



Etude des échanges convectifs à l'interface fluide-paroi d'une ou plusieurs capsules remplies d'un matériau au changement de phase

Fatma GHRISSI*^{1*}, Belgacem DHIFAOUI^{1,2}, Souad HARMAND³, Sadok BEN JABRALLAH^{1,2}

¹Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermiques et Massiques de Tunis (LETTM) Faculté des Sciences de Bizerte, Université de Carthage. 7021 Tunisie.

²Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines, Université de Valenciennes et du Cambrésis (UVHC), 59301 Valenciennes, France.

ghrissi_fatma@yahoo.com, dhifaouib@gmail.com, sadok.jabrallah@fsb.rnu.tn, souad.harmand@univ-valenciennes.fr

Résumé : Ce travail présente une étude numérique sur les échanges de chaleur à l'interface d'une capsule contenant un matériau à changement de phase (MCP) lors d'un écoulement forcé d'air préchauffé. Le domaine de calcul est représenté par un canal vertical où on a placé à l'intérieur une capsule remplie d'un matériau à changement de phase. Les équations régissant les transferts dans le système physique considéré sont les équations classiques de la convection forcée. Elles ont été résolues numériquement à l'aide du logiciel commercial Comsol Multiphysics. Afin de mieux comprendre ce qui se produit au voisinage de la capsule de l'MCP, nous avons étudié l'effet de la température et de la vitesse de l'air sur les coefficients d'échange convectif pour les deux cas à mono capsule et à deux capsules.

Mots clés :

coefficient d'échange, interface fluide-paroi, capsule sphérique, MCP.

1. Introduction

La réduction du stock de ressources fossiles et la contribution à une consommation d'énergie plus respectueuse de l'environnement a poussé les chercheurs à développer des nouvelles stratégies pour réduire la consommation énergétique des bâtiments et assurer le confort thermique. Le confort thermique dépend fortement de plusieurs paramètres tels que les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment et les conditions extérieures et intérieures. La combinaison de tous ces paramètres, (conditions externes, enveloppe et conditions internes) mis en condition les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment.

Le stockage de chaleur au niveau de parois en utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) est prometteur et favorable pour le développement de parois innovantes. Pour apprécier l'efficacité de tel système, on doit étudier le comportement thermique des parois contenant des MCP. Le paramètre le plus important dans ces études et qui n'a pas été étudié précisément est le coefficient d'échange convectif qui représente le transfert de chaleur entre la paroi et l'air.

L'écoulement autour d'une paroi de forme sphérique a suscité un grand intérêt. L'étude du processus de fusion ainsi que l'effet de la convection naturelle autour des cavités sphériques a fait l'objet de plusieurs études.

Roy et Sengupta, 1990[1] ont effectué une étude théorique pour décrire la fusion d'un MCP continu dans une cavité sphérique. Cette cavité est remplie d'un MCP, initialement, à la phase solide, est exposée à une température uniforme plus élevée. Ils ont observé que l'effet de la convection naturelle a joué un rôle très important surtout dans la partie supérieure de la sphère.

Bahrani, 1990[2] ont effectué une étude expérimentale du processus de fusion d'un MCP (n-éicosane paraffine) dans une enveloppe sphérique. Ils ont constaté que le mouvement de la partie liquide lors de la fusion provoquée par la présence de la gravité a un grand impact sur les taux de fraction de volume fondu et le transfert de chaleur.

Assis et al., 2007[3] ont examiné expérimentalement et numériquement le processus de fusion d'un MCP (RT27) dans une géométrie sphérique. Cette étude porte essentiellement sur le suivi du processus de la fusion au cours du temps en intégrant des phénomènes tels que la convection naturelle, l'expansion volumique lorsque la température devient importante.

Elomari, 2001[4], a modélisé le comportement d'un nodule pendant sa cristallisation en étudiant les mécanismes d'échange thermique à sa surface. Un accent particulier, est mis sur l'effet de l'écoulement externe sur le changement de phase liquide-solide à l'intérieur du nodule. Ces deux phénomènes sont étroitement liés ; en effet, le dégagement de chaleur latente réchauffe la paroi du nodule, ce qui crée des mouvements de convection naturelle. A leur tour, ces mouvements favorisent le changement de phase, en évacuant l'énergie dégagée par le MCP.

La revue bibliographique révèle que les travaux qui portent sur les capsules sphériques remplies en matériau à changement de phase présentent une grande importance et sont étudiées à différentes conditions opératoires. On remarque que la plus part des travaux s'intéressent par l'étude de la convection naturelle à l'intérieur de la capsule et considèrent la condition de température constante à la surface de la capsule ce qui négligent, par conséquent, l'interaction qui se produit entre le fluide en écoulement et le MCP contenu dans la capsule.

2. Modélisation Numérique

2.1 Position du Problème

Le problème considéré est schématisé sur la figure ci-dessous (modèle 2D). Il s'agit d'un canal rectangulaire contenant une capsule remplie d'un matériau à changement de phase initialement à l'état solide (contour 5). Ce canal est parcouru par un écoulement d'air chaud. Deux cotés considérés adiabatiques 2 et 4, à l'entrée du canal (coté 1) une température T_e supérieure à la température de la fusion a été imposée. A la sortie du canal (coté 3) la condition de flux convectif est considérée.

La simulation de ce problème et la résolution numérique ont été réalisées par le code de calcul Comsol Multiphysics 3.4 basé sur la méthode des éléments finis. Les conditions initiales et aux limites sont présente dans la figure 1 et les propriétés physiques présentées au (Tableau 1), à la fois pour la phase solide et liquide

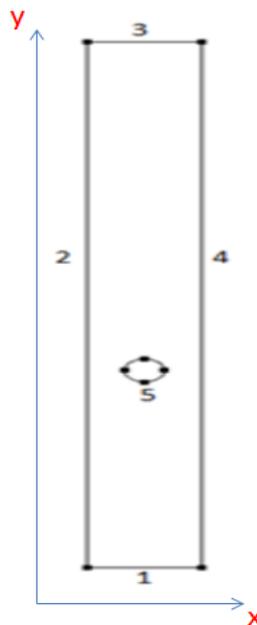


Figure 1: Position de problème : 1-entrée fluide (V_e , T_e), 2 et 4-adiabatique-adhérence 3-sortie du fluide (V_s , T_s) et 5-paroi de la capsule contenant un MCP, continuité-adhérence

Le tableau suivant résume des différentes caractéristiques thermo-physiques de la paraffine utilisée.

Tableau 1 – Propriété thermo physiques du MCP-52 (littérature) ; (*) les propriétés de l'air sont les valeurs moyenne pour une plage de températures de 25 100°C

Propriétés physiques	Air*	Paraffine (MCP)
Temperature de fusion (K)	-	325
Chaleur latente (kJ/kg)	-	210
Densité solide (kg/m ³)	-	860
Densité liquide (kg/m ³)	-	760
Densité de l'air (kg/m ³)	1.137-0.964	-
Chaleur spécifique (kJ/kg K)	1048-1009	-
Chaleur spécifique solide (kJ/kg K)	-	2.9
Chaleur spécifique liquide (kJ/kg K)	-	2.1
Conductivité thermique (W/m K)	2.49 10 ⁻² -3.11510 ⁻²	-
Conductivité thermique solide (W/m K)	-	0.24
Conductivité thermique liquide (W/m K)	-	0.15
Expansion thermique β (K ⁻¹)	-	1.8 10 ⁻⁴

2.2 Hypothèses Simplificatrices

- le transfert de chaleur et l'écoulement sont transitoires et bidimensionnels (2D)
- MCP pure, homogène et isotrope, Initialement à l'état solide ($T_0 < T_f$),
- écoulement laminaire et incompressible,
- l'approximation de *Boussinesq* qui consiste à négliger les variations de la masse volumique avec la température partout sauf dans le terme de poussée est valide,
- la dissipation visqueuse est négligeable,
- l'expansion thermique du MCP est négligeable,
- l'épaisseur de la paroi de la capsule contenant le MCP est négligeable.

2.3 Mise en Equation

Pour le fluide en écoulement

Equation de continuité:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Equations de quantité de mouvement:

Selon Ox:

$$\rho_a \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta_a \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Selon Oy:

$$\rho_a \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta_a \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho_a g \beta (T - T_0) \quad (3)$$

Equation de l'énergie :

$$\rho_a c p_a \frac{\partial T}{\partial t} = k_a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - c p_a \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

u et v sont les composantes de la vitesse de l'air,

T et P sont respectivement la température et la pression de l'air,

$\rho_a, \eta_a, g, \beta, c p_a$ et k_a sont respectivement la masse volumique de l'air, la viscosité dynamique de l'air, l'accélération de pesanteur et le coefficient de dilatation thermique, la chaleur spécifique et la conductivité thermique.

Pour le MCP

Equation de continuité:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

Equations de quantité de mouvement :

Selon Ox :

$$\rho_l \left(\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p_2}{\partial x} + \eta_l \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} \right) + B u_2 \quad (6)$$

Selon Oy :

$$\rho_l \left(\frac{\partial v_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p_2}{\partial y} + \eta_l \left(\frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_2}{\partial y^2} \right) + \rho_0 g \beta (T - T_0) + B v_2 \quad (7)$$

Equation de l'énergie :

$$c p_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{eq} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - c p_{eq} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (8)$$

u et v représentent les composantes de la vitesse du liquide fondu.

T et P sont respectivement la température et la pression du MCP.

ρ_l, η_l , et β sont respectivement la masse volumique du liquide, la viscosité dynamique du liquide fondu, l'accélération de pesanteur et le coefficient de dilatation thermique.

On est en présence de deux milieux (liquide et solide) avec une interface commune. Les caractéristiques de ces deux milieux sont distinctes dans l'un ou l'autre état. Donc une variable H est créée. C'est une valeur comprise entre 0 et 1 partant de la phase solide à la phase liquide. La fraction liquide H renseigne sur l'état du MCP qu'il soit liquide ou solide

$H=0$ si $T < T_f$

$H=1$ si $T > T_f$

Avec T_f est la température de fusion.

La fraction liquide est également utilisée pour annuler les vitesses dans la phase solide du MCP ainsi que dans les parois de l'enceinte par le biais des termes sources Bu et By dans les équations de la quantité de mouvement.

La fonction B est choisie de sorte à tendre vers l'infini lorsque H est nulle et à tendre vers 0 lorsque H tend vers 1. Ceci revient à utiliser un terme source dans la région solide et un terme source nul ailleurs. La zone de transition est supposée analogue à un milieu poreux dont la porosité en un point est donnée par la fraction liquide. A partir de la loi de Darcy pour l'écoulement dans un milieu poreux est écrite sous la forme suivante :

$$B = -C \frac{(1-H^2)}{(H^3+b)}$$

La valeur de C dépend en principe de la morphologie du milieu poreux. La constante b est introduite ici simplement pour éviter une division par zéro dans le cas d'une fraction liquide nulle. Numériquement, le rapport $\frac{C}{b}$ doit simplement être suffisamment élevé afin d'annuler les vitesses dans la région solide [5] Dans l'équation de l'énergie, les deux termes $c p_{eq}$ et k_{eq} représentent respectivement la capacité volumique équivalente ($J:K-1:m-3$) et la conductivité thermique équivalente ($W:K-1:m-1$). Ils s'écrivent sous la forme suivante :

$$c p_{eq} = H(\rho c p)_l + (1-H)(\rho c p)_s$$

$$k_{eq} = H k_L + (1-H)k_s$$

2.4 Conditions aux Limites et Initiales

A l'entrée du canal, le fluide pénètre avec une température T_e et avec une vitesse V_e

En $y = 0$: $u = 0$, $v = V_e$, $T = T_e$

A la sortie du canal, nous considérons une continuité pour tous les champs physique

En $y = L_y$: $\frac{du}{dy} = \frac{dv}{dy} = 0$

A la paroi adiabatique, nous imposons la condition d'adhérence pour les composantes de la vitesse, pour les champs de températures, la condition d'adiabacité impose la continuité des champs

En $x=0$ et $x=L$: $u = v = 0$, $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0$

A l'origine des temps ($t=0$), les phases fluides et MCP sont à la température ambiante et l'air est considéré au repos. Donc, les conditions initiales sont données par les expressions suivantes :

A $t=0$: $u = v = 0$, $T = T_2 = T_0$

T_0 représente la température initiale

2.5 Validation du Modèle Numérique

La figure 2 présente une comparaison entre les résultats de code de calcul, COMSOL MULTYPHYSICS (basé sur la méthode des éléments finis) et les résultats de l'expérience. La courbe de comparaison montre la variation du flux de chaleur convectif paroi-fluide en fonction du temps.

Une concordance satisfaisante entre les résultats de code numérique et avec ceux de l'expérience est observée. Dont le pourcentage d'erreur entre ces résultats est de l'ordre de 30%.

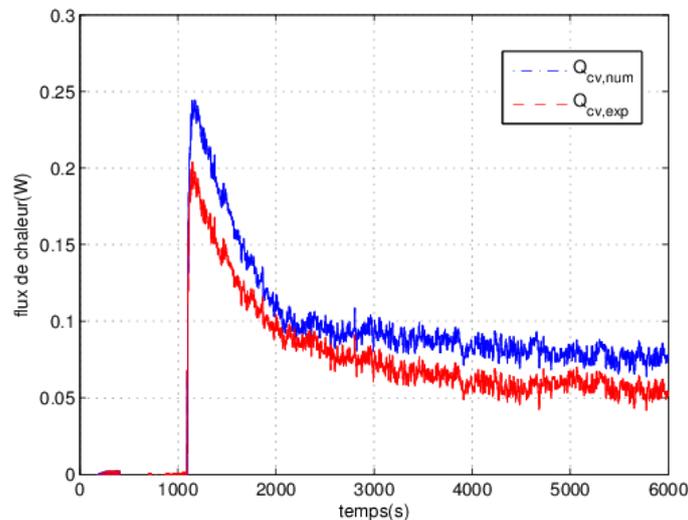


Figure 2: Comparaison simulation-expérience: variation du flux de chaleur convectif entre la paroi de la capsule et le fluide en fonction du temps

3. Résultats et discussions

3.1 Evolution de la fusion du MCP

La figure 3 présente l'évolution du front de fusion en fonction du temps. Dans les premiers moments du déroulement de la fusion ($t < 1000s$) une faible couche liquide apparaît au voisinage de la paroi interne de la capsule. La fusion s'effectue par le mode de transfert conductif mais ne dure pas longtemps. Cette couche est plus épaisse du côté bas de la capsule ou encore du côté où le chauffage est plus intense. Contrairement à la condition de température imposée à la paroi pour laquelle cette couche est répartie d'une façon homogène sur toute la face interne de la capsule.

De plus en plus le chauffage se poursuit la phase liquide, qui migre vers le haut sous l'effet de la différence de la densité engendrée par le gradient de température, devient importante. Un mouvement plus important apparaît

en haut de la capsule ce qui entraîne la déformation de l'interface du côté haut (c'est l'effet de la convection naturelle) alors du côté bas reste pratiquement inchangée (le mode conductif est toujours important).

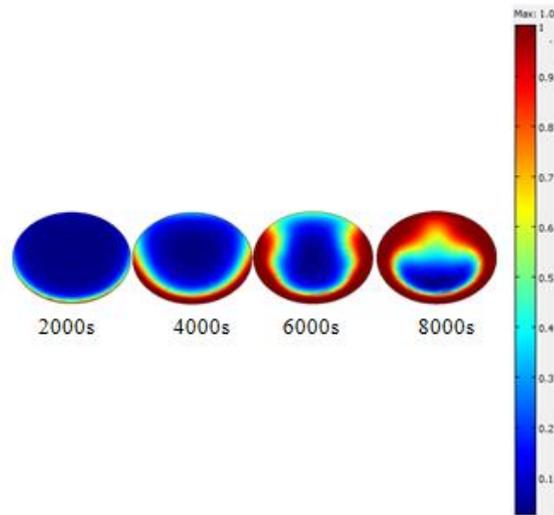


Figure 3 : Front de fusion à différents instants ($V_e=0.156$ m/s et $T_e= 60^\circ\text{C}$).

3.2 Effet de la température et de la vitesse d'entrée du fluide sur la variation du coefficient d'échange convectif

Les échanges thermiques entre la paroi de la capsule et le fluide en écoulement sont parmi les mécanismes qui présentent un grand intérêt pour cette étude, car ce sont ces échanges qui conditionnent l'évacuation de l'énergie latente et la fusion du MCP contenu dans la capsule.

Le coefficient d'échange thermique est défini par l'expression suivante Song et al 2010[6]:

$$\phi_{\text{pariétal}} = k_a \frac{\partial T_a}{\partial n} = h_\theta (T_\theta - T_e)$$

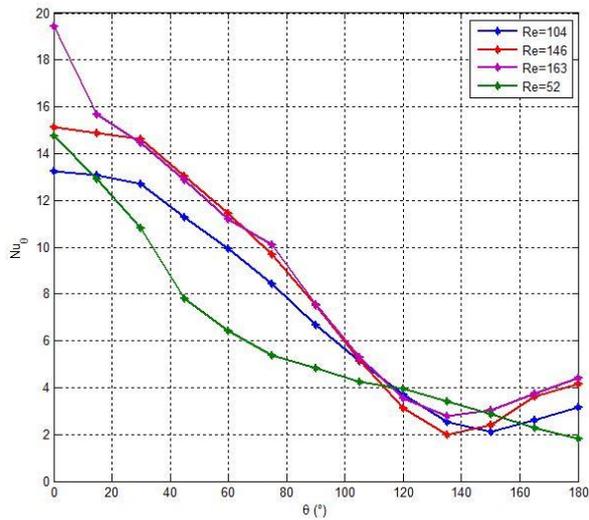
La figure 4, illustre le coefficient d'échange local suivant la position θ sur la paroi de la capsule et ceci pour différents instants à différente température d'entrée $T_e = 60, 70, 80$ et 90°C , à différente Reynolds d'entrée $Re = 52, 104, 146, 163$ et pour un nombre de Prandtl 0.79.

L'observation de ces courbes montre que l'augmentation de la vitesse ou bien de la température a une influence sur les valeurs du coefficient d'échange local. Le coefficient d'échange demeure élevé lorsque le gradient de température est maximal (exemple: température du fluide initialement à 60°C et capsule à 25°C) puis diminue en fonction de la position sur la paroi jusqu'à un angle de 130° mesuré partir du point d'attaque. A partir de ce dernier, le coefficient d'échange présente une légère augmentation sauf pour le cas où la vitesse est faible ($Re=52$). Cela est dû probablement à la présence des vortex en arrière de la capsule [6,7]. L'échange thermique est donc plus important au niveau de la partie basse de la capsule et devient moins important en présence des zones de recirculation en arrière de la capsule.

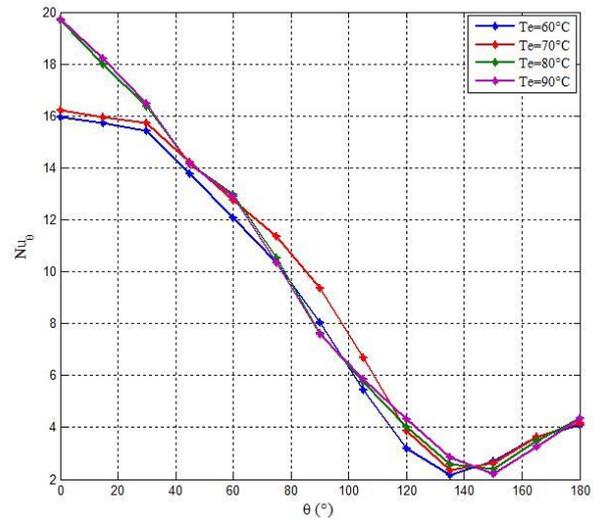
3.3 Evolution de la Fusion de l'MCP et de la Fraction de Volume Fondue : Cas de deux Capsules

Dans cette partie, on considère deux capsules identiques dont l'une est placée en aval du canal (fixe) et l'autre en amont susceptible d'être déplacée selon l'axe vertical du canal. Quatre dispositions ont été testées : $d = 2R, 4R, 6R$ et $8R$, avec d est la distance entre les deux centres des capsules (figure 5a). Pour une distance de $2R$ (sphères en contacts), nous remarquons pour la deuxième capsule que la fusion commence par les deux côtés, plus au moins par le haut contrairement pour une capsule seul la fusion commence par le bas ; c'est l'effet écran de la capsule en aval sur la capsule en amont.

D'autre part, on montre que l'existence d'une capsule en aval affecte la fusion de celle en amont en particulier au niveau de la durée nécessaire pour qu'elle atteigne la fusion totale. L'évaluation de la fraction liquide (figure 5b) pour les cas testés et au même instant montre qu'à partir d'une distance de $6R$, la deuxième sphère se comporte comme une sphère seule. C'est la distance optimale pour un écoulement de vitesse et de température respectivement de 0.156 m/s et 60°C .

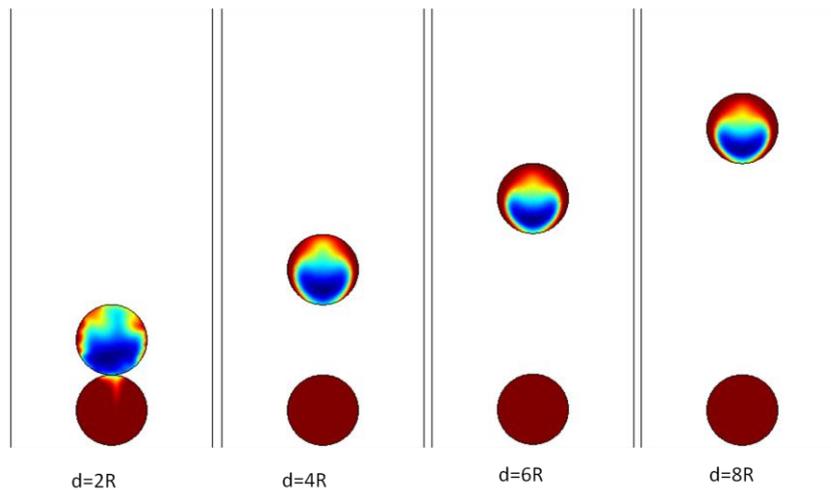


(a)

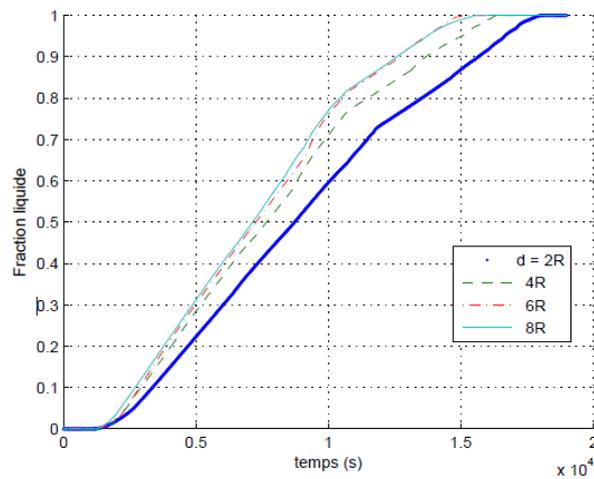


(b)

Figure 4 : Evolution du coefficient d'échange local suivant la position θ sur la paroi de la capsule (a) à différents Reynolds d'entrée $Re = 52, 104, 146, 163$ (b) pour différentes températures d'entrée $Te = 60, 70, 80$ et 90°C , et pour un nombre de Prandtl 0.79 .



(a)



(b)

Figure 5: (a) Evolution du front de fusion à $t=12000\text{s}$ et (b) Evolution de la fraction liquide en fonction du temps pour 4 configurations: $d = 2R, 4R, 6R$ et $8R$ ($Ve = 0.156 \text{ m/s}$, $Te = 60^\circ\text{C}$)

3.4 Les coefficients d'échanges locaux dans le cas de deux capsules

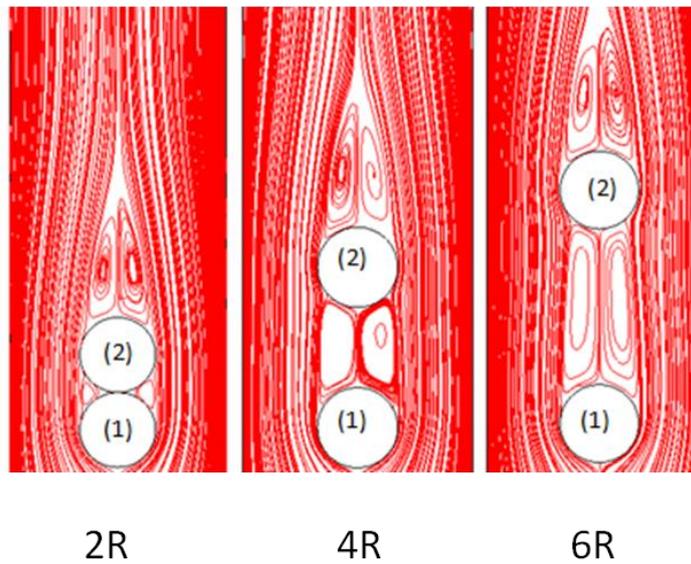


Figure 6: Lignes de courants des capsules alignées à différentes distances

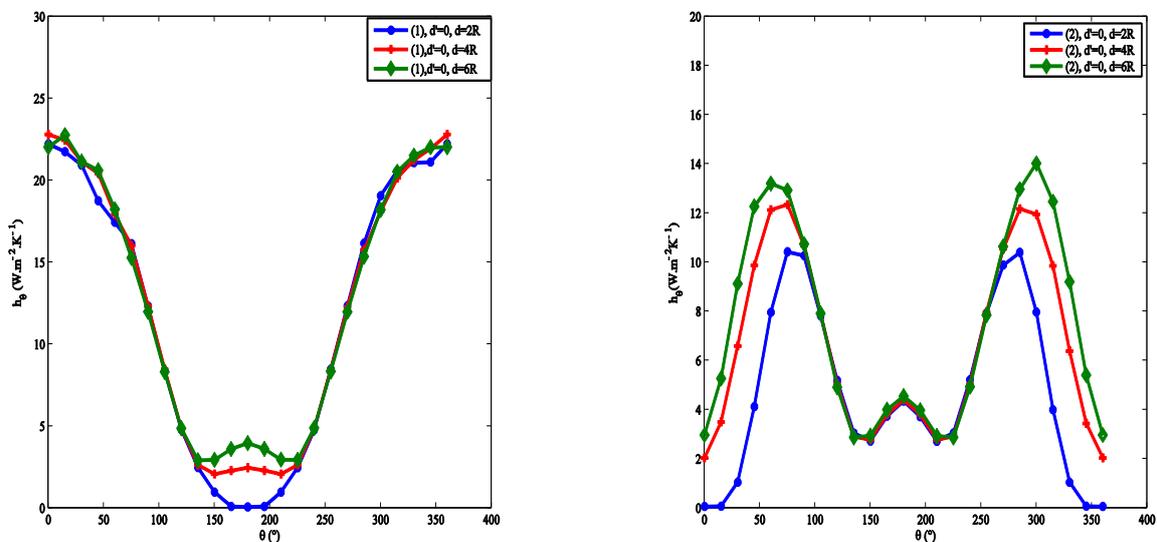


Figure 7: coefficients d'échange locaux en fonction de l'angle θ dans le cas de deux capsules alignées a) cas d'une capsule placée en aval (1) en trois positions $d=0$, $d=2R$, $4R$ et $6R$ b) cas d'une capsule placée en amont (2) en trois positions $d=0$, $d=2R$, $4R$ et $6R$

Dans la figure 7a on remarque que pour les 3 distances séparant les 2 sphères, les coefficients d'échange diminuent à partir de $(\theta=0)$ jusqu'à $(\theta=135)$, au-delà duquel on remarque qu'il y a une légère augmentation des valeurs de coefficient d'échange locale pour les positions 2d et 3d par contre pour la position 1d les valeurs des coefficients d'échange continuent à diminuer. Cela est bien expliqué par l'absence de zone de recirculation à ce niveau pour la position 2R, par contre les coefficients d'échange continuent à augmenter pour les positions 4R et 6R à cause des vortex (figure 6). L'échange entre l'air et la paroi de la sphère est donc favorisé pour le cas de deux capsules non collées. Ce comportement est vérifié sur la zone de détachement, en effet l'échange est plus important pour le cas 6R ou les deux capsules sont plus éloignées que le cas 4R

On s'intéresse au comportement de la deuxième capsule pour les 3 cas:

Figure 7b on remarque que l'allure des courbes des coefficients d'échange est analogue pour les 3 cas, on remarque une augmentation des valeurs de coefficient d'échange de $(\theta=0^\circ)$ jusqu'à $(\theta=90^\circ)$ pour les trois cas, ces valeurs sont plus importantes lorsque la distance de séparation entre les deux capsules augmente cela est expliqué par l'influence de la présence de vortex. A partir de $(\theta=90^\circ)$ on remarque un comportement analogue

pour les 3 positions, le coefficient d'échange diminue de ($\theta=90^\circ$) jusqu'à ($\theta=135^\circ$), au delà du quel on remarque une légère augmentation.

Conclusion

Cette étude nous a permis de suivre le processus de fusion au cours du temps pour une seule capsule placée dans un canal vertical parcouru par un fluide chaud, et de déduire que la vitesse et la température d'entrée ont un influence sur les valeurs de coefficient d'échange. D'autre part on a étudié l'influence de la présence d'une autre capsule et l'inter distance entre eux sur la fraction du volume fondu et l'échange thermique paroi fluide. On a dégagé qu'à une distance $d=6R$ la deuxième se comporte comme un capsule seule.

Nomenclature

B	Terme source[-]	<i>Lettres grecs</i>	
Cp	Capacité calorifique[$J kg^{-1} K^{-1}$]	β	Le coefficient de dilatation thermique [K^{-1}]
R	Rayon de la capsule, [m]	γ	
g	Accélération gravitationnelle, [ms^{-2}]	ϕ	flux de chaleur [$W m^{-2}$]
H	Fraction de volume fondue[-]	λ	Conductivité thermique [$W m^{-1} K^{-1}$]
k	Conductivité thermique, [$W m^{-1} K^{-1}$]	ρ	Masse volumique [$kg m^{-3}$]
Lm	Chaleur latente du matériau utilisé, [$J kg^{-1}$]	μ	viscosité [$Pa s^{-1}$]
L_y	hauteur du canal [m]		
Q	La chaleur absorbée, [J].	Indice	
t	Coordonnée de temps, [s].	s	solide
T	Température, [K].	l	liquide
u, v	Composantes de la vitesse dans la phase liquide selon x et y, [$m s^{-1}$]	a	air
x ; y	Coordonnées spatiales, [m].	f	fusion
$h\theta$	coefficient d'échange local à la surface de la capsule [W/m^2K]	0	initiale
Re	nombre de Reynolds local [-]	e	entrée
n	Direction normale à la surface de la sphère [-]	θ	angle
p	pression [Pa]	eq	équivalente
d	distance entre les deux capsules [m]		

Références

- [1] Roy S.K., Sengupta S. (1990). Gravity-assisted melting in a spherical enclosure: effects of natural convection, International Journal of Heat and Mass Transfer 33 1135–1147.
- [2] Bahrami P.A. (1990). Natural Melting Within a Spherical Shell, Ames Research Center, Moffett Field, California, NASA Technical Memorandum 102822.
- [3] Assis E., Katsman L., Ziskind G., and Letan R. (2007). Numerical and experimental study of melting in a spherical shell. Int. J. Heat and Mass Transfer, 50:1790–1804
- [4] Elomari K. (2001). Etude de la convection autour d'un nodule sphérique contenant un Matériau à Changement de Phase au cours de sa cristallisation. PhD thesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- [5] B. J. Jones, D. Sun, S. Krishnan, S. Garimella "Experimental and numerical study of melting in a cylinder" International Journal of Heat and Mass Transfer 49 (2006) 2724–2738
- [6] Song D., Gupta R. K., Chhabra R.P. (2010). Effect of blockage on heat transfer from a sphere in power-law fluids, Ind. Eng. Chem. Res. 49 3849-3861.
- [7] Dhole S.D., Chhabra R.P., Eswaran V. (2006). A numerical study on the forced convection heat transfer from an isothermal and isoflux sphere in the steady symmetric flow regime International Journal of Heat and Mass Transfer 49 984–994.