et avec la hauteur du canal ondulé, mais cette augmentation s'accompagne d'une augmentation de la perte de charge. Cette étude a aussi montré que les valeurs les plus élevées du Nusselt sont évaluées pour la hauteur ondulée de 2,5 mm avec un pas longitudinal d'ondulation de 15,0mm.

II. MODÈLE MATHÉMATIQUE

2.1 Configuration du problème

Le modèle physique étudié est un canal corrugué à base triangulaire, symétrique, rempli d'un mélange homogène d'eau et de nanoparticules métalliques, les propriétés thermo-physiques du fluide de base (eau) et les nanoparticules sont prises à 293K et sont résumées dans le tableau 1, çï - dessous.

2.2 Equations gouvernant l'écoulement

-Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

-Equation de quantité de mouvement suivant x:

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}\right) = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)\right] \quad (2)$$

-Equation de quantité de mouvement suivant y:

$$\left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)\right] \quad (3)$$

-Equation d'énergie:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad (4)$$

$\alpha_{nf} = \frac{K_{nf}}{\rho_{nf} c_{p_{nf}}}$, diffusivité thermique du nanofluide.

2.3 Nombres adimensionnels

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu}$$

Nombre de Nusselt

$$Nu = \frac{h D_h}{k}$$

h : coefficient de transfert thermique convectif [W/m².°K].

Coefficient de frottement

$$c_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

τ_w : Contrainte de cisaillement.

2.4 Conditions aux limites

Dans notre travail, les conditions aux limites hydrodynamique et thermique sont telles que:

- *Entrée du canal:*

- Une vitesse à l'entrée u_{nf} est imposée et elle correspond au nombre de Reynolds et au type du nanofluide et elle est calculée comme suit :

$$u_{nf} = \frac{Re \times \mu_{nf}}{D_h \times \rho_{nf}}$$

- Et une température constante du fluide à l'entrée du canal $T_{nf} = 293^{\circ}k$.

- *Sortie du canal:*

Le canal dont la configuration corruguée étant formée de six corrugations, donc la sortie est suffisamment éloigné de l'entrée, l'écoulement peut être supposé totalement développé, ce qui se traduit par un gradient normal nul pour toutes les quantités physiques gouvernées par une équation différentielle de transport.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 ; \quad \frac{\partial V}{\partial x} = 0 ; \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

• *Traitement près de la paroi :*

Près des parois solides supérieure et inférieure, les conditions d'imperméabilité et de non glissement impliquent que $u = v = 0$. Une température chaude par rapport à celle du fluide dans le canal corrugué est imposée $T_p = 303^{\circ}K$. Les parois solides avant et après les corrugations sont supposées adiabatiques.

2.5 Calcul des propriétés thermo- physiques du nanofluide

Les propriétés thermo-physiques du nanofluide sont calculées à partir des équations suivantes :

- Masse volumique effective:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \tag{5}$$

- Chaleur spécifique effective (Corrélation de Xuan et Roetzel [10]) :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p \tag{6}$$

- Viscosité dynamique effective (Corrélation de Corcione [11]):

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f}\right)^{-0.3} \varphi^{1.03}} \tag{7}$$

- Conductivité thermique effective (Corrélation de Patel et al. [12]):

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + \frac{k_p A_p}{k_f A_f} + c k_p p_e \frac{A_p}{k_f A_f} \tag{8}$$

Avec: $\frac{A_p}{A_f} = \frac{d_f \varphi}{d_p (1-\varphi)}$

$$p_e = \frac{u_p d_p}{\alpha_f}$$

u_p : est la vitesse de mouvement brownien des particules qui est donnée par

$$u_p = \frac{2k_b T}{\pi \mu_f d_p^2}$$

k_b : Constante de Boltzmann égale ($1.38064852 \times 10^{-23}$ [J/k]), d_p : Diamètre de la particule, d_f : Diamètre du fluide de base.

Tableau1. Propriétés thermo-physiques du fluide de base (eau) et les nanoparticules métalliques Cu à 293°K.

	$\rho(Kg/m^3)$	$C_p (J / Kg.^{\circ} K)$	$K (W / m .^{\circ}K)$	$\mu (Kg /m .s)$
Eau	1000.52	4181.8	0.597	0.001
Cu	2200	703	1.2	-----

III. MODELISATION NUMERIQUE

Les équations gouvernant l'écoulement et le transfert de chaleur sont discrétisées en utilisant la méthode des volumes finis. Pour traiter le couplage vitesse - pression, l'Algorithme Simple a été utilisé.

IV. EFFET DU MAILLAGE ET VALIDATION

Pour montrer l'effet du maillage sur la solution, trois maillages ont été testés 91688 ; 117085 et 158168 en régime d'écoulement pour un nombre de Reynolds $Re = 500$ et une fraction volumique égale à 0%. La figure 1 représente la variation de la vitesse horizontale pour les différents maillages. On note que le maillage 117085 donne une solution indépendante de nombre de nœuds.

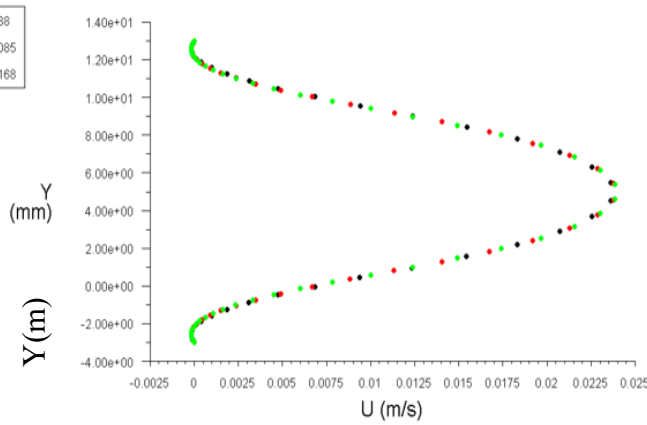


Figure 1. Profils de la composante horizontale de la vitesse avec $\phi = 0\%$ et $Re = 500$ pour différents maillages à la station $x = 110mm$.

La validation de la simulation numérique est nécessaire afin de vérifier l'exactitude des résultats numériques. Une comparaison de nos résultats avec les résultats numériques trouvés par Ahmed [1]. La figure 2 représente la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Reynolds pour un canal corrugué à base triangulaire avec une fraction volumique $\phi = 0\%$. On remarque que les valeurs du Nusselt moyen augmentent avec l'augmentation du nombre de Reynolds. On constate une bonne concordance entre les résultats obtenus par la présente simulation et ceux d'Ahmed [1].

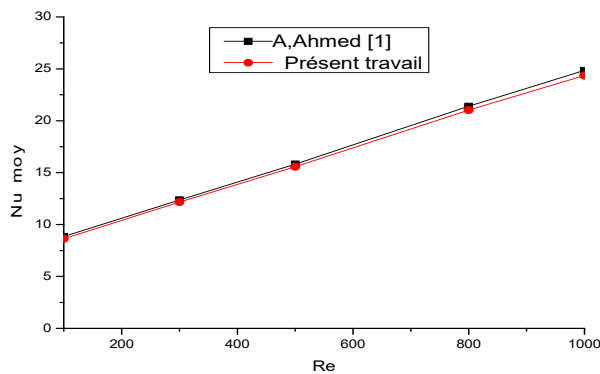


Figure 2. Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents Reynolds et une fraction volumique $\phi = 0\%$

V. RESULTATS ET DISCUSSION

5.1 Champ dynamique

La Figure 3 montre les contours de la vitesse moyenne pour différents nombres de Reynolds avec une fraction volumique $\phi = 5\%$, on voit que la vitesse maximale est située sur l'axe du canal qui est de plus en plus importante que le nombre de Reynolds augmente, la valeur de la vitesse maximale augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds et qui diminuent jusqu'à s'annuler près des parois solides satisfaisant ainsi la condition non glissement.

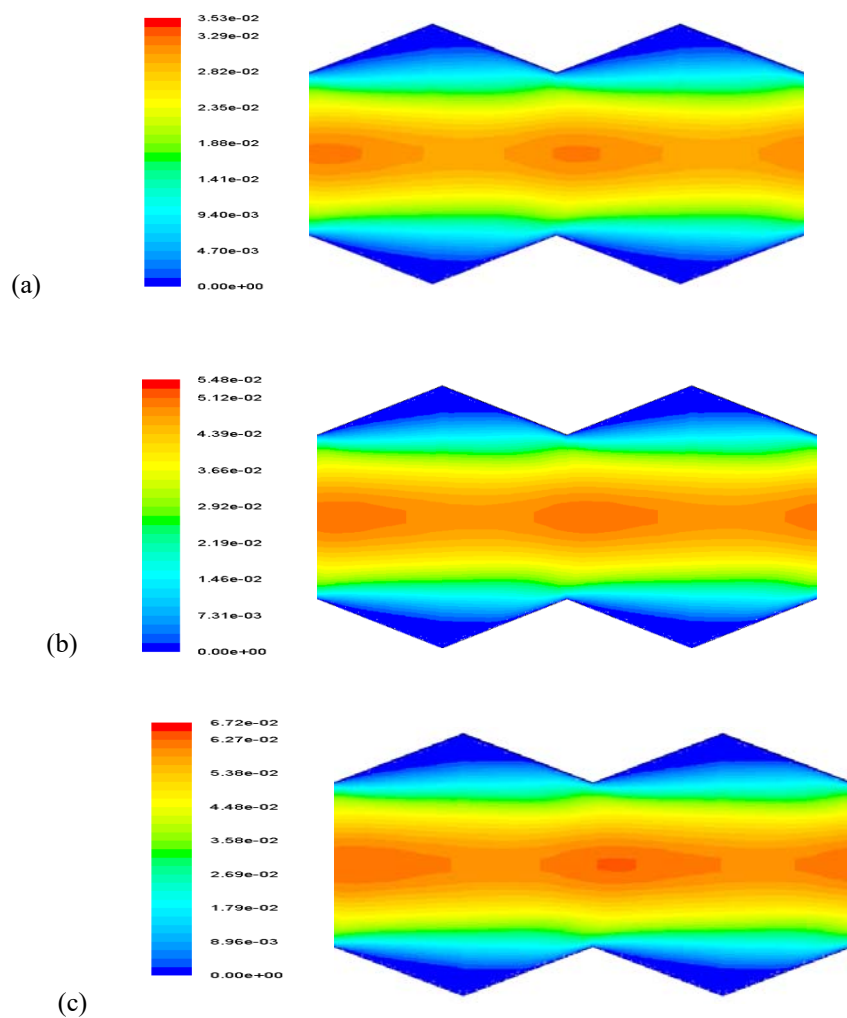
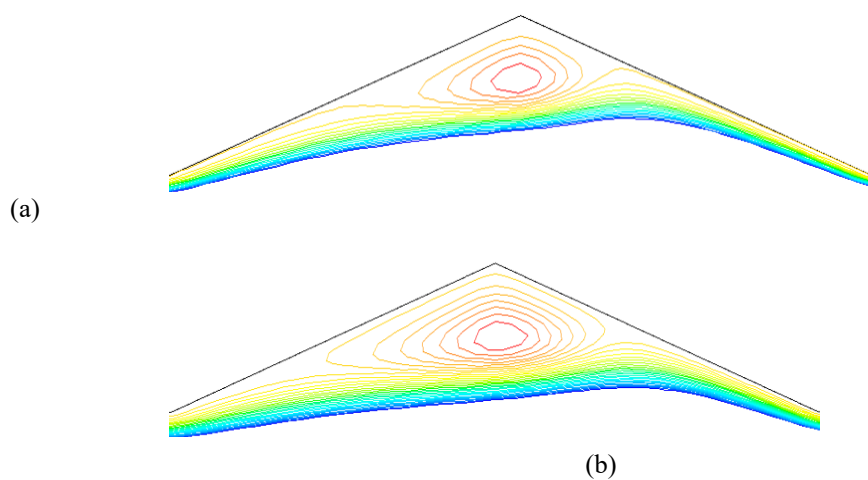
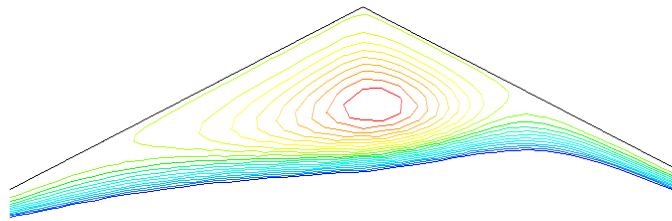


Figure 3. Contours de la vitesse moyenne pour $\phi = 5\%$,
 (a) $Re = 500$, (b) $Re = 800$, (c) $Re = 1000$

Les lignes des courant pour différents nombres de Reynolds avec une fraction volumique $\phi = 5\%$ sont représentées sur la figure 4. On voit la création de zones de recirculation au niveau des corrugations, ces zones sont de plus en plus volumineuses avec l'augmentation du nombre de Reynolds.



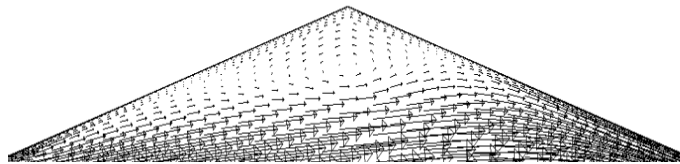


(c)

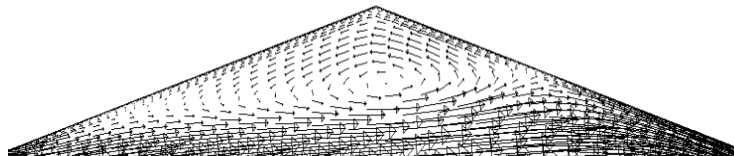
Figure 4. Contours des lignes de courant pour $\varphi = 5\%$,

(a) $Re = 500$, (b) $Re = 800$, (c) $Re = 1000$

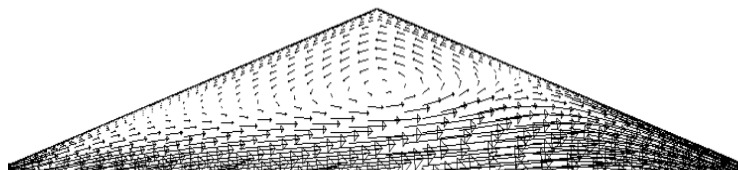
La Figure 5 représente les contours des vecteurs de la vitesse moyenne pour différents nombres de Reynolds avec une fraction volumique $\varphi = 5\%$. On remarque clairement l'apparition des zones de recirculation dues au changement de direction du fluide. Le fluide est accéléré, ceci provoque un détachement immédiat de la paroi au niveau des corrugations et donc apparition des zones de recirculation, dont la taille augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds.



(a)



(b)



(c)

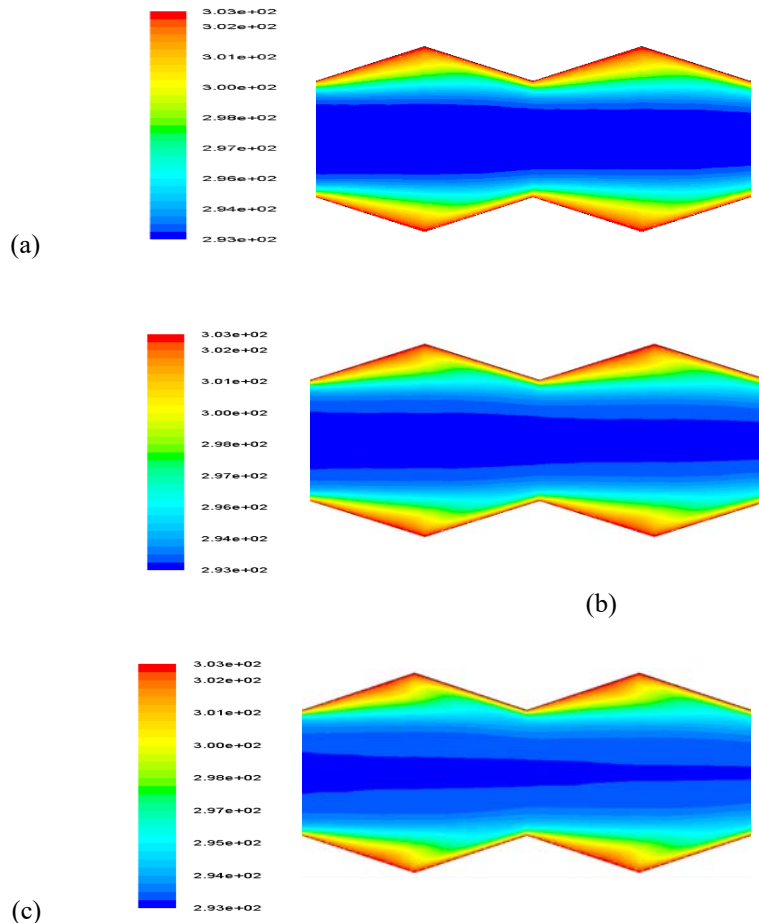
Figure 5. Contours des vecteurs de la vitesse moyenne pour $\varphi = 5\%$,

(a) $Re = 500$, (b) $Re = 800$, (c) $Re = 1000$

5.2 Champ thermique

Les contours de la température statique pour différents nombres de Reynolds avec une fraction volumique $\varphi = 5\%$ sont représentés sur la figure 6. Notons que les températures sont maximales au niveau des parois du canal corrugué et qu'il y a une chaleur qui est transférée de la paroi chaude au nanofluide froid, circulant dans le canal et est transportée par convection.

On remarque aussi que les épaisseurs des couches limites thermiques près des parois diminuent avec l'augmentation du nombre de Reynolds.



Figures 6. Contours de la température statique pour une fraction volumique $\varphi = 5\%$,

(a) $Re = 500$ (b) $Re = 800$ (c) $Re = 1000$

VI. CONCLUSION

Le travail présenté dans ce papier concerne l'étude par simulation numérique du transfert de chaleur par convection forcée dans un canal corrugué à base triangulaire rempli de nanoparticules métalliques dispersées dans de l'eau pure en écoulement laminaire stationnaire. Les résultats obtenus montrent :

- L'apparition de zone de recirculation au niveau des sommets du canal corrugué.
- L'augmentation du nombre de Reynolds entraîne une augmentation de zones de recirculation.

REFERENCES

- [1] M.A.Ahmed, N.H.Shuaibl, M.Z.Yusoff, A.H.Al-Falahi, Numerical investigation of flow and heat transfer enhancement in a corrugated channel using nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38 (2011) 1368-1375.
- [2] M.A.Ahmed, M.Z.Yusoff, N.H.Shuaib, Effect of geometrical parameters on the flow and heat transfer characteristics in trapezoidal channel using nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 42(2013) 69-74.
- [3] M.A.Ahmed, M.Z.Yusoff, K.C.Ng, N.H.Shuaib, Effet of corrugation profile on the thermal-hydraulic performance of corrugated channels using CuO-water nanofluid, *Case Studies in Thermal Engineering* 4 (2014) 65-75.
- [4] N.Tokgoz, V. Ozbolat, B.Sahin, Investigation of heat transfer enhancement by using Al₂O₃-water nanofluid in rectangular corrugated channel, *KSU. Journal of Engineering Sciences*, 2016, 19(2).
- [5] M.A.Ahmed, M.Z.Yusoff, K.C.Ng, N.H.Shuaib, Numerical investigations on the turbulent forced convection of nanofluids flow in a triangular-corrugated channel, *Case Studies in Thermal Engineering*, 6 (2015) 212-225.
- [6] S.Srinivas, A.Gupta, A.K.Kandoi, Modelling and simulation of Au-water nanofluid flow in wavy channels, *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 5, 21 (2014), DOI:10.5098/hmt.5.21. ISSN: 2151-8629.
- [7] M.A.Ahmed, M.Z.Yusoff, K.C.Ng, N.H.Shuaib, Numerical and experimental investigations on the heat transfer enhancement in corrugated channels using SiO₂-water nanofluid, *Case Studies in Thermal Engineering* 6 (2015) 77-92.
- [8] M.A.Ahmed, M.Z.Yusoff, K.C.Ng, N.H.Shuaib, The effects of wavy-wall phase shift on thermal-hydraulic performance of Al₂O₃-water nanofluid flow in sinusoidal-wavy channel, *Case Studies in Thermal Engineering* 4 (2014) 153-165.
- [9] R.K. Ajeel, W.S.-I.W. Salima, K. Hasnan, Heat Transfer Enhancement in Semicircle Corrugated Channel: Effect of Geometrical Parameters and Nanofluid, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 53, Issue 1 (2019) 82-94.
- [10] Xuan, Y.M., & Roetzel, W. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transfer* 43/19, 3701-3707 .
- [11] Corcione, M. (2010). Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclosures differentially heated at the sidewalls. *Int. J. Therm. Sci.* 45, 1536-1546.
- [12] Patel, H.E., T. Pradeep, T. Sundarrajan, A. Dasgupta, N. Dasgupta, S.K. Das, A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids, *Pramana-Journal of Physics*, 65 (2005) 863-869.