

Simulation numérique du transfert thermique entre un fluide en écoulement pulsé et un solide soumis à une condition périodique de température

Youcef BENAKCHA^{1*}, Abderrahmane GHEZAL^{1**}, Jean Claude LORAUD²

¹ Faculté de Physique, B.P. Box 32, USTHB. El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie

² Inst. Univ. des Sys Ther. Ind, CNRS, U.M.R. 6595, Marseille, France.

* galaxie92550@yahoo.com

** abdghezal@yahoo.fr

Résumé- Ce travail s'intéresse à une étude numérique du transfert thermique entre un solide chauffé et un écoulement pulsé. Un schéma implicite aux différences finies a été utilisé pour résoudre les équations régissant le phénomène physique. Le calcul a été effectué par variation de différents paramètres de l'étude ; à savoir le nombre de Reynolds cinétique variant de 0 à 1000, l'amplitude fixée à $A_w = 0.75$ et le rapport des conductivités thermiques pris dans la gamme $[10^{-3}, 10^3]$. Le fluide utilisé est l'air avec ($Pr=0.7$). Les rapports de forme étudiés sont ($L/R = 4$ et $r_s/R = 0,3125$). L'influence de la fréquence sur l'évolution temporelle de la température montre que l'amplitude de la température diminue au fur et à mesure que la fréquence augmente. On constate également que le gradient radial de la température à la paroi chauffée est d'autant plus grand que la fréquence est grande et que le nombre de Nusselt local augmente lorsque la fréquence de pulsation augmente

Nomenclature

A_w : Amplitude de pulsation de la vitesse axiale

A_0 : Gradient de pression stationnaire (N/m^3)

A_1 : Amplitude de gradient de pression instationnaire

k : Conductivité thermique ($W/m.K$)

L : Longueur (m)

P : Pression. (N/m^2)

Nu : Nombre de Nusselt local

Pr : Nombre de Prandtl (ν/κ)

R : Rayon de la conduite (m)

r : Coordonnée radiale

Re : Nombre de Reynolds ($w_m R/\nu$)

Re_ω : Nombre de Reynolds cinétique ($R^2 \omega/\nu$)

T : Température

t : Temps

u, w : Coordonnées radiale et axiale de la vitesse

w_m : Vitesse moyenne (m/s)

z : Coordonnée axiale

Symboles grecs

θ : Température adimensionnelle

ν : Viscosité cinématique (m^2/s)

ω : Fréquence adimensionnelle

ε : Taux d'amplitude

Indices

f : Fluide

m : Moyen

s : Solide

0 : Composante stationnaire

1 : Composante oscillatoire

e : Entrée

(*) Variable dimensionnelle (utilisée pour $r, z, t,$

u, w, θ et p).

1. Introduction

Le transfert de chaleur en écoulement pulsé a fait l'objet de nombreux travaux analytiques, expérimentaux et numériques en raison de son importance dans de nombreux domaines technologiques. Parmi les travaux relatifs à ce sujet, on cite les travaux effectués par Richardson et Tyler[1] qui ont été les premiers à mettre en évidence par des mesures expérimentales l'existence d'un effet annulaire dans les profils de vitesse et de température. Par la suite, plusieurs études ont été effectuées pour décrire les écoulements de type

oscillatoire et pulsé. Womersley[2] et Uchida[3] ont vérifié analytiquement l'existence de l'effet annulaire. Ils ont aboutit à des solutions exactes et à des résultats intéressants relatives au champ de vitesse. Seigel et Perlmutter [4] ont démontré que le transfert de chaleur dépend explicitement de la fréquence des pulsations. Ils ont obtenu des résultats importants relatifs au champ de température et au taux du transfert de chaleur. Dans le présent travail, on s'intéresse à l'étude du mécanisme du transfert de chaleur entre un écoulement pulsé et un solide chauffé.

2. Formulation du problème

La configuration géométrique ainsi que les dimensions du domaine étudié sont présentées sur la figure 1.

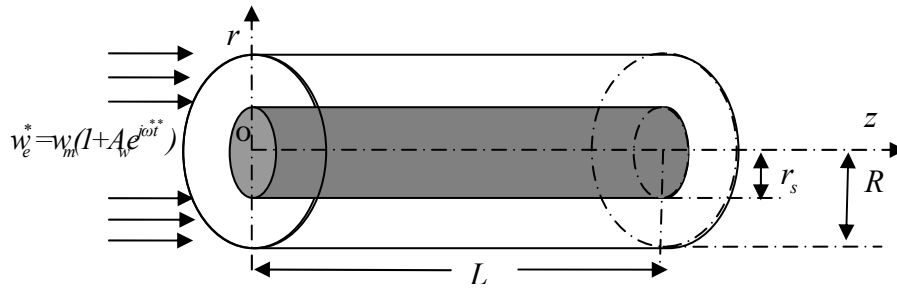


Figure 1. Schéma du système physique étudié

Le cylindre est initialement chauffé à une température $T_s^* = 400K$, le fluide visqueux se trouve initialement au repos et à la température ambiante $T_0^* = 300K$ est pulsé à partir de l'entrée de la conduite avec une vitesse axiale et périodique w_e^* donnée par :

$$w_e^* = w_m (1 + A_w e^{j\omega t^*}) \quad (1)$$

L'écoulement est supposé laminaire, incompressible et axisymétrique. L'effet de la gravitation est négligé. Les propriétés thermo-physiques du fluide sont considérées constantes. En tenant compte de ces hypothèses, les équations de conservation de la masse, de la quantité du mouvement et de l'énergie régissant le phénomène s'écrivent sous formes adimensionnelles comme suit:

$$\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (ru) \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \left(\nabla^2 u - \frac{u}{r^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \nabla^2 w \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial r} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{PrRe} \nabla^2 \theta \quad (5)$$

Ceci par l'utilisation des variables adimensionnelles définies comme suit :

$$u = \frac{u^*}{w_m} ; w = \frac{w^*}{w_m} ; t = t^* \frac{w_m}{R} ; \theta = \frac{T^* - T_0^*}{T_0^*} ; p = \frac{P^*}{\rho w_m^2} ; z = \frac{z^*}{R} ; r = \frac{r^*}{R} ;$$

Du fait que le profil de vitesse est supposé complètement développé et celui de la température en développement, le gradient axial de pression peut se mettre sous la forme:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = - \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_s (1 + \varepsilon e^{j\omega t}) = -(A_0 + A_1 e^{j\omega t}) \quad (6)$$

Conditions aux limites

-A l'entrée : $w(0, r, t) = (1 + A_w e^{j\omega t})$; $u(0, r, t) = 0$; $\theta(0, r, t) = 0$ (7)

-A la sortie : $\frac{\partial w}{\partial z}(\frac{L}{R}, r, t) = 0$; $\frac{\partial u}{\partial z}(\frac{L}{R}, r, t) = 0$; $\frac{\partial \theta}{\partial z}(\frac{L}{R}, r, t) = 0$ (8)

-A la paroi de la conduite : $w(z, 1, t) = 0$; $u(z, 1, t) = 0$; $\frac{\partial \theta}{\partial r}(z, 1, t) = 0$ (9)

-A la paroi du solide chauffé: $w(z, \frac{r_s}{R}, t) = 0$; $u(z, \frac{r_s}{R}, t) = 0$; $\theta(z, \frac{r_s}{R}, t) = \theta_s = 1/3$ (10)

3. Etude numérique

La discrétisation des équations précédentes à l'aide d'une méthode implicite aux différences finies conduit à un système d'équations algébriques résolue en utilisant la méthode itérative de Gauss-Seidel avec un coefficient de relaxation. La procédure itérative est supposée convergente lorsque : $max(|L_u|, |L_w|, |L_\theta|, |D|) < \varepsilon$, où L_u, L_w, L_θ, D représentent des opérateurs de différences relatifs au système d'équations correspondant respectivement aux variables du problème u, w, p et θ et ε est pris de l'ordre de 10^{-3} selon le cas considéré. Le code a été validé avec les résultats des travaux [5-6] (voir Figure.2et3). Le maillage retenu est de 48 nœuds suivant la direction r et 192 nœuds dans la direction z avec un pas constant : $\Delta r = \Delta z = 1/48$.

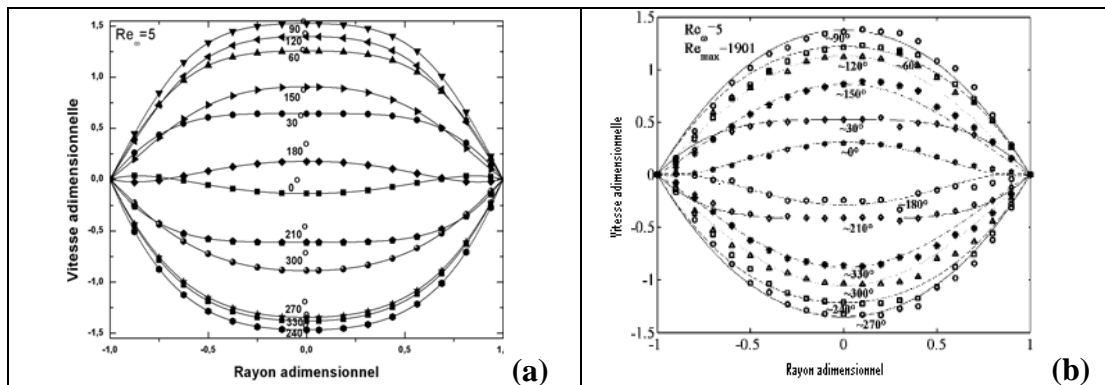


Figure. 2 Profil radial de la composante axiale de vitesse
(a) présent travail ; (b) résultats de Bouvier et al (2000)

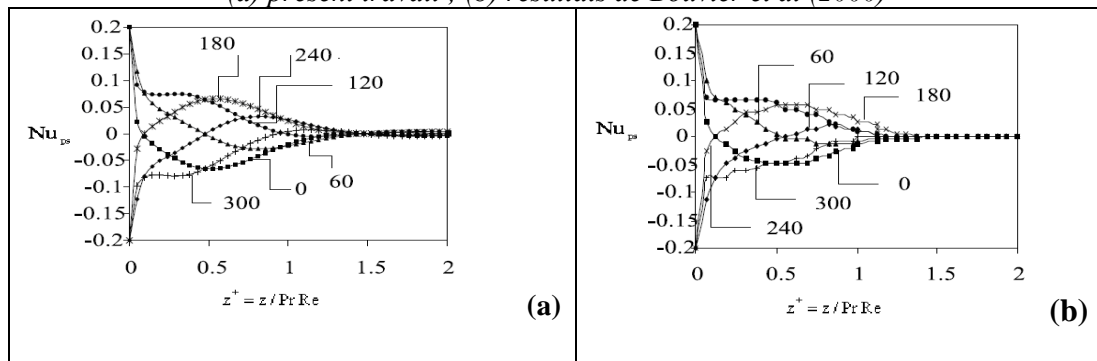


Figure .3 Variation du Nu_{ps} en fonction de la variable z
(a) présent travail ; (b) résultats de Kim et al [1993]

4. Résultats et discussion

L'influence de la fréquence adimensionnelle Re_ω sur le champ thermique a été étudiée pour un nombre de Reynolds $Re = 100$, une amplitude de pulsation $A_w = 0.75$ et un nombre de Prandtl $Pr = 0.7$. La figure 4 illustre l'influence de la fréquence sur l'évolution temporelle de la température aux points $(0.25, 0.3541)$ et $(2, 0.3541)$ se trouvant respectivement à l'amont

et au centre de l'espace annulaire et près de la paroi chauffée. D'après cette figure on constate que l'amplitude de la température diminue lorsque la fréquence augmente. On remarque également que plus la fréquence de pulsation augmente plus la période diminue et que le nombre de cycle augmente. Par conséquent, l'amplitude de la température augmente et ce lorsque on avance en aval de la conduite dans l'espace annulaire.

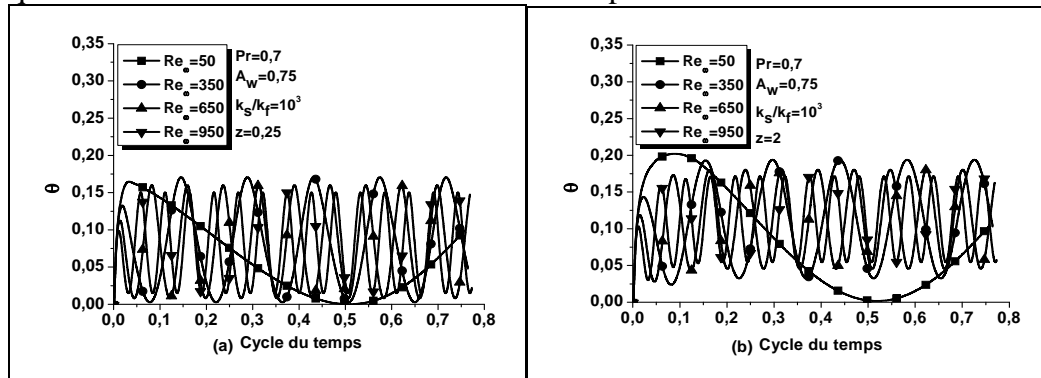


Figure 4. Effet de la fréquence sur l'évolution temporelle de la température aux points (a) ($z=0.25, r=0.3541$) et (b) ($z=2, r=0.3541$)

L'effet de la fréquence sur le profil radial de la température est illustré sur la figure 5. D'après cette figure, on constate que la température adimensionnelle du fluide prend sa valeur maximale au voisinage immédiat de la paroi chauffée, puis elle décroît jusqu'à atteindre sa plus basse valeur près de la paroi adiabatique de la conduite. On constate également que le gradient radial de la température près de la paroi du solide et à $z=0.25$ et $z=2$ est d'autant plus grand que la fréquence augmente. On constate qu'au voisinage de la paroi chauffée que la température du fluide est d'autant plus élevée que la fréquence est faible.

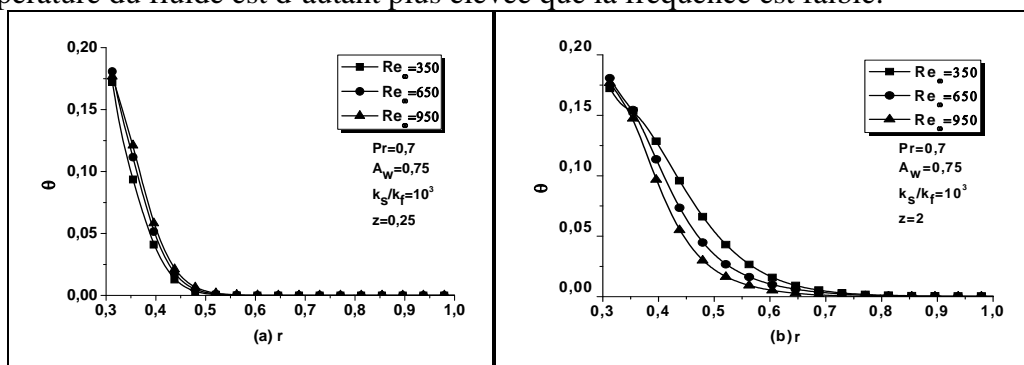


Figure 5 : Effet de la fréquence sur le profil radial de la température dans l'espace annulaire à la phase 90°

La figure 6 illustre l'évolution temporelle de l'écart du nombre de Nusselt $\Delta Nu = Nu - Nu_0$ le long de la paroi horizontale du solide dans l'espace annulaire de la conduite et pour différentes valeurs de nombre de Reynolds cinétique ($Re_\omega = 50; 350; 650$ et 950). D'après cette figure on constate que pour toutes les fréquences, l'amplitude du nombre de Nusselt local augmente au fur et à mesure que la fréquence de pulsation augmente. Ceci entraîne une augmentation du transfert de chaleur. Pour étudier l'influence du rapport des conductivités thermiques k_s/k_f sur le transfert thermique, des calculs ont été menés pour un nombre de Reynolds cinétique $Re_\omega = 950$, un nombre de Prandtl $Pr=0.7$ et un rapport des conductivités thermique tel que $10^{-3} \leq k_s/k_f \leq 10^3$. On signale que les faibles valeurs du rapport des conductivités correspondant au cas de certains milieux poreux dont la porosité est très proche de l'unité et qui peuvent être considérés comme non poreux. Concernant la variation de la température à l'intérieur du solide nous avons opté pour une corrélation empirique

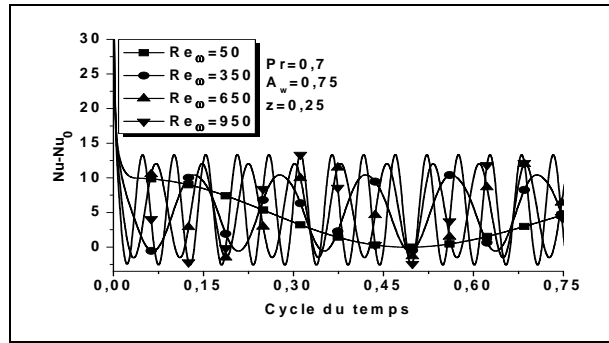


Figure 6. Effet de la fréquence sur le nombre de Nusselt local d'après les résultats des travaux [7]

$$\theta_s = \frac{1}{2} \left(\theta_s(0) - \frac{\Delta\theta_s}{(1 + k_s/k_f)} \right) (1 + \cos\omega t) \quad (11)$$

Où $\Delta\theta_s = \theta_s(0) - \theta_s$, avec $\Delta\theta_s = 10^{-1}$.

L'effet du rapport des conductivités sur le profil radial de la température est illustré sur la figure 7, où on constate que pour les faibles rapports des conductivités thermiques ($k_s/k_f = 10^{-3}$) le solide cède beaucoup plus de la chaleur au fluide que pour les grandes valeurs des rapports des conductivités ($k_s/k_f = 10^3$). On constate aussi que l'effet annulaire est beaucoup plus accentué dans le cas de présence d'échange thermique que dans le cas d'égalité de conductivité ($k_s/k_f = 1$). L'effet du rapport des conductivités thermiques sur le

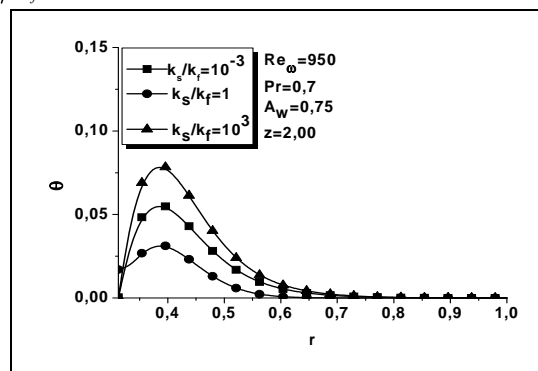


Figure 7. Effet du rapport k_s/k_f sur le profil radial de la température

nombre de Nusselt local est illustré sur la figure 8. L'analyse des courbes du nombre de Nusselt local en fonction de la variable (z), montre que ce dernier prend une valeur maximale, puis elle décroît jusqu'à atteindre sa valeur asymptotique à des positions situées loin de la section d'entrée de l'espace annulaire. Cette valeur est d'autant plus grande que le rapport des conductivités thermiques k_s/k_f est élevé.

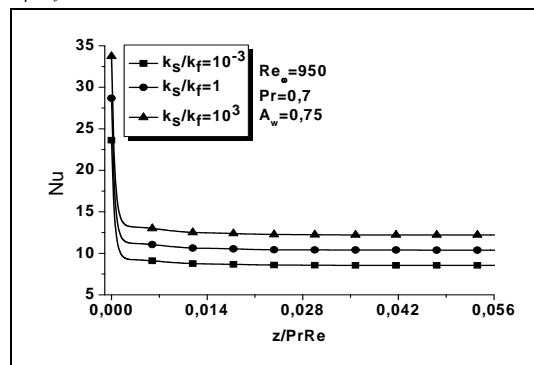


Figure 8. Effet du rapport k_s/k_f sur le nombre de Nusselt local

Les transferts de chaleurs obtenus pour différents cas du rapport des conductivités sont comparés avec ceux obtenus par les auteurs [8] sont résumés dans le tableau suivant :

Rapport k_s/k_f	\overline{Nu} (Présent travail)(a)	Rapport k_s/k_f	\overline{Nu} Résultats de[8](b)
$k_s/k_f = 10^{-3}$	12,27	-	-
$k_s/k_f = 1$	14,90	$k_s/k_f = 1$	21.05
$k_s/k_f = 10^3$	17,52	$k_s/k_f = 300$	22.82

Tableau 1. Nusselt moyen à différentes valeurs du rapport des conductivités thermiques
a) Présent travail ; b) Résultat de Choukairy et al

On remarque que les résultats de la présente étude sont qualitativement comparables avec ceux donnés par la référence [8] en signalant toutefois que l'écart relatif est de l'ordre de 25%. Ils indiquent clairement la croissance du transfert de chaleur lorsque le rapport des conductivités thermiques augmente.

5. Conclusion

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude du transfert thermique entre un écoulement pulsé et un solide chauffé dans une conduite cylindrique. L'influence des différents paramètres relatifs à l'écoulement a été étudiée. L'influence du nombre de Reynolds cinétique Re_w sur l'évolution temporelle de la température montre que l'amplitude de la température diminue lorsque la fréquence augmente ainsi que le gradient de la température est augmenté aussi avec la fréquence. On constate aussi que l'amplitude du nombre de Nusselt local augmente avec l'augmentation de la fréquence de pulsation. Ceci entraîne une augmentation du transfert de chaleur. Concernant l'effet du rapport des conductivités sur le profil radial de la température on constate que pour les faibles valeurs de rapports des conductivités thermiques le solide cède beaucoup plus de la chaleur au fluide que pour les grandes valeurs. On constate que l'effet annulaire est beaucoup plus accentué dans le cas de présence d'échange thermique que dans le cas d'égalité de conductivité. Finalement, nous signalons que l'effet du rapport sur le nombre de Nusselt local montre que sa valeur asymptotique est d'autant plus grande que le nombre des conductivités thermiques augmente.

Références

- [1] E.G. Richardson, E. Tyler, " The transverse velocity gradient near the mouths of pipes in which an alternating or continuous flow of air is established", Proc. Phi. Soc.London, Vol 42 , pp. 1-15, 1929.
- [2] J.R. Womersley, " Oscillatory motion of viscous liquid in a thin-walled elastic tube-1: The linear approximation for long waves ", Phil .Mag, Vol 46 No 7 ,pp.199-221,1955.
- [3] S.Uchida, "The pulsating viscous flow superposed on the steady laminar motion of incompressible fluid in a circular pipe ", ZAMP, Vol 17, pp.403-422, 1956.
- [4] R. Seigel, M. Perlmutter, " Heat transfer for pulsating laminar duct flow ", Transactions of the ASME -Journal of Heat Transfer, Vol 84, pp. 111-123, 1962.
- [5] S.Y.Kim, B.H.Kang, J.M.Hyum, " Heat transfer in the thermally developing region of a pulsating channel flow ", Int. J. Heat Mass Transfer Vol 36, No 17, pp.4257-4266,1993.
- [6] P. Bouvier, " Experimental study of heat transfer in oscillating flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol 48, pp. 2473-2482, 2005.
- [7] A. Ghezal, " Modélisation numérique de l'écoulement confiné d'un fluide réel autour d'un obstacle chauffé en mouvement ", thèse de doctorat d'état, université de USTHB, 2007.
- [8] K. Choukairy, R.Bennacer, " Modification des transferts de chaleur dans une configuration cylindrique par l'utilisation d'un obstacle", 16^{ème} Congrès Français de Mécanique", Nice, 1-5 Sept 2003