



HAL
open science

Etude des transferts de chaleur lors de l'ascension d'une particule

Aurélie Maunoury, Cédric Le Bot, Eric Arquis

► **To cite this version:**

Aurélie Maunoury, Cédric Le Bot, Eric Arquis. Etude des transferts de chaleur lors de l'ascension d'une particule. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00161293

HAL Id: hal-00161293

<https://hal.science/hal-00161293>

Submitted on 29 Aug 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETUDE DES TRANSFERTS DE CHALEUR LORS DE L'ASCENSION D'UNE PARTICULE

Aurélie MAUNOURY, Cédric LE BOT, Eric ARQUIS

Laboratoire TRansferts Ecoulements Fluides Energétiques (TREFLE)
16 avenue Pey- Berland - 33607 PESSAC
maunoury@enscpb.fr, lebot@enscpb.fr, arquis@enscpb.fr

Résumé : Nous faisons l'étude de l'ascension d'une particule ayant une température fixe et différente de celle du fluide dans lequel elle évolue. Pour cela, nous simulons en 3D le mouvement d'un solide dans un fluide où nous considérons le fluide comme Newtonien et la particule comme indéformable par une approche eulérienne. Nous nous plaçons dans le cas d'un régime laminaire de Stokes. Nous validons l'hydrodynamique et les transferts thermiques lors la l'ascension de la particule en comparant les résultats issus de la simulation numérique avec ceux obtenus à l'aide de méthodes analytiques ou empiriques adaptées à notre configuration. Nous menons pour finir une étude sur la couche limite thermique créée.

Mots clés : simulation numérique, écoulement diphasique liquide- solide, convection.

1. INTRODUCTION

L'ascension ou la sédimentation de particules est présente dans de nombreux domaines industriels tels que la métallurgie, l'agroalimentaire... L'une de ses applications industrielles concerne le transport de froid, celui-ci s'effectue par exemple, par l'intermédiaire de mélanges constitués de particules de glace dispersées dans une solution aqueuse communément appelés coulis de glace.

L'ascension comme la sédimentation reste encore mal définie tant d'un point de vue expérimental que numérique, bien que plusieurs études ([1], [2]) aient permis de quantifier et qualifier les écoulements générés en fonction des paramètres physiques et géométriques (viscosité, taille des particules...). Notre but est de prendre en compte les échanges de chaleur générés par une différence de température entre le fluide et la particule. Pour le moment, les travaux sur ce sujet se limitent à la simulation numérique d'une particule en régime de Stokes en 2D ou 3D dans un environnement isotherme [3]. La prise en compte des transferts thermiques reste en effet difficile d'un point de vue expérimental à cause de la faible taille de la particule dans le fluide ambiant. La simulation numérique d'écoulements non isothermes permet ainsi de donner des informations concernant l'évolution des températures et flux de chaleur entre la particule et le fluide.

Nous nous proposons d'aborder dans ce travail l'ascension d'une particule ayant une température fixe et plus froide que celle du fluide. Nous présenterons tout d'abord la méthode numérique utilisée suivie de la simulation numérique directe de l'ascension d'une particule en 3D gouvernée par le régime de Stokes et échangeant de la chaleur avec le fluide environnant.

2. METHODOLOGIE NUMERIQUE

L'étude physique repose sur la détermination des vitesses d'écoulement du fluide et de la particule en tenant compte des échanges de chaleur entre les deux milieux. La modélisation

numérique utilisée pour cette étude repose sur une méthode un fluide (One-Fluid Method) Caltagirone *et al* (2001) dans le cadre d'une approche eulérienne. L'écoulement et les transferts thermiques de la particule sont résolus au cours du temps.

L'étude de l'écoulement diphasique (liquide-solide) se limitera aux fluides newtoniens incompressibles. On traduit ce problème par l'équation de conservation de la masse (1) liée à la vitesse u et de conservation de quantité de mouvement (2) où ρ est la masse volumique, g l'accélération de la gravité et μ la viscosité:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \rho g - \nabla p + \nabla \cdot (\mu(\nabla u + \nabla^t u)) \quad (2)$$

L'équation (2) est résolue par une méthode du Lagrangien Augmenté (Glowinski *et al* (1989)) (couplage entre vitesse et pression) dans lequel un algorithme itératif de minimisation permet d'assurer la contrainte d'incompressibilité (1). Les termes convectifs sont discrétisés au premier ordre (schéma upwind).

Notre étude porte sur les problèmes d'écoulements diphasiques à phases séparées. Afin de déterminer la position de chaque phase (liquide et particule) au cours du temps, une équation d'advection est résolue (3).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C = 0 \quad (3)$$

La variable C , (fonction de phase) définit les zones correspondant au fluide ($C=0$) et celle de la particule solide ($C=1$). L'interface liquide-solide se situe dans la zone espérée d'extension nulle où $0 < C < 1$. Cette équation est résolue par un schéma VOF (Volume Of Fluid). Celui-ci permet de reconstruire par morceaux la fonction C au cours du temps (Breil (2001)). Les caractéristiques physiques des milieux sont réactualisées en fonction de cette variable C de manière linéaire :

$$\text{Var} = C \cdot \text{var}_{\text{particule}} + (1-C) \cdot \text{var}_{\text{fluide}} \quad (4)$$

Les transferts thermiques sont pris en compte à l'aide de l'équation de l'énergie (4). Celle-ci sera réalisée à l'aide d'un schéma upwind.

$$\rho \cdot c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (5)$$

3. ANALYSE DES RESULTATS

La première étape de cette étude consiste à vérifier notre simulation par comparaison avec des cas analytiques ou empiriques.

3.1. Validation de la méthode

3.1.1. Vitesse asymptotique

On travaillera ici avec des nombres de Reynolds particulières $Re_p \ll 1$. Dans ce cas, les forces de frottements visqueux sont prépondérantes devant les forces inertielles. Ceci nous permet de négliger le terme convectif $(\rho(u \cdot \nabla)u)$, très faible devant le terme visqueux $(\nabla \cdot (\mu(\nabla u + \nabla^t u)))$.

Dans la littérature [7], nous trouvons un coefficient de traînée (6) nous permettant de calculer ensuite la vitesse (7) pour le cas d'un régime de Stokes et pour une sphère évoluant dans un fluide newtonien.

$$C_D = \left[0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\text{Re}_p}} \right]^2 \quad (6)$$

$$u = \left(\frac{4}{3} \frac{gd\Delta\rho}{\rho C_D} \right)^{0.5} \quad (7)$$

Afin de tenir compte l'effet des parois, il nous faut corriger la vitesse analytique par le facteur suivant [7] :

$$f = \left[\frac{1 - d/D}{1 - 0.475(d/D)} \right]^4 \quad (8)$$

On considère en 3D une particule solide sphérique d'un rayon de 0,01 m effectuant une ascension dans un liquide. Le domaine de calcul est un parallélépipède rectangle de rapport de forme hauteur/largeur = 5 et hauteur/profondeur = 4 avec un coefficient de confinement $K = \frac{a}{l} = 0,2$. Afin d'obtenir un nombre de Reynolds particulaire de l'ordre de 10^{-2} , la gravité est imposée à $9,81 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-2}$, ce qui limite le champ de vitesse.

Le maillage de $55 \times 300 \times 55$ est à pas exponentiel et raffiné au niveau de la particule. Cela permet ainsi d'avoir 40 mailles sur le diamètre de la sphère. Nous avons choisi un pas de temps de 10^{-1} s. Les propriétés du fluide et de la particule sont répertoriées dans le tableau 1. Le fluide correspond à de la glycérine et le solide à du polypropylène. Le solide a une température plus froide de 10°C par rapport au liquide. De plus, la température de la particule est constante au cours du temps.

Une première étude [8] a montré que la variation de température du fluide autour de la particule perturbe très légèrement les caractéristiques du fluide et par conséquent l'hydrodynamique. D'après le tableau 2, la vitesse asymptotique calculée numériquement correspond bien à la vitesse analytique issue de la littérature [7] avec une précision égale à 5%.

	ρ (kg.m^{-3})	μ (Pa.s)	c_p ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	β (K^{-1})
Liquide à 20°C	1260	1,5	2428	0,285	$5 \cdot 10^{-4}$
Solide à 10°C	910	$1,5 \cdot 10^3$	1900	0,33	—

Tableau 1 : Caractéristiques physiques du fluide et de la particule.

3.1.2. Corrélation du nombre de Nusselt

La simulation consiste à représenter l'ascension d'une particule ayant une température fixe et évoluant dans un fluide ayant une température plus chaude de 10°C . Nous estimons tout d'abord le nombre de Richardson (Ri) afin de déterminer a priori la compétition convection naturelle convection forcée. Dans notre cas, nous avons $\text{Ri} \cong 109$, ce qui correspond à un phénomène de convection naturelle [9].

Puisque on simule une sphère isotherme subissant une ascension dans un liquide ayant une température plus chaude (de 10 °C), nous pouvons comparer le nombre de Nusselt global issu de la simulation numérique à celui trouvé à l'aide de la corrélation [10] qui est valable pour un nombre de Rayleigh $Ra > 1$.

D'après le tableau 2, le nombre de Nusselt global issu de la simulation numérique correspond bien à celui trouvé à l'aide d'une corrélation adaptée à notre configuration avec une précision égale à 5%.

	Simulation numérique	Analytique	Précision (%)
Vitesse asymptotique ($m.s^{-1}$)	$3 \cdot 10^{-4}$	$3,16 \cdot 10^{-4}$	5
Nusselt Global	3,2	3,36	5

Tableau 2 : Comparaison des résultats numériques et analytiques.

3.2. Etude qualitative de la couche limite thermique

Nous reprenons le cas développé au 3.1.1 en modifiant de façon fictive les caractéristiques thermiques de la glycérine afin de faire varier le nombre de Prandtl. Les paramètres numériques utilisés précédemment sont conservés. L'impact de cette variation sur la couche limite thermique est alors observé.

Nous faisons varier la capacité calorifique afin de modifier le nombre de Prandtl. D'après la figure 1, conformément à ce qui était attendu plus le nombre de Prandtl augmente plus la couche limite thermique diminue. Cet effet est quantitativement exprimé sur la figure 2, nous pouvons également noter que l'épaisseur de la couche limite thermique tend à se stabiliser avec l'augmentation du nombre de Prandtl. L'épaisseur de la couche limite en fonction du nombre de Prandtl peut être représentée par une équation de type puissance.

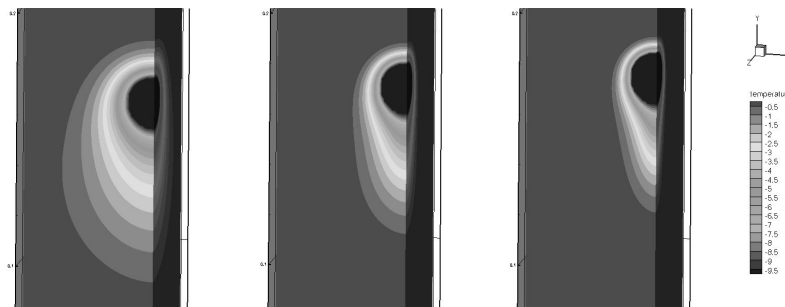


Figure 1 : Couche limite thermique autour de la particule pour des nombres de Prandtl allant de gauche à droite de 1000, 5000, 12800. Illustration du domaine de calcul équivalent au quart du domaine réel.

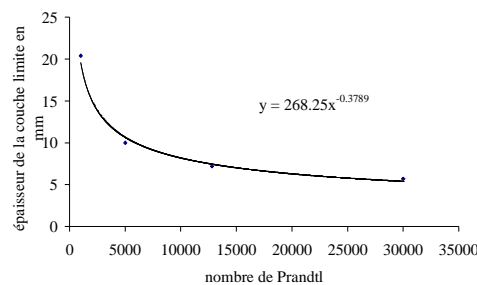


Figure 2 : Epaisseur de la couche limite thermique en fonction du nombre de Prandtl.

CONCLUSION

Nous avons validé notre méthode numérique en 3D, tant en terme de dynamique (vitesse d'ascension) que de thermique (nombre de Nusselt) dans le cas d'un nombre de Reynolds faible et pour une condition thermique peu réaliste (température imposée). La prochaine étape sera de nous placer dans des conditions plus réalistes, notamment celui où la particule voit sa température évoluer lors de son déplacement et pour des nombres de Reynolds plus élevés. Ces différentes étapes vont nous permettre d'approcher de notre objectif final qui est de simuler l'ascension d'une particule avec changement de phase.

Nomenclature

C	fraction volumique	T	température, K
c_p	capacité calorifique à pression constante, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	u	Vitesse, $m.s^{-1}$
C_D	coefficient de traînée	<i>Indice</i>	
d	diamètre de la particule, m	p	particulaire
F	force, N	<i>Symboles grecs</i>	
g	gravité, $m.s^{-2}$	λ	conductivité, $W.m^{-1}.K^{-1}$
K	confinement	μ	viscosité dynamique, $Pa.s$
m	masse, kg	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
p	pression, Pa	β	dilatation, K^{-1}
t	temps, s		

Références

- [1] C. Vanroyen, Interactions hydrodynamiques entre sphères dures en régime faiblement inertiel : modélisation et expérimentations appliquées à la sédimentation, *Thèse de l'Université de Bordeaux I*, 2004.
- [2] T.W. Pan, Numerical simulation of the motion of a ball falling in an incompressible viscous fluid , *C. R. Acad. Sci. Paris*, 327, pp1035-1038, 1999.
- [3] G. Pianet, A. Ten Cate , J.J. Derkensen, E. Arquis, Assessment of the 1-fluid method for DNS of particulate flows : sedimentation of a single sphere at moderate to high Reynolds numbers, *Journal of Computers and Fluids*, 36, pp359-375, 2007.
- [4] J.P. Caltagirone, S. Vincent, Sur une méthode de pénalisation tensorielle pour la résolution des équations de Navier-Stokes, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 2001.
- [5] R. Glowinski, P. Le Tallec, Augmented Lagrangian and operator-splitting methods in nonlinear mechanics, *Studies in Applied in Mathematics*, 9, 1989.
- [6] J. Breil, Modélisation du remplissage en propergol de Moteur à propulsion solide, *Thèse de l'Université de Bordeaux I*, 2001.
- [7] A. Maunoury, C. LeBot, E. Arquis, Sédimentation d'une particule dans un fluide thermiquement stratifié, *Congrès Français de Thermique SFT 2006* (Ile de Ré, 16-19 mai), pp27-32, 2006.
- [8] V.C. Kelessidis, Terminal Velocity of Solid Spheres Falling in Newtonian and non Newtonian Liquids, *Tech. Chron. Sci.*, 1-2, 2003.
- [9] J.K. Walsh, A.W. Weimer, C.M. Hrenya, Thermophoretic deposition of aerosol particles in laminar tube flow with mixed convection, *Aerosol Science* 37, pp715-734, 2006.
- [10] Technique de l'Ingénieur, BE 8 206, 2006.