

Écoulement convectif d'un nanofluide dans un canal à parois ondulées équipé de sources de chaleur et d'un obstacle solide sous l'effet d'un champ magnétique localisé

Nawal GUERROUDJ^{1*}, Brahim FERSADOU¹, Henda KAHALERRAS¹, Abdelhamid KHEIRI², Cherif NOUAR²

¹Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene (USTHB)
Laboratoire des Transports Polyphasiques et Milieux Poreux (LTPMP), Algérie

²LEMETA, Université de Lorraine, France

*(auteur correspondant : nawal.guerroudj@usthb.edu.dz)

Résumé - La présente communication porte sur l'intensification des transferts de chaleur par couplage de méthodes actives et passives. A cet effet, une étude numérique est effectuée pour explorer les caractéristiques d'écoulement et de transfert de chaleur d'un nanofluide Al_2O_3 /eau dans un canal à parois ondulées présentant un rétrécissement à l'entrée et équipé de trois sources de chaleur maintenues à une densité de flux constante et organisées alternativement sur les parois supérieure et inférieure. Un obstacle solide de section circulaire est placé au centre, au même niveau que la deuxième source, tandis qu'un champ magnétique uniforme est appliqué localement dans la dernière partie du canal où se trouve la troisième source. Les équations gouvernantes et les conditions aux limites associées sont résolues numériquement au moyen de la méthode des éléments finis résiduels pondérés de Galerkin. L'étude paramétrique se concentre sur l'impact du taux d'ouverture à l'entrée du canal AR, du rayon de l'obstacle R et de l'intensité du champ magnétique exprimée par le nombre de Hartmann Ha. Les résultats révèlent une intensification du taux de transfert de chaleur avec l'augmentation de Ha et R et la diminution de AR.

Mots-clés : Canal ondulé, Nanofluide, Sources de chaleur, Champ magnétique, Obstacle solide

Nomenclature

AR	Rapport d'ouverture	Pr	Nombre de Prandtl
Amp	Amplitude d'ondulations	Re	Nombre de Reynolds
B_0	Intensité du champ magnétique, $W.b.m^{-2}$	R	Rayon de l'obstacle, m
C_p	Capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	T	Température, K
d	Largeur d'ouverture, m	U	Vitesse axiale adimensionnelle
D	Diamètre de l'obstacle, m	V	Vitesse transversale adimensionnelle
Ec	Nombre d'Ekcert	X, Y	Coordonnées adimensionnelles
H	Hauteur du canal, m		
Ha	Nombre de Hartmann		
k	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
q	Densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$	θ	Température adimensionnelle
L	Longueur du canal, m	μ	Viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
n	Nombre d'ondulations	ρ	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
Nu	Nombre de Nusselt	ΔP	Chute de pression
p	Pression, Pa	σ	Conductivité électrique, $S.m^{-1}$
<i>Indices et exposants</i>		nf	Nanofluide
e	Entrée	g	Globale
f	Fluide	p	Paroi

1. Introduction

Ces dernières années, plusieurs techniques sont utilisées pour améliorer le transfert de chaleur par convection dans les systèmes de refroidissement à base de fluides, notamment l'adaptation de techniques passives en plaçant des déflecteurs sur la paroi interne des dissipateurs de chaleur [1,2], ou même l'utilisation de jets orientés à travers des cavités ouvertes soumises à des limites thermiques appropriées pour augmenter l'échange de chaleur [3-5]. La technique d'augmentation du transfert de chaleur par des parois ondulées est une caractéristique très importante, d'ailleurs de nombreuses recherches empiriques et d'études numériques rapportées par la littérature se sont intéressées à cette technique [6-8]. Le processus physique d'augmentation du transfert de chaleur vient du fait que la forme ondulée de la surface détruit la couche limite formée et permet le remplacement continu du fluide près de la paroi solide.

Les chercheurs ont récemment remarqué une technique innovante qui consiste à utiliser des fluides de base dans lesquels des particules nanométriques à très faible concentration sont suspendues afin d'améliorer leur efficacité thermique. Ces fluides sont des nanofluides. Cette nouvelle classe de fluides peut être utilisée dans une variété d'applications techniques, y compris l'ébullition, la condensation, le refroidissement et la lubrification des véhicules. Parmi les travaux qui se sont intéressés à ce type de problème nous pouvons citer une étude réalisée par Hussain et al. [9] traitant de la convection mixte MHD 2D d'un nanofluide hybride Eau- Al_2O_3 -Cu s'écoulant à travers un canal ondulé ayant un obstacle circulaire. Les résultats ont révélé que Le nombre moyen de Nusselt le plus élevé est atteint à une amplitude $A = 0,05$, ce qui favorise le transfert de chaleur d'environ 200 %. De plus, une augmentation de la fraction volumique des nanoparticules conduit à la diminution du nombre local de Nusselt sur la paroi ondulée supérieure. Job et al. [10] ont élaboré une étude sur la convection mixte d'un nanofluide magnétique Fe_3O_4 -eau s'écoulant dans un canal ondulé contenant des blocs poreux en présence d'un champ magnétique oscillant non-uniforme en tenant compte des effets magnétohydrodynamique (MHD) et ferrohydrodynamique (FHD). Le champ magnétique est produit par deux fils conducteurs de courant placés à des positions fixes à l'extérieur du canal. Les auteurs ont utilisé un modèle à deux phases qui considère les effets de la diffusion thermophorèse et du mouvement Brownien. Parmi les résultats trouvés, la réduction de la chute de pression avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et la diminution de la fréquence d'oscillation du champ magnétique ainsi que les effets MHD, FHD. Kolsi et al. [11] ont examiné l'effet de plusieurs nano-jets manipulés par des déflecteurs poreux vers une paroi ondulée chaude en présence d'un champ magnétique non-uniforme. Une amélioration du taux de transfert de chaleur de 162.5 % et 34 % pour des surfaces plane et ondulées respectivement, a été obtenue. Les performances de refroidissement ont été affectées par la variation de la perméabilité et de l'inclinaison des déflecteurs poreux. Ali et al. [12] ont étudié la convection mixte dans un conduit ondulé rempli d'un nanofluide et contenant une paire de cylindres rotatifs en présence d'un champ magnétique externe. En appliquant la méthode des éléments finis pour simuler les équations gouvernantes, les résultats numériques ont indiqué que les cylindres rotatifs, les surfaces ondulées et le champ magnétique incliné ont fortement affecté la structure de l'écoulement et le champ thermique. Le taux de transfert de chaleur maximal s'est produit en plaçant le champ magnétique à un angle de 90° . Récemment, Akhter et al. [13] ont analysé numériquement l'influence d'une source de chaleur cylindrique solide en rotation sur la convection mixte double diffusive et la génération d'entropie dans une cavité carrée ondulée poreuse partiellement chauffée en présence d'un champ magnétique. La cavité est remplie d'un nanofluide hybride composé de nanoparticules de Cu et d' Al_2O_3 diluées dans de l'eau pris comme fluide de base. Les résultats obtenus ont montré que le taux de transfert de chaleur maximal est de 393.78 % à la vitesse de rotation la plus élevée du cylindre ($\omega = 50$) par

rapport à un cylindre solide immobile en absence de champ magnétique, mais diminue à 261.82 % sous l'effet d'un champ magnétique de grande intensité $Ha = 100$.

C'est dans le contexte de ces études antérieures que s'inscrit le présent travail, qui est une simulation numérique de la convection forcée d'un nanofluide Al_2O_3 /eau dans un canal à parois ondulées présentant un jet à l'entrée et équipé de trois sources de chaleur maintenues à une température constante et organisées alternativement sur les parois supérieure et inférieure. Un obstacle solide de section circulaire est placé au centre, au même niveau que la deuxième source, tandis qu'un champ magnétique uniforme est appliqué localement dans la dernière partie du canal où se trouve la troisième source. Il s'agit d'analyser principalement les effets du taux d'ouverture à l'entrée du canal AR, du rayon de l'obstacle R et de l'intensité du champ magnétique exprimée par le nombre de Hartmann Ha .

2. Modèle physique

Le domaine physique, illustré sur la Figure 1, est un canal à parois ondulées de longueur 'L', de hauteur maximale H, présentant un rétrécissement à l'entrée de largeur 'd' et équipé de trois sources de chaleur maintenues à une température constante et organisées alternativement sur les parois supérieure et inférieure. Un obstacle solide de section circulaire est placé au centre du canal au même niveau que la deuxième source, tandis qu'un champ magnétique uniforme est appliqué localement dans la dernière partie du canal où se trouve la troisième source. Les fonctions spatiales définissant les ondulations des parois sont données comme suit : $F(x) = 1 - Amp(1 - \cos(\pi nx))$ pour la paroi supérieure et $F(x) = Amp(1 - \cos(\pi nx))$ pour la paroi inférieure. Le nanofluide Eau- Al_2O_3 , entre à une vitesse uniforme U_e et Température constante T_e .

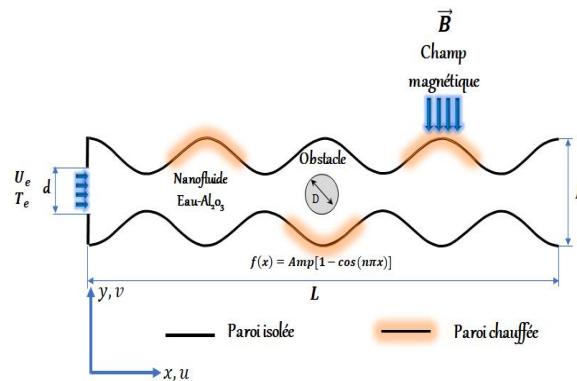


Figure 1 : *Domaine physique*

3. Formulation mathématique

Dans le but de simplifier le problème étudié, plusieurs hypothèses simplificatrices sont prises en considération : l'écoulement est bidimensionnel, laminaire avec aucune génération interne de chaleur et une dissipation visqueuse négligeable. Le nanofluide est considéré comme Newtonien avec des propriétés thermo-physiques constantes.

Pour écrire les équations de continuité, de mouvement et d'énergie sous forme adimensionnelle, on utilise les variables suivantes:

$$(X, Y) = \frac{(x, y)}{H}; (U, V) = \frac{(u, v)}{U_e}; P = \frac{p}{\rho_{nf} U_e^2}; \theta = \frac{T - T_e}{T_p - T_e}$$

3.1. Equation de continuité

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

3.2. Equations de quantité de mouvement

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\rho_f \mu_{nf}}{\rho_{nf} \mu} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - \frac{H_a^2 \sigma_{nf} \rho_f}{Re \sigma_f \rho_{nf}} U \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\rho_f \mu_{nf}}{\rho_{nf} \mu} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

3.3. Equation d'énergie

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{(\rho C_p)_f k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf} k_f} \frac{1}{Re Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) + \frac{\sigma_{nf} (\rho C_p)_f Ec H_a^2}{\sigma_f (\rho C_p)_{nf} Re} U^2 \quad (4)$$

Les conditions aux limites pour les équations (1) – (4) sont :

Entrée

$$U = 1 ; V = 0 \text{ et } \theta = 0 \quad (5)$$

Sortie

$$\frac{\partial U}{\partial X} = 0 ; V = 0 \text{ et } \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \quad (6)$$

Paroi inferieure

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial \theta}{\partial Y} = T_c & \text{Sous la source} \\ \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 & \text{Ailleurs} \end{array} \right. \quad (7)$$

Paroi supérieure

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial \theta}{\partial Y} = T_c & \text{Sous les sources} \\ \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 & \text{Ailleurs} \end{array} \right. \quad (8)$$

Le nombre de Nusselt local pour chaque source i est calculé comme suit :

$$Nu_i = \frac{qH/k_f}{T_p - T_e} = \frac{1}{\theta_p} \quad (9)$$

La chute de pression est définie comme suit :

$$\Delta P = \frac{P_{m(X=0)} - P_{m(X=L)}}{L} \quad (10)$$

Après l'adimensionnement des équations gouvernantes on a obtenu les nombres adimensionnels suivants :

$$Re = \frac{U_e H \rho_f}{\mu} ; Pr = \frac{\mu C_p f}{k_f} ; Ha = \left(\frac{\sigma_f}{\mu_f} B_0^2 H^2 \right)^{1/2} ; Ec = \frac{U_e^2}{C_p f \Delta T}$$

4. Modélisation numérique

La méthode des éléments finis (MEF) résiduels pondérés de Galerkin a été utilisée pour résoudre les équations gouvernantes et les conditions limites mentionnées ci-dessus. Étant donné que la MEF est utilisée pour résoudre le problème, la première étape consiste à spécifier le type de maillage. Le domaine géométrique a été transformé en un certain nombre d'éléments triangulaires non structurés et non uniforme avec des mailles plus fines localisées près des parois a été appliquée, avec un nombre total d'éléments de 60526. Le solveur PARDISO direct est sélectionné pour résoudre les champs dynamique et thermique. Afin de garantir des solutions convergées pour différentes études paramétriques un critère de convergence de 10^{-6} est appliqué.

Pour la validation du code de calcul, nous avons comparé les lignes de courant, isothermes et le nombre de Nusselt local avec ceux tracés par Shafqat et al. [9] dans une étude numérique qui consiste à étudier la convection mixte d'un nanofluide hybride Eau- Al_2O_3 -Cu s'écoulant à travers un canal ondulé ayant un obstacle circulaire. Les résultats de la validation présentés sur la Figure 2 et 3 sont en très bonnes concordance.

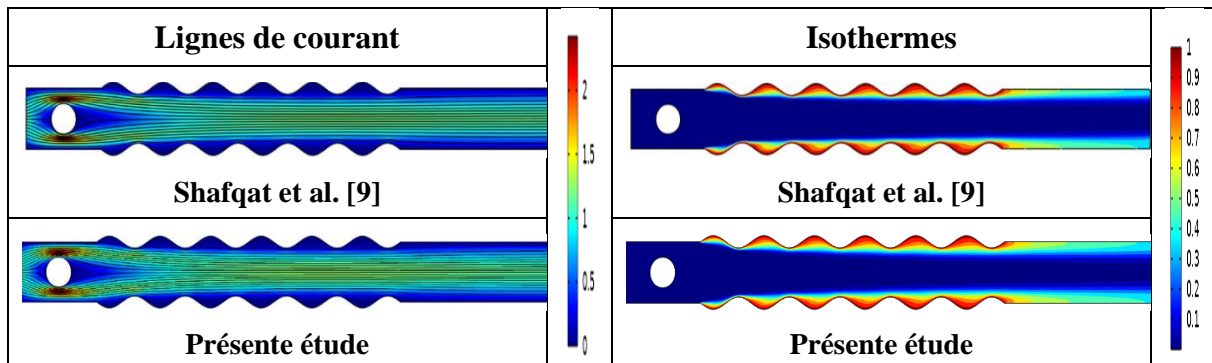


Figure 2 : Lignes de courant et isothermes à $Pr = 6.2$, $Ha = 50$ et $Re=100$

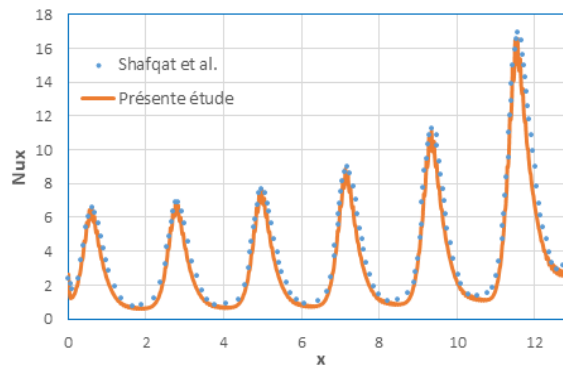


Figure 3 : Nombre de Nusselt local de la paroi ondulée à $Pr = 6.2$, $Ri = 1$, $Ha=50$ et $Re=100$

5. Résultats et discussion

Vu le nombre important de paramètres intervenant dans le présent travail, certains ont été variés alors que d'autres ont été maintenus fixes. L'intérêt a été porté sur les effets de l'intensité du champ magnétique exprimée par le nombre de Hartmann ($0 \leq Ha \leq 50$), le rayon de l'obstacle solide ($0.05 \leq R \leq 0.3$) et le taux d'ouverture à l'entrée du canal ($1/5 \leq AR = d/H \leq 1/2$). Le nombre de Reynolds a été fixé à $Re = 200$.

La Figure 4 illustre l'évolution des lignes de courant et des isothermes avec le nombre de Hartmann pour les différents rapports d'ouverture. A grande valeur de AR , le nanofluide s'écoule symétriquement par rapport à l'axe central du canal et se caractérise par la présence de deux zones de recirculation à l'entrée résultant de l'expansion de l'écoulement, et sa

déviations vers les parois inférieure et supérieure au niveau de l'obstacle favorisant ainsi le refroidissement de la seconde source de chaleur. Lorsque le rapport d'ouverture est réduit, le nanofluide est injecté à une plus grande vitesse et il est dévié vers la paroi supérieure conduisant alors à un meilleur échange de chaleur au niveau de la première source. L'impact du champ magnétique n'est perceptible que dans la zone de son application où l'accroissement de son intensité donne lieu à une distribution plus uniforme des lignes de courant et un meilleur refroidissement de la dernière source.

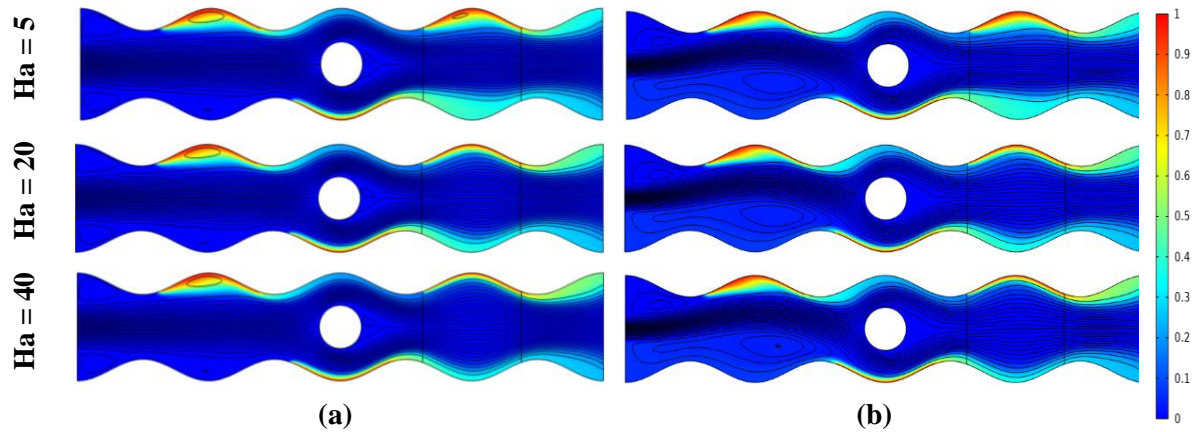


Figure 4 : Lignes de courant et isothermes pour différents Ha à $R=0.2$ (a) $AR = 1/2$, (b) $AR = 1/4$.

Les résultats de la Figure 5, montre que l'accroissement de la taille de l'obstacle solide affecte beaucoup plus la structure d'écoulement et les isothermes au niveau au centre du canal où il est placé. Ainsi augmenter R a pour conséquence la diminution de la section de passage du nanofluide près de la deuxième source donnant ainsi lieu à de forts gradients de vitesse et une réduction de l'épaisseur de la couche limite thermique qui favorisera le transfert thermique dans cette région.

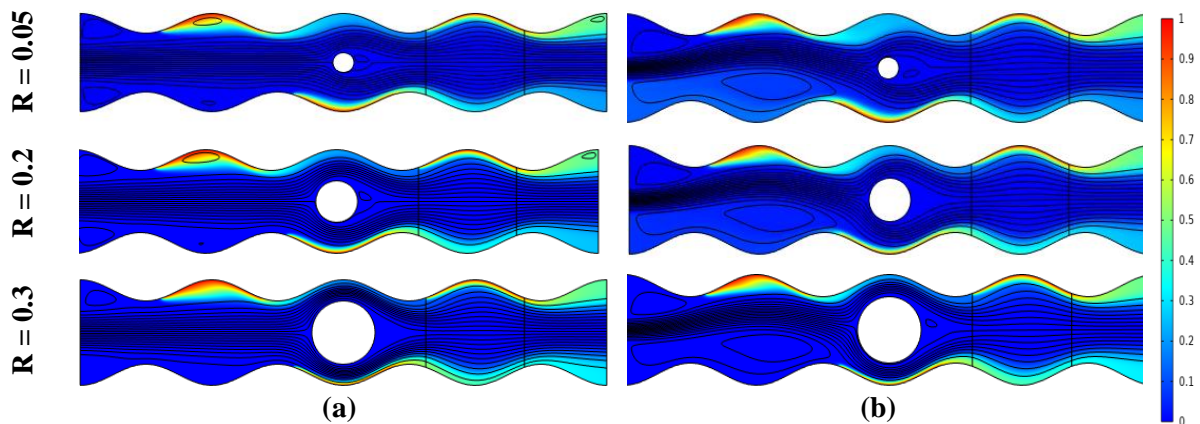


Figure 5 : Lignes de courant et isothermes pour différents R à $Ha = 30$ (a) $AR = 1/2$, (b) $AR = 1/4$.

On s'intéresse à présent aux évolutions du taux de transfert de chaleur avec les paramètres de contrôle de l'étude, à savoir Ha , AR et R . Il est à noter que le refroidissement de la première source de chaleur est beaucoup plus affecté par le taux d'ouverture du canal à l'entrée, la seconde par la taille de l'obstacle, alors que la dernière est fortement impactée par l'intensité du champ magnétique. A cet effet, un nombre de Nusselt global, défini comme étant la moyenne arithmétique des Nu moyens de chaque source, a été introduit. Les Figures 6 et 7 illustrent la variation de Nu_g avec le nombre de Hartmann pour différentes valeurs de AR et R . Il apparaît clairement que l'accroissement de ces paramètres affecte positivement le transfert de chaleur

dans le canal. Augmenter Ha , permet d'uniformiser l'écoulement et de faire parvenir plus de fluides à la troisième source comme il apparaît sur la Figure 4. Réduire la largeur de l'ouverture à l'entrée du canal fait dévier à grande vitesse le jet du nanofluide vers la première source, et finalement accroître le rayon de l'obstacle cylindrique donne naissance à de forts gradients de vitesse au voisinage de la deuxième source de chaleur favorisant ainsi son refroidissement.

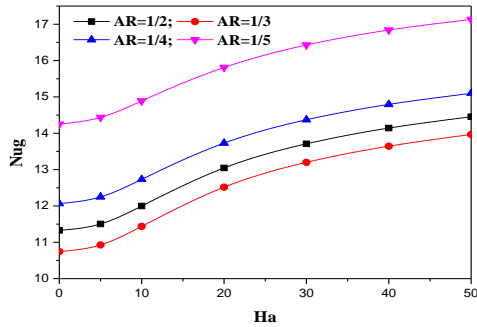


Figure 6 : Evolution du nombre de Nusselt global avec le nombre de Hartmann pour différents AR à $R=0.2$.

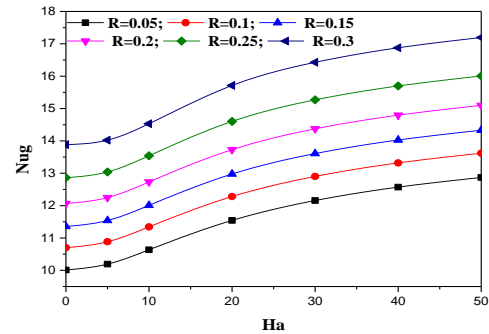


Figure 7 : Evolution du nombre de Nusselt global avec le nombre de Hartmann pour différents R à $AR=1/4$.

Les évolutions des chutes de pression dans le canal sont représentées sur les Figures 8 et 9. Accroître la magnitude de la force de Lorentz ou augmenter la taille de l'obstacle solide créé plus de résistance à l'écoulement du nanofluide, alors que diminuer la largeur d'ouverture à l'entrée a un impact positif sur ΔP . En effet, en réduisant AR la vitesse d'injection du nanofluide dans le canal augmente ce qui accélère le mouvement du fluide et diminue la chute de pression. Il est à noter aussi que l'effet résistif de la force de Lorentz est plus apparent puisqu'aux faibles rayons de l'obstacle les courbes sont sensiblement identiques.

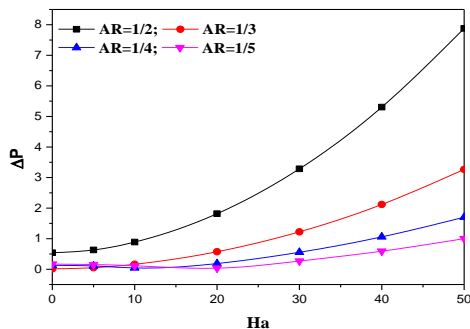


Figure 8 : Evolution de ΔP avec le nombre de Hartmann pour différents AR à $R=0.2$.

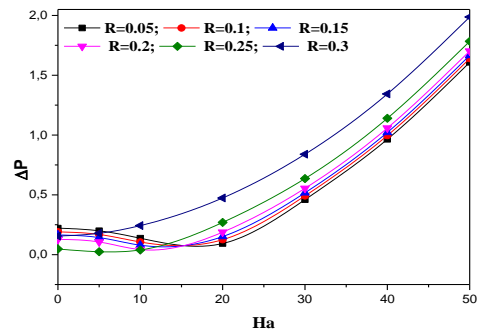


Figure 9 : Evolution de ΔP avec le nombre de Hartmann pour différents R à $AR=1/4$.

6. Conclusion

Le présent travail est une simulation numérique du transfert de chaleur par convection forcée d'un nanofluide Al_2O_3 /eau dans un canal à parois ondulées présentant un jet à l'entrée et équipé de trois sources de chaleur, maintenues à une densité de flux de chaleur constante, organisées alternativement sur les parois supérieure et inférieure. Un obstacle solide de section circulaire

est placé au centre, en présence d'un champ magnétique uniforme localisé sur la dernière partie du canal. Les résultats obtenus ont été exploités en mettant en évidence l'influence de certains paramètres pertinents tels que le taux d'ouverture à l'entrée du canal AR, le rayon de l'obstacle R et l'intensité du champ magnétique exprimée par le nombre de Hartmann Ha. Les principaux résultats de cette étude peuvent se résumer comme suit :

- L'augmentation du nombre de Hartmann améliore le transfert thermique et affecte sur la dernière source.
- Le rapport d'ouverture agit sur la première source et a un effet significatif sur les performances thermique.
- La réduction du rapport d'ouverture AR réduit efficacement la chute de pression.

Références

- [1] Mousavi SS, Hooman K. Heat and fluid flow in entrance region of a channel with staggered baffles. *Energy Convers Manag*, (2006), 47:2011–9.
- [2] Wu W, Ching CY. Laminar natural convection in an air-filled square cavity with partitions on the top wall. *Int J Heat Mass Transf*, (2010), 53:1759–72.
- [3] Deng QH, Zhou J, Mei C, Shen YM. Fluid, heat and contaminant transport structures of laminar double-diffuse mixed convection in a two-dimensional ventilated enclosure. *Int J Heat Mass Transf*, (2004), 47:5257–69.
- [4] Bahlaoui A, Raji A, Hasnaoui M, Naimi M, Makayssi T, Lamsaadi M. Mixed convection cooling combined with surface radiation in a partitioned rectangular cavity. *Energy Convers Manag*, (2009), 50:626–35.
- [5] Naphon P, Nakharintr L, Wiriyasart S. Continuous nanofluids jet impingement heat transfer and flow in a micro-channel heat sink. *Int J Heat Mass Transf*, (2018), 126:924–32.
- [6] Rashidi S, Mahian O, Languri EM. Applications of nanofluids in condensing and evaporating systems: a review. *J Therm Anal Calorim*, (2018), 131:2027–39.
- [7] Rashidi S, Karimi N, Mahian O, Esfahani JA. A concise review on the role of nanoparticles upon the productivity of solar desalination systems. *J Therm Anal Calorim*, (2019), 135:1145–59.
- [8] Mahian O, Kolsi L, Amani M, Estelle P, Ahmadi G, Kleinstreuer C, Marshall JS, Siavashi M, Taylor RA, Niazmand H, Wongwises S, Hayat T, Kolanjiyil A, Kasaeian A, Pop I. Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-part I: *fundamental and theory*. *Phys Rep*, (2019), 790:1–48.
- [9] S. Hussain, M. Jamal, C. Maatki, K. Ghachem, L. Kolsi, MHD mixed convection of Al₂O₃-Cu-water hybrid nanofluid in a wavy channel with incorporated fixed cylinder, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144 (2021), 2219-2233.
- [10] V. M. Job, S. R. Gunakala, Numerical study on mixed convective flow of water-based magnetite nanofluid through a wavy channel containing porous blocks under the effect of an oscillating magnetic field, *Journal of applied Mathematics and Mechanics*, 101 (2021), ZAMM E202000254.
- [11] L. Kolsi, F. Selimefendigil, K. Ghachem, T. Alqahtani, S. Algarni, Multiple impinging jet cooling of a wavy surface by using double porous fins under non-uniform magnetic field, *Mathematics*, 10 (2022), 638.
- [12] M. M. Ali, S. Rushd, R. Akhter, M. A. Alim, Magneto-hydrodynamic mixed convective heat transfer in a nanofluid filled wavy conduit with rotating cylinders, *Alexandria Engineering Journal*, 29, (2022), 486-501.
- [13] R. Akhter, M. M. Ali, M. A. Alim, Magnetic field impact on double diffusive mixed convective hybrid-nanofluid flow and irreversibility in porous cavity with vertical wavy walls and rotating solid cylinder, *Results in Engineering*, 19 (2023), 101292.