

ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA CONVECTION FORCÉE 3D AVEC GÉNÉRATION D'ENTROPIE DANS UNE ENCEINTE CUBIQUE REMPLIE D'UN NANOFLUIDE

I. ZEGHBID*, R. BESSAÏH

Laboratoire d'Energétique Appliquée et de Pollution (LEAP), Département de Génie Mécanique,
Université des Frères Mentouri-Constantine, Route de Ain El. Bey, Constantine 25000, Algérie.

*Auteur correspondant : ze.ilhem@gmail.com

RÉSUMÉ

Les effets du nanofluide sur la convection forcée laminaire et de la génération d'entropie dans une cavité cubique avec une paroi supérieure mobile sont étudiés dans le présent document. Le schéma numérique est basée sur la méthode des volumes finis avec l'algorithme SIMPLE, un calcul parallèle a été effectué par le logiciel ANSYS FLUENT 14.0. Les résultats numérique montrent que l'augmentation du nombre de Reynolds augmente la génération d'entropie, tandis que l'incorporation des nanofluides dans le fluide de base minimise considérablement la génération d'entropie.

Mots Clés: *Nanofluide, Génération d'entropie, Convection forcée.*

NOMENCLATURE

Symboles :

L	longueur de la cavité, m
Ra	nombre de Rayleigh
Re	nombre de Reynolds, ($Re = \rho_f U_0 L / \mu_f$)
Sf	génération d'entropie due au frottement
Sh	génération d'entropie due à la chaleur
St	entropie totale, J/kg.K
T	température, K
U_0	vitesse de la paroi supérieure de la cavité, m/s
u, v, w	composantes de la vitesse, m.s ⁻¹
x, y, z	coordonnées cartésiennes, m

Lettres grecques :

α	diffusivité thermique, m ² s ⁻¹
ϕ	fraction volumique du solide
μ	viscosité dynamique, kg m ⁻¹ s ⁻¹
ρ	masse volumique, Kg/m ³

Indices / Exposants :

c	paroi froide
f	fluide de base (eau)
h	paroi chaude
nf	nanofluide

1. INTRODUCTION

Le transfert de chaleur par convection forcée dans une cavité cubique a un intérêt dans de nombreuses applications technologiques, tels que les récepteurs solaires, les chaudières, les réacteurs nucléaires et les centrales électriques [1-3]. la plupart des fluides traditionnels, tel que l'eau, l'éthylène de glycol et de l'huile, ont des capacités limitées de transfert de chaleur. Avec les nanofluides, l'idée est alors d'insérer, au sein du fluide de base, des nanoparticules afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange. La tendance contemporaine dans le domaine du transfert thermique est orientée vers le deuxième principe de la thermodynamique et le concept de la minimisation de la génération d'entropie, une étude sur la convection

forcée laminaire d'un nanofluide Al_2O_3 dans un tube chauffé uniformément a été effectuée, les résultats ont clairement révélé que l'ajout de nanoparticules a produit une remarquable augmentation du transfert de chaleur [4]. Un travail numérique exécuté sur l'amélioration du transfert de chaleur et de la production d'entropie d'un nanofluide sous un flux convectif laminaire dans des microcanaux, les résultats ont révélé que les microcanaux avec cylindre ont la meilleure performance de transfert de chaleur surtout au plus grand nombre de Reynolds [5]. Une étude analytique effectuée sur la première et la deuxième loi de la thermodynamique de la convection forcée entièrement développée à l'intérieur d'un conduit rectangulaire poreux saturé, ils ont employé le modèle de Darcy-Brinkman, cette étude a permis de comparer et évaluer les termes de transfert de chaleur, la chute de pression et la génération d'entropie [6]. La génération d'entropie due à l'écoulement et le transfert de chaleur de nanofluide entre deux cylindres en co-rotation a été faite, les résultats présentés ont montré que le nanofluide TiO_2 -eau est le plus approprié que Al_2O_3 -eau à faible nombre de Brinkman [7]. Une analyse sur le problème du transfert de chaleur par convection mixte et de l'entropie pour l'écoulement des nanofluides dans une cavité ouverte a été opérée, les résultats ont montré l'ajout de nanoparticules modifie le comportement de l'écoulement ce qui réduit son intensité et augmente l'épaisseur de la couche limite thermique [8]. Une analyse sur la génération d'entropie des nanofluides pour deux types d'écoulement laminaire et turbulent a été procédée, on trouve dans le cas laminaire le taux de génération d'entropie est toujours supérieure à l'unité et augmente avec la fraction volumique, le comportement est contraire pour l'écoulement turbulent.

L'objectif de la présente étude est d'étudier la convection forcée laminaire et la génération d'entropie dans une cavité cubique avec un couvercle mobile, remplie d'un nanofluide Cu-eau. Les effets du nombre de Reynolds ($Re=100, 500$ et 1000) et de la fraction volumique du nanofluide ($0 \leq \phi \leq 0.20$) sur la génération d'entropie est étudiée en détail.

2. MODELE MATHEMATIQUE

La géométrie considérée dans cette étude est une enceinte illustrée sur la figure 1. La paroi mobile supérieure se déplace avec une vitesse uniforme U_0 est maintenue à une température froide $T_c=300$ K, la paroi inférieure est chauffée à une température de $T_h=310$ K. Les autres parois sont maintenues adiabatiques. Nous supposons que l'écoulement est laminaire, incompressible, Newtonien et visqueux.

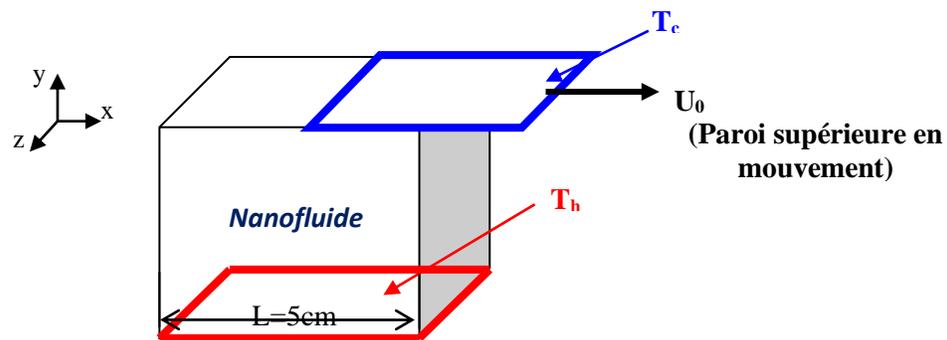


FIGURE 1. Cavité cubique remplie d'un nanofluide Cu-eau. La dimension de la cavité est $L \times L \times L$.

Les équations dimensionnelles régissant l'écoulement, s'écrivent comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

(1)

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

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

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{nf} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right] \quad (4)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$S_{gen} = \frac{k_{nf}}{k_f} \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right] + \quad (6)$$

$$\varphi \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{X}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Y}} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{Y}} + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{X}} \right)^2 \right\} = Sh + Sf$$

Les conditions aux limites sont présentées pour notre étude sous forme dimensionnelle, comme suit :

A $x=0$ m : $u=v=w=0$ m/s, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ (paroi isolée)

A $x=L=0.05$ m : $u=v=w=0$ m/s, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ W/m² (paroi isolée)

A $y=0$ m : $u=v=w=0$ m/s, $T=Th=310$ K.

A $y=L=0.05$ m : $u=U_0$, $v=w=0$ m/s, $T=TC=300$ K.

A $z=0$ m : $u=v=w=0$ m/s, $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ W/m² (paroi isolée)

A $z=L=0.05$ m : $u=v=w=0$ m/s, $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ W/m² (paroi isolée)

La masse volumique, la viscosité, la capacité calorifique ainsi que la conductivité thermique des nanofluides sont calculées selon les expressions suivantes :

$$\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_s, \mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}}, (\rho C_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s, k_{nf} = k_f \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)}$$

La méthode numérique des volumes finis, développée par Patankar [10], a été employée pour discrétiser les différentes équations du modèle mathématique. Un maillage de 70×70×70 nœuds a été choisi pour faire les calculs nécessaires à la résolution de ces équations, puisqu'il est considéré pour avoir le meilleur compromis entre temps de calcul et précision (voir tableau 1). L'algorithme SIMPLE a été utilisé pour la résolution du couplage vitesse - pression, et la performance du logiciel ANSYS 14.0 a été testée par comparaison avec les résultats disponibles dans la littérature [11] (figure 2).

Maillage (x,y,z-)	Entropie totale St (J/kg.K)
40×40×40 nœuds	46.248
60×60×60 nœuds	37.895
70×70×70 nœuds	36.787
80×80×80 nœuds	36.046

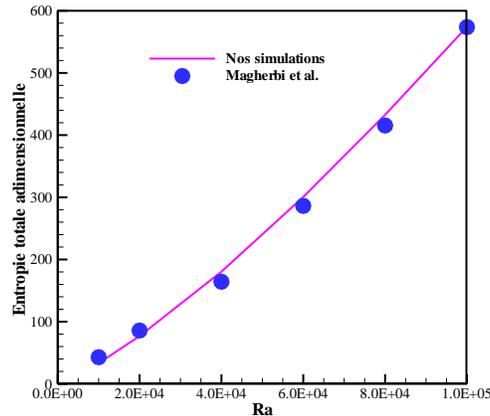
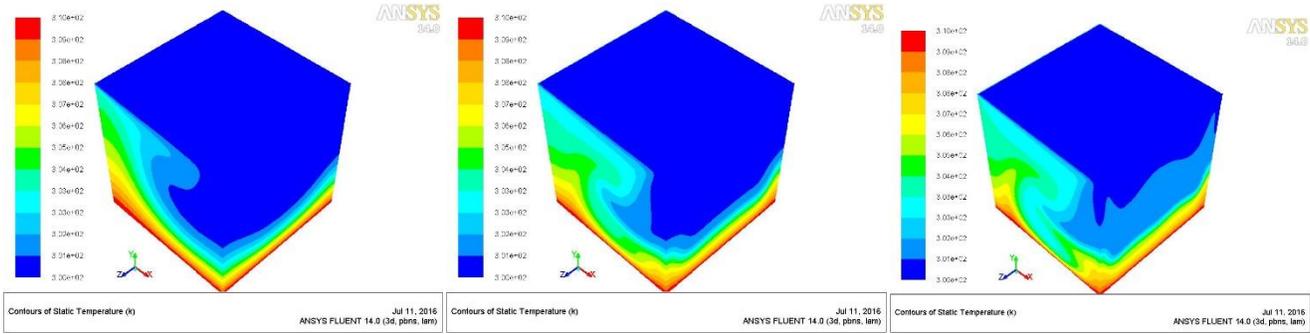
TABLEAU 1. Effet du maillage ($\phi=0$, $Re=1000$)

FIGURE 2. Variation de l'entropie totale adimensionnelle avec le nombre de Rayleigh ($Ra= 1 \times 10^4$, 2×10^4 , 4×10^4 , 6×10^4 and 8×10^4) à $\phi=3 \times 10^{-3}$: Comparaison entre nos résultats et ceux de M. Megherbi et al. [11].

3. RESULTATS

3.1 EFFET DU NOMBRE DE REYNOLDS, GENERATION D'ENTROPIE ET NANOFUIDE SUR L'ÉCOULEMENT ET LE CHAMP THERMIQUE

Dans le but d'étudier la convection forcée dans une cavité cubique ($L \times L \times L$) avec $L=5\text{cm}$, munie d'un couvercle mobile rempli d'un nanofluide Cu-eau, des simulations ont été accomplies pour $Re=100$, 500 et 1000 , pour voir l'effet du nombre de Reynolds sur la structure de l'écoulement et du transfert de chaleur. Nous pouvons voir un gradient de température assez grand dans le voisinage de la paroi chaude inférieure, une présentation accentué des isothermes a été apparu et qui devient de plus en plus importante au fur et à mesure le nombre de Reynolds augmente de 10% (figure3). La figure 4 présente les contours de l'accélération rapide de la génération d'entropie au sein de la cavité cubique sous l'effet de l'accroissement de l'écoulement, aussi la figure 5 qui expose clairement que l'ajout du nanoparticule (du 0% à 20%) au fluide de base provoque une minimisation de la génération d'entropie, donc l'augmentation de la fraction volumique du nanofluide est un facteur amortisseur pour la génération d'entropie. Aussi il est bien à noter que lorsque en augmente du nombre de Reynolds, les particules du nanofluide subies une accélération ce qui a montré le profil de vitesse au milieu de la cavité (figure6). Les figures 7 et 8 prouvent que l'incorporation croissante de la nanoparticule augmente la température du fluide, tandis que l'accélération de l'écoulement et l'augmentation de la vitesse, la température subit une diminution, alors pour réduire la production d'entropie totale lorsque la vitesse est maintenue constante ($Re=500$), une importante concentration des nanoparticules est nécessaire. Donc les résultats de simulation ont révélé que les performances de transfert de chaleur augmentent en raison de l'accélération de l'écoulement. La présence de nanoparticules dans un fluide de base a produit une augmentation considérable de la génération d'entropie et du transfert de chaleur. En outre montrent aussi que l'amélioration produit de la génération d'entropie et du transfert thermique augmente considérablement avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

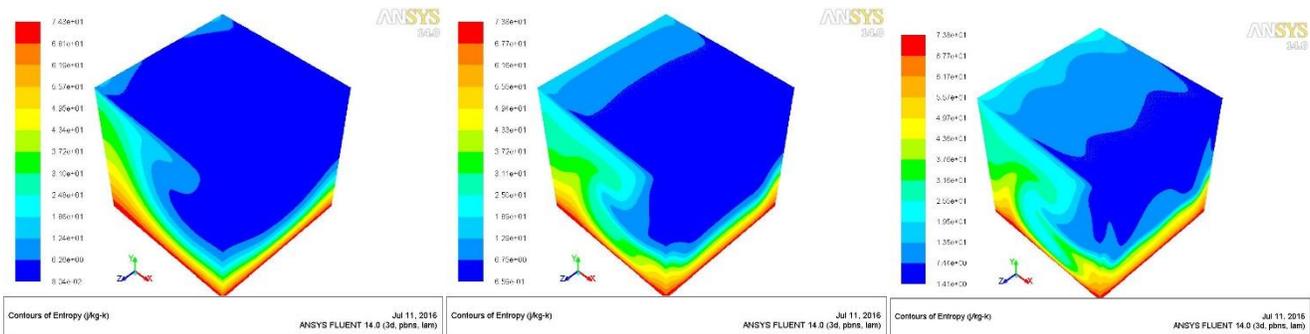


(a) Re=100

(b) Re=500

(c) Re=1000

FIGURE 3. Isothermes dans la cavité pour différentes valeurs de Reynolds ($\phi=0.10$, cu-eau nanofluide).



(a) Re=100

(b) Re=500

(c) Re=1000

FIGURE 4. Entropie génération dans la cavité pour différentes valeurs de Reynolds ($\phi=0.10$, cu-eau nanofluide).

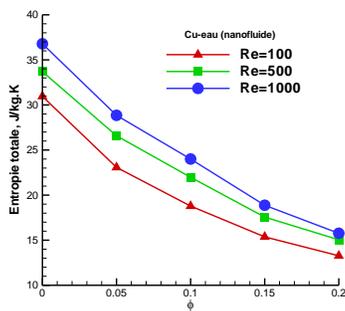


FIGURE 5. Variation de l'entropie totale St en fonction de la concentration ϕ pour différentes valeurs de Reynolds Re .

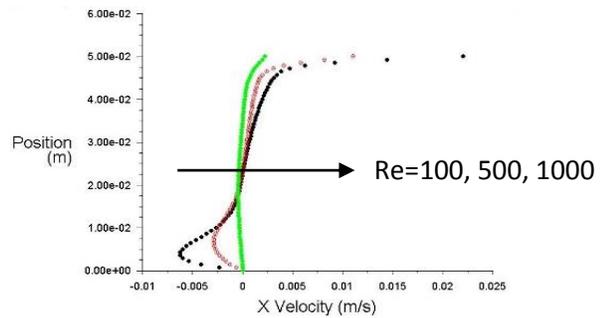


FIGURE 6. Profils de la vitesse u (m/s) pour différents valeurs de Re au milieu de la cavité ($\phi=0.10$ cu-eau nanofluide)

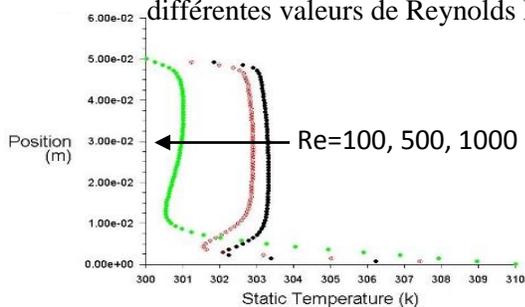


FIGURE 7. Profils de la température T (K) pour différents valeurs de Re au milieu de la cavité ($\phi=0.10$ cu-eau nanofluide)

467

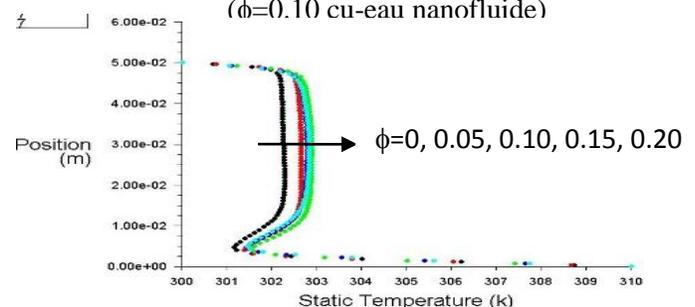


FIGURE 8. Profils de la température T (K) pour différents valeurs de $\phi=0.10$ au milieu de la cavité ($Re=500$)

4. CONCLUSIONS

Cette étude a fourni un aperçu clair sur le comportement thermique d'un nanofluide dans une cavité cubique. Les avantages et les inconvénients de la présence de nanoparticules, qui augmentent le transfert de chaleur, ainsi que la perte d'énergie par le système. Les résultats trouvés peuvent facilement être mis à profit pour divers transferts de chaleur pratique et les applications thermiques pour parvenir à une progression dynamique dans le domaine du transfert de chaleur à l'échelle nano.

REFERENCES

- [1] E. G. Fisher, *Extrusion of plastics*, Wiley, New York, 1976.
- [2] T. Altan, S.O.H., Gegel, *Metal forming fundamentals and applications*, *American Society Of Metals, Metals Park, OH*, 1979.
- [3] Z. Tadmor, I. Klein, *Engineering principles of plasticating extrusion*, *Polymer Science And Engineering Series, Van Nortrand Reinhold*, New York, 1970.
- [4] S. Maïga, S. Palm, C. Nguyen, G. Roy and N. Galanis, Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26, 530-546, 2005.
- [5] P. Li, Y. Xie, D. Zhang and G. Xie, Heat transfer enhancement and entropy generation of nanofluids laminar convection in microchannels with flow control devices, *Entropy*, 18, 134, 2016.
- [6] K. Hooman, H. Guergenci and A. Merrikh, Heat transfer and entropy generation optimization of forced convection in a porous-saturated duct of rectangular cross-section, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 2051-2059, 2007.
- [7] O. Mahian, S. Mahmud and S. Heris, Analysis of entropy generation between co-rotating cylinders using nanofluids, *Energy*, 44, 438-446, 2012.
- [8] Z. Mehrez, M. Bouterra, A. El Cafsi and A. Belghith, Heat transfer and entropy generation analysis of nanofluids flow in a open cavity, *Computers & Fluids*, 88, 363-373, 2013.
- [9] P. Sing, K. Anoop, T. Sundararajan and S. Das, Entropy generation due to flow and heat transfer in nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 4757-4767, 2010.
- [10] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer*, McGraw Hill, 1980.
- [11] M. Magherbi, H. Abbassi and A. BenBrahim, Entropy generation at the onset of natural convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 3441-3450, 2003.