



Full Length Research Paper

Etude Thermique Expérimentale des Suspensions Newtoniennes en Solutions du Glucose et de l'Eau en Ecoulement dans une Conduite Horizontale à Section Constante

Thermal Experimental Study of Newtonian Suspensions in Glucose and Water Solutions flowing in a Horizontal Conduit of Constant Section

Fagla B. F. Z.¹, Gradeck M.², Baravian C.², Vianou A.³, Dègan G.¹, Lebouché M.²

¹Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (LEMA), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi/Université d'Abomey-Calavi 01 B.P. 2009 Cotonou (Bénin).

²Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA) CNRS/INPL/UHP1, Avenue de la forêt de Haye - BP 160 54504 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex (France).

³Laboratoire de Caractérisation Thermophysique des Matériaux et d'Appropriation Energétique (C.T.M.A.E.), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi/Université d'Abomey-Calavi 01 B.P. 2009 Cotonou (Bénin).

Received Mars 2014 – Accepted October 2014



*Corresponding author. E-mail: fbzfagla@yahoo.fr

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé :

En industrie Agro-alimentaire beaucoup de produits nouveaux sont mis en consommation et parmi ces produits on trouve des fluides alimentaires chargés en grosses particules sphériques dures (diamètre moyen $D \approx 4,4$ mm et rapport d'aspect $d/D \approx 0,13$) appelés suspensions. Sur ce papier, nous exposons les résultats des travaux obtenus à l'issue de l'étude des suspensions newtoniennes (glucose et eau). Le chauffage en continu de ces suspensions en écoulement est un problème majeur pour les industriels et les chercheurs pour garantir les qualités aseptique et organoleptique qui en dépendent. Cette thermique du mélange de billes d'alginate (phase solide) dans un milieu newtonien (phase liquide) est analysée à l'aide de mesures de température couplées à des mesures de champ des vitesses. La prise en compte de la modification de la rhéologie des fluides suspendant (le glucose et l'eau) et l'approche « milieu effectif » validée pour les suspensions de grosses particules sont d'autres paramètres importants mis en évidence dans la présente étude.

Mots clefs : Mélange ; Suspension ; Solid ; liquide ; Particule ; Chauffage ; Hydrodynamique.

Abstract:

In the food industry a lot of new products are released for consumption and among them, there are food fluids loaded of large hard spherical particles (mean diameter $D \approx 4.4$ mm and ratio $d/D \approx 0.13$) called suspensions. In this paper, we present the results of the work obtained at the conclusion of the study of Newtonian suspensions (glucose and water). The continuous heating of these suspensions flow is a major problem for the industry and researchers order to ensure the aseptic and organoleptical qualities on which it depends. The thermal of the mixture of alginate beads (solid phase) in a Newtonian medium (liquid phase) is analyzed using the temperature measurements coupled to the velocity field measurements. Taking into account the modification of the rheology of suspendant fluids (glucose and water) and the "effective medium" validated for suspensions of large particles approach are other important parameters identified in this study.

Keywords: Mixture; Suspension; Solid-liquid; Particle; Heating; Hydrodynamics.

Cite this article:

Fagla B. F. Z., Gradeck M., Baravian C., Vianou A., Dègan G., Lebouché M. (2015). Etude Thermique Expérimentale des Suspensions Newtoniennes en Solutions du Glucose et de l'Eau en Ecoulement dans une Conduite Horizontale à Section Constante. *Revue CAMES – Sci. Appl. & de l'Ing.*, Vol. 1(2), 109-121. ISSN 2312-8712.

1. Introduction

Les industriels du secteur Agro-alimentaire (IAA) font preuve d'imagination pour proposer de nouveaux produits aux consommateurs. Ceci pose, sans cesse, de nouveaux problèmes à résoudre notamment pour garantir des propriétés organoleptiques et stériles de ces produits destinés à une consommation à grande échelle. Ces nouveaux produits (desserts lactés, sauces, soupes, plats cuisinés,...) ont souvent un comportement rhéologique complexe, newtonien. De plus, ces fluides sont, de plus en plus, souvent chargés en particules solides (yoghourts avec des morceaux de fruits, confitures,..) qui modifient complètement l'hydrodynamique et la thermique de l'écoulement du fluide porteur. Tous les fluides et mélanges produits par les industries agro-alimentaires présentent des propriétés rhéologiques complexes, éventuellement dépendantes du temps. La connaissance de ces propriétés est primordiale afin de modéliser, avec précision, toutes les phases d'un procédé pendant lequel le produit va subir de multiples transformations physico-chimiques lors des phases de transport, et de chauffage.

Dans le cas des fluides très visqueux, chargés en particules ou non, le transfert thermique s'effectue essentiellement par conduction de la paroi de la veine vers le cœur de l'écoulement. Ce mode de transfert accentue les temps de séjour et peut conduire à des dénaturations du produit dans la zone pariétale (encrassement en paroi, brûlage) sans garantir l'aseptisation complète du fluide et des particules (Chong, 1971). Il existe déjà des procédés permettant un brassage correct des fluides très visqueux.

L'emploi d'échangeurs à plaques est délicat voire impossible dans le cas des suspensions solide-liquide car ils peuvent occasionner une dénaturation des particules et leur diamètre hydraulique est trop faible pour permettre le passage de la suspension. Les mécanismes de transfert de chaleur entre le liquide chargé et la paroi, entre le liquide et les particules sont encore des problèmes mal maîtrisés. Les enjeux importants qu'ils suscitent, méritent des études théoriques et expérimentales. Les facteurs influant sur le transport et le transfert de chaleur des liquides chargés ont été identifiés. Il s'agit de la taille des particules, de la concentration en particules, du régime d'écoulement de la suspension, des caractéristiques rhéologiques des fluides porteurs, du diamètre hydraulique et du rapport de densité fluide-particule. Des études sur le transport hydraulique de particules solides permettent maintenant de bien appréhender le problème de la perte de charge, en conduite horizontale, qui est fortement lié au régime d'écoulement diphasique et à la thermique. Des auteurs comme Einstein (1905), Batchelor Green (1959), Batchelor Green (1972), ont travaillé sur des suspensions diluées et en ont déterminé la viscosité. Le calcul de la viscosité d'une suspension pour une concentration supérieure à quelques pour cent pose d'énormes problèmes car des interactions

hydrodynamiques se développent effectivement; les perturbations du champ des vitesses induites par la présence d'une particule ne sont plus négligeables aux environs des particules voisines. Le champ des vitesses au sein du fluide peut donc être complexe. De nombreuses approches, théoriques, semi-empiriques ou empiriques ont été proposées pour estimer la viscosité d'une suspension de particules rigides lorsque la concentration ϕ en particule est supérieure à quelques pour cent selon Kamal et al (1985), Utracki (1988). La plupart des formules obtenues prédisent des valeurs de viscosité assez proches et ont deux caractéristiques principales : elles sont identiques à la formule d'Einstein lorsque ϕ tend vers zéro, éventuellement moyennant quelques hypothèses concernant la valeur de la concentration d'entassement maximal ϕ_m utilisée dans le

modèle et prédisent, comme le confirment en première approximation les observations expérimentales, que la viscosité tend vers l'infini lorsque la concentration tend vers une concentration critique qui est souvent assimilée à ϕ_m , mais qui s'avère être seulement une concentration de référence pour des suspensions de particules de formes quelconques. Thomas (1965) a proposé une expression de la viscosité relative de particules fines en solution dans l'eau. Coussot (1999), a établi une expression empirique de la viscosité du mélange et Chong et al. (1971), a établi des formules semi-empiriques par calage des résultats obtenus avec un grand nombre de suspensions monodisperses et polydisperses. Pour des dépendances $\eta(\phi)$, Krieger et Dougherty (1959), ont donné une solution correcte à l'approche théorique de Mooney (1951). Quemada (1998), a travaillé sur la fraction volumique maximum (fraction d'empilement maximum des particules. Des études sur le transport hydraulique de particules solides permettent d'appréhender le problème de la perte de charge, en tube horizontal, qui est fortement lié au régime d'écoulement diphasique: Chhabra (1990), Cheng, (1970), ont mis en évidence quatre principaux régimes d'écoulement (symétrique, asymétrique, en lit circulant et en lit stationnaire) qui sont essentiellement fonctions de la vitesse moyenne de la suspension et de la vitesse limite de chute des particules.

Les travaux menés par Hoareau (1996) sur les suspensions solide-liquide ont permis la caractérisation de la perte de charge d'un mélange diphasique (liquide rhéofluidifiant et sphères solides) en fonction de la concentration. Celui-ci a montré l'influence des sphères sur le transfert de chaleur.

Le transfert de chaleur a été quantifié, en général, par une équation mise au point par Newton (1701). Graetz (1883) a résolu l'équation de la chaleur en utilisant la méthode

de séparation de variables. Lévêque (1928) et Bird et al. (1977) ont mis en évidence l'expression du nombre de Nusselt moyen. D'autres valeurs locales du nombre de Nusselt ont été calculées à l'aide de méthodes de calcul numérique aux différences finies par Kays (1955), et des méthodes asymptotiques par Sellars et al. (1956) et Eckert et Drake (1972). Kono et al. (1979), Chandarama et al. (1989), Sastry et al. (1990), Heppell (1985) et de Stoforos et al (1991), et Balasubramanian et Sastry (1996) ont établi des lois de transfert dans des suspensions. La détermination du coefficient de transfert de chaleur à la paroi est insuffisante. Des réponses ont été apportées aux problèmes en relation avec le transfert de chaleur entre les particules et le fluide porteur (Fagla, 2002).

L'organisation en anneau monophasique du fluide porteur entourant la zone des particules au centre de la conduite est mise en évidence. Cet anneau monophasique, constitué par le fluide porteur, est lié à la couche quasi-libre de particule (couche « monophasique ») qui apparaît à la paroi. Ce phénomène repose le problème de stérilisation en continu des suspensions solide-liquide dans les Industries Agroalimentaires (IAA). Cette organisation est néfaste car les particules émigrent vers la zone froide où la stérilisation devient difficile (Fagla et al. 2005) et (Fagla et al., 2011). D'autres auteurs ont travaillé aussi sur des écoulements diphasiques solide-liquides (Rhafiki et al, 2009). Ils ont étudié le stockage et de distribution du froid par chaleur latente en traitant, d'une manière essentiellement numérique, les écoulements diphasiques avec changement de phase solide-liquide dans un échangeur. Deux types de matériaux, à changement de phase, ont été testés : coulis de glace et coulis stabilisés. Le coulis de glace est une suspension composée d'une phase porteuse. Pour modéliser les écoulements du coulis de glace, ils ont choisi une approche couplée : température-fraction de glace, basée sur l'hypothèse d'un équilibre thermodynamique entre les phases solide et liquide. Les résultats issus du modèle et de l'expérience sont en bon accord. Ils permettent d'estimer d'une manière précise le coefficient d'échange thermique local le long de l'échangeur. Dans le cas du coulis stabilisé, ils ont proposé un modèle physique homogène 2D décrivant l'écoulement en tenant compte des transferts thermiques, avec changement de phase, au cours d'un réchauffement

(fusion d'un corps pur et d'une solution binaire (ou d'un refroidissement (cristallisation d'un corps pur). Le modèle permet de déterminer le coefficient d'échange thermique entre le mélange diphasique et la paroi de l'échangeur. Enfin, ils ont développé un modèle à deux phases basé sur une approche Eulérienne. Celui-ci introduit les couplages entre les deux phases pour décrire les différents mécanismes de transferts de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Il offre de larges possibilités permettant, en particulier, d'étudier l'effet des interactions entre les phases liquide et solide, sur l'écoulement et les transferts thermiques au sein de la suspension. Barigou et al. (1998) ont étudié le transfert de chaleur dans un écoulement diphasique (solide-liquide) d'un fluide alimentaire chargé en vue d'assurer le processus de stérilisation en particules solides d'aliments. Les résultats obtenus consistent à réduire les besoins en énergie et à améliorer le contrôle du processus. Les auteurs ont montré, à travers la mécanique des fluides alimentaires chargés (solide-liquide) en écoulement, le transfert de chaleur fluide-particule et paroi-fluide. Selon cette étude, les techniques de mesure et des modèles mathématiques pour les estimer sont passés en revue, l'application des connaissances existantes à la conception de procédés aseptiques en continu est discutée, et les besoins de recherche sont mis en évidence. A travers cette étude, ils ont permis aux fabricants de produire des aliments de meilleure qualité par des procédés d'aseptisation en continu.

Les suspensions sont composées du fluide porteur et des particules solides de forme sphériques dont l'ensemble est disposé selon différents types arrangements d'empilement.

Il est nécessaire d'analyser quelques types d'arrangements d'empilement des sphères tels que l'empilement cubique et l'empilement cubique à face centrée.

La fraction volumique dans le cas de l'empilement cubique (figure 1) est donnée par l'«Equation (1)»:

$$\phi = \frac{4/3(\pi a^3)}{8a^3} = \frac{\pi}{6} \approx 0,52 \quad (1)$$

Pour $\phi \leq 0,52$ le système ne peut pas être solide car les particules peuvent bouger les unes par rapport aux autres (figure 1).

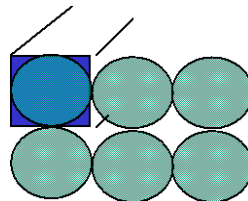


Figure 1. Empilement cubique des sphères dures.

Quant à la fraction volumique dans le cas de l'empilement cubique à face centrée (figure 2), elle a pour l'«Equation (2)» :

$$\phi_{CFC} = \frac{(8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2}) \frac{4}{3} \pi a^3}{(2\sqrt{2} \cdot a)^3} \approx 0,74 \quad (2)$$

Remarque : Même si on cherche expérimentalement l'empilement le plus compact, il y a toujours des imperfections d'où $0,74 > 0,72$.

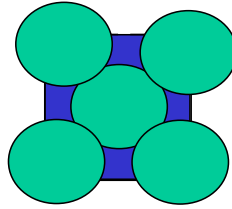


Figure 2. Empilement cubique à face centrée des sphères dures.

Les suspensions ont une masse volumique différente de la masse volumique du fluide suspendant. Elle est appelée la masse volumique du mélange. L'ajout de particules solides dans un liquide agit sur la masse volumique du mélange dont l'Equation (3) est :

$$\rho_m = \frac{1}{\sum \frac{C_{mi}}{\rho_i}} = \sum \phi_i \rho_i \quad (3)$$

où C_{mi} est la concentration massique de la phase i ;

ϕ_i est la concentration volumique de la phase i ;

ρ_i est la masse volumique de la phase i .

Cette formule s'applique aux mélanges considérés comme pseudohomogènes. Il est clair que la masse volumique va influencer le nombre de Reynolds de la particule et la vitesse limite de chute par l'Equation (4) :

$$\left(\rho_p - \rho_f \right) \quad (4)$$

Avec ρ_p : masse volumique de la particule

ρ_f : masse volumique du fluide.

Pour une particule parfaitement sphérique, Ψ est égale à 1. Ces différents paramètres interviennent dans le transport des suspensions isothermes ou non et contribuent à la compréhension des mécanismes qui sous-tendent l'écoulement des suspensions. Par conséquent, il est bon de rappeler le bilan des différentes forces qui favorisent cet écoulement. Ce bilan de Forces hydrodynamiques est étudié en faisant de l'analyse dimensionnelle.

En effet sur une sphère en mouvement dans un fluide (figure 3) s'exerce une force due à la contrainte visqueuse et aux efforts de la pression. Dans le cas d'un fluide infini, où le nombre de Reynolds de la particule est faible devant l'unité (écoulement de Stokes), les composantes du champ des vitesses et de la pression sont (en coordonnées sphériques) données par l'Equation (5), par l'Equation (6) et par l'Equation (7) :

$$v_r = u_p \cos \phi \left(\frac{3R}{2r} + \frac{R^3}{2r^3} \right) \quad (5)$$

$$v_\phi = -u_p \sin \phi \left(\frac{3R}{4r} + \frac{R^3}{4r^3} \right) \quad (6)$$

$$p = \frac{3}{2} u_p R \frac{\cos \phi}{r^2} \quad (7)$$

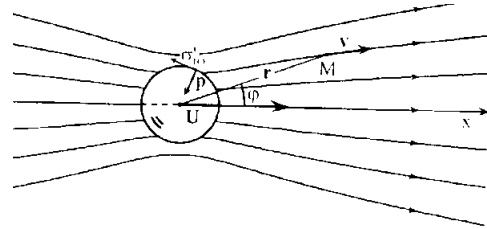


Figure 3. Lignes de courant de l'écoulement autour d'une sphère se déplaçant à une vitesse constante U dans un fluide au repos (Guyon et al., 2001).

Dans ce cas, les contraintes normale, soit l'Equation (8) et tangentielle, soit l'Equation (9) s'écrivent respectivement :

$$\sigma_{rr} = \left[-p + 2\eta \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right) \right]_{r=R} = \frac{3}{2} \eta \frac{U \cos \phi}{R} \quad (8)$$

$$\sigma_{r\phi} = \eta \left[\left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + \frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi}{r} \right) \right]_{r=R} = \frac{3}{2} \eta \frac{U \sin \phi}{R} = \tau \quad (9)$$

La Force résultante par unité de surface en tout point de la sphère est donnée donc par l'Equation (10)

$$\frac{dF}{dS} = \sigma \cdot n = \sigma_{rr} e_r + \sigma_{r\phi} e_\phi = -\frac{3}{2} \frac{\eta u_p}{R} \quad (10)$$

Cette force est opposée à u_p car les composantes radiale et orthoradiale de u_p sont respectivement $(u_p \cos \phi)$ et $(-u_p \sin \phi)$. On en déduit la force de traînée totale : c'est la formule de Stokes exprimée par l'Equation (11) :

$$F = \frac{dF}{dS} 4\pi R^2 = -6\pi \eta R u_p \quad (11)$$

Elle est vérifiée jusqu'à un nombre de Reynolds de l'ordre de l'unité (alors qu'elle a été établie sous l'hypothèse plus restrictive de $Re \ll 1$). C'est l'équation de mouvement de Stokes. Si le rapport $d/D \leq 0,3307$ et à faible débit, les valeurs du coefficient d'échange de Sastry et al sont de l'ordre des valeurs données par les corrélations. Dès que le rapport d/D augmente, les corrélations sous évaluent le coefficient d'échange h. Au fur et à mesure que le rapport d/D augmente, l'influence de la paroi devient importante. Dans cette étude la particule est soumise au champ de vitesse du régime turbulent ($7300 \leq Re \leq 43600$).

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel

2.1.1. Dispositif expérimental

Le schéma de la boucle d'essais expérimental schématisé sur la figure 4 ci-dessous est essentiellement constitué d'une boucle d'essais et d'une veine d'expérience (5). Le montage est composé d'un groupe motopompe (2), d'un échangeur tubulaire en graphite (3), d'un bac en amont, d'un tube en chlorure de polyvinyle (PVC) placé en aval du bac en amont (4), d'un tube de PMMA (polyméthacrylate de méthyle) transparent, d'une veine de mesure, d'une conduite de dérivation, d'un débitmètre électromagnétique et d'un bac aval (1). La présence d'une phase de particules solides sensibles aux contraintes mécaniques a déterminé le choix du groupe motopompe. Celui qui est utilisé, est suffisamment puissant pour permettre l'écoulement des produits très visqueux à des débits approchant les 12 m³/h (vitesse débitante $U_d = 4,6$ m/s). C'est une pompe centrifuge à roue semi-ouverte et à rotor hélicoïdal afin de ne pas dégrader trop vite la phase solide. En sortie de pompe, le mélange aspiré du bac aval est refoulé dans un échangeur tubulaire en graphite, destiné à réguler la température du mélange. La température d'entrée de la suspension dans la veine d'essais est maintenue constante avec une précision de 0,2°C. Ensuite, le mélange arrive dans un bac amont destiné à amortir les pulsations dans l'écoulement induites par la pompe à homogénéiser le mélange liquide-solide et la température. Un tube de chlorure de polyvinyle (P.V.C.) d'une longueur de 34,54 diamètres (soit 1,05 m), et un autre tube transparent de polyméthacrylate de méthyle (PMMA) d'une longueur de 39,87 diamètres (soit 1,212 m), disposés successivement en série et de même diamètre (0,0304 m), permettent d'obtenir l'établissement dynamique de

l'écoulement. Ils sont suivis de la veine d'expérience qui est aussi en P.M.M.A. Une conduite de dérivation relie la sortie du bac amont au bac aval ; elle permet d'adapter le débit du mélange aux conditions de manipulation désirées. En sortie de la zone de mesures, un débitmètre électromagnétique (7), constitué d'un élément cylindrique en Téflon et de deux électrodes de platine, mesure le débit en temps réel. Un bac en aval, placé en sortie de la veine d'expérience et de la conduite de dérivation, a pour but de tranquilliser l'écoulement, d'assurer une charge minimale sur la pompe et d'introduire les phases solide et liquide dans la conduite. Des prises de pression à l'entrée et à la sortie de la veine d'essais permettent la mesure des pertes de charge à l'aide d'un capteur de pression différentiel (6). Pour effectuer la mesure de la perte de charge dans une conduite, nous avons utilisé un tube de P. M. M. A. Deux prises de pression placées à chaque extrémité du tube P. M. M. A. permettent d'effectuer la mesure de perte de charge sur une longueur de 2,225.m. Les tubes sont adaptés à la mise en œuvre de diverses techniques de mesures telles que l'utilisation de la vélocimétrie ultrasonore à effet Doppler et la vélocimétrie laser à effet Doppler (LDA). Pour les essais en situation anisotherme, on utilise une veine d'essais en cuivre (longueur totale, 2,16 m) autour de laquelle un fil chauffant (Thermocoax) est bobiné (5). Cette veine permet un chauffage électrique pariétal à densité de flux constante (Puissance maximale est de 4126 W); 55 thermocouples insérés dans la paroi permettent de mesurer la température pariétale locale le long du tube en cuivre. Les températures mesurées sont enregistrées avec une centrale d'acquisition des données du type AOIP SA 70, pilotée à l'aide d'un Personal Computer muni d'un logiciel d'exploitation "AOIP Instrumentation".

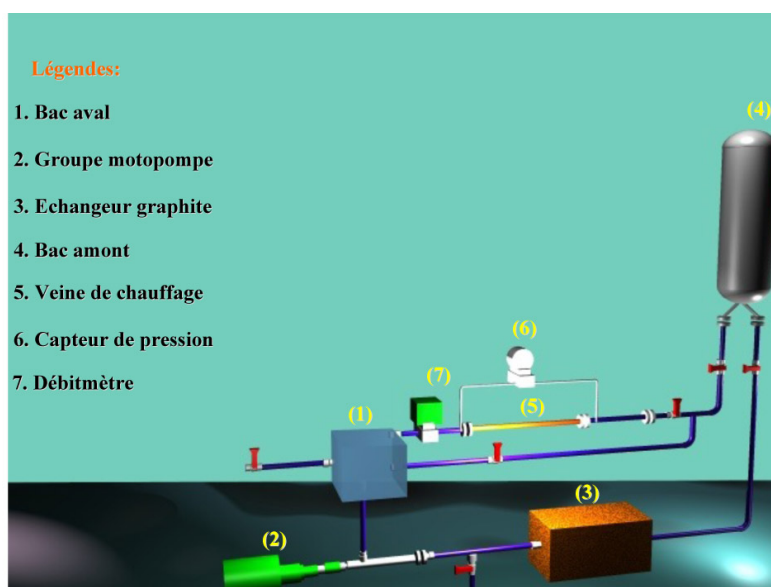


Figure 4. Schéma de la boucle d'essais

2.1.2. Fluides de travail - mélange

2.1.2.1. Cas de l'eau

Elles varient faiblement en fonction de la température. La masse volumique diminue avec l'augmentation de la température, la chaleur spécifique croît avec

l'augmentation de la température et la conductivité thermique augmente avec la croissance de la température.

L'eau est un fluide au comportement newtonien thermodépendant avec une viscosité dynamique

constante quelle que soit le taux de cisaillement auquel elle est soumise.

2.1.2.2. Cas du glucose

Le sirop de glucose est fabriqué à partir de blé avec une masse volumique de $1437,1 \text{ kg/m}^3$. Concentré c'est un fluide newtonien très visqueux au toucher, avec une viscosité élevée, constante égale à $24,63 \text{ Pa.s}$ à 20°C . La viscosité dynamique de la solution du sirop de glucose varie en fonction de la température. Elle est fortement thermodépendante. Le fluide a été dilué à différentes concentrations. Sa conductivité thermique (λ) est égale à $0,404 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ (données fournies par le fabricant) (figure 5). Les fluides porteurs newtoniens, objets de notre étude sont du sirop de glucose et l'eau. Nous avons dilué du sirop de glucose dans de l'eau, à différentes concentrations soit 11 %, 20 %, 35 % et 89 % en volume. Les différents essais effectués ont permis de

constater que la solution de glucose à 89 % a une viscosité trop élevée et ne correspond pas à celle que nous recherchons alors qu'à 65 %, elle est trop diluée. Après plusieurs tests, nous avons choisi la solution de glucose à 80% dont la masse volumique est de $1141,3 \text{ kg/m}^3$. Des mesures faites ont permis d'établir le rhéogramme de cette solution qu'on observe à la figure 5. La préservation de la solution contre la dégradation bactérienne est assurée par l'ajout de quelques gouttes de solution de formaldéhyde à 150 litres de solution de glucose. Une vérification des effets de la température sur la viscosité de la solution du sirop de glucose effectuée a permis de confirmer son comportement newtonien avec une viscosité allant jusqu'à $0,069 \text{ Pa.s}$ à la température de 20°C . La viscosité dynamique de la solution du sirop de glucose varie en fonction de la température. Elle est fortement thermodépendante (figure 6).

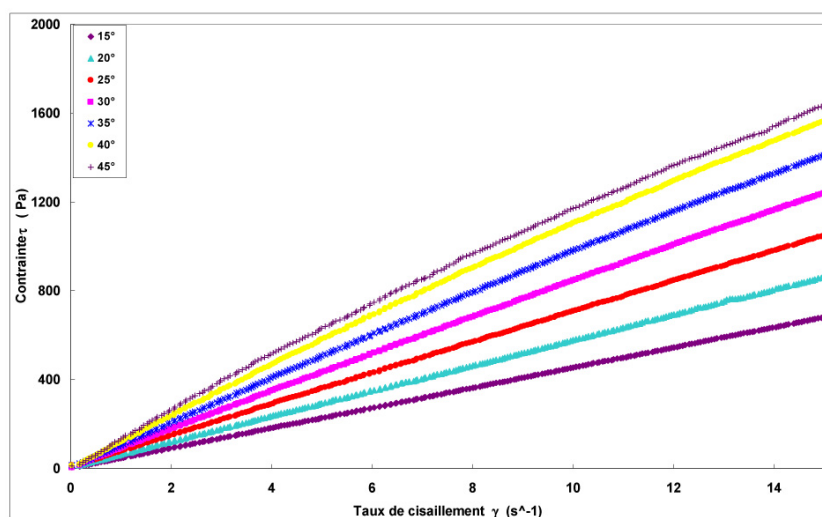


Figure 5. Rhéogramme de sirop de glucose concentrée à 80%

2.1.3. Production des sphères d'alginate et problèmes d'écoulements de la phase solide en suspension (mélange)

La phase solide est constituée de sphères dures d'alginate d'un diamètre moyen de l'ordre de 4,4 mm. Elles sont obtenues en faisant tomber, goutte à goutte, une solution liquide d'alginate dans un bain de chlorure de calcium (CaCl_2) où les sphères formées pendant leur chute polymérisent une fois en contact avec cette solution.

La méthode de fabrication des sphères d'alginate a été communiquée par le CERIA de Bruxelles. Les travaux de thèse de Hoareau (1996) nous ont permis de connaître la méthode de fabrication des sphères d'alginate. Une solution à 3% d'alginate (Protanal F 10/60 ou Protanal S

F 120) soit 600 grammes de Protanal pour 20 litres d'eau déminéralisée. La formule chimique de l'alginate de sodium ou polymannuronate de sodium est $(\text{NaC}_6\text{H}_7\text{O}_6)_n$. La solution a été brassée jusqu'à homogénéisation complète. Un dispositif permet de faire couler cette solution goutte à goutte dans un bac contenant une solution de chlorure de calcium (CaCl_2) à raison de 20 grammes par litres. La goutte, prenant la forme d'une sphère pendant la chute libre, polymérise en surface au contact de la solution saline.

Il faut environ une heure pour assurer une complète polymérisation des sphères mais leur tenue mécanique est d'autant meilleure que le temps passé dans la solution est long.

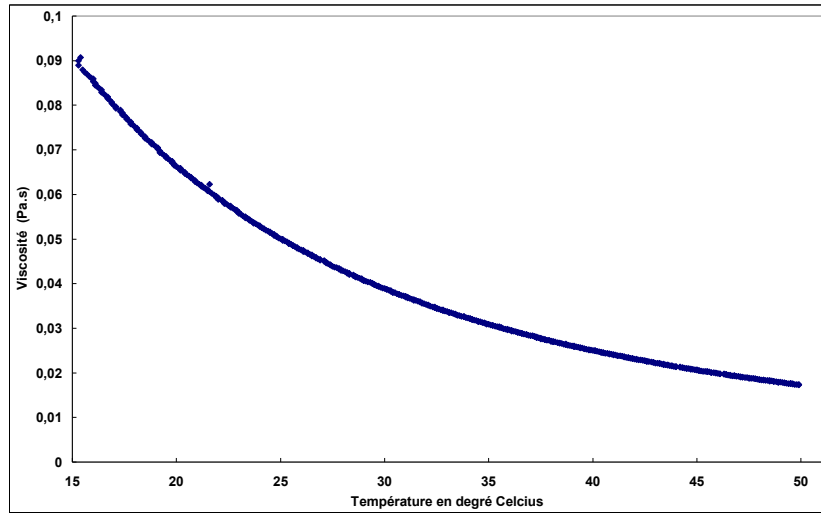


Figure 6. Variation de la viscosité de la solution de glucose en fonction de la température.

2.2. Méthodes

2.2.1 Etude dynamique -Etude des pertes de charge dans les suspensions à base de fluides newtoniens eau et solution de glucose

Plusieurs concentrations (1%, 3%, 5% et 10%) en particules sphériques en suspensions monodisperses dans la solution de sirop de glucose ont été étudiées. Il est proposé d'étudier, en régimes laminaire et turbulent, les pertes de charge des suspensions de particules solides en écoulement isotherme suivant plusieurs hypothèses. L'hypothèse du fluide « homogène » est faite en considérant que la suspension (mélange diphasique) se comporte comme un fluide homogène newtonien équivalent; nous pouvons déduire la viscosité apparente de la suspension à partir des mesures de débit et de perte de charge, pour un écoulement en conduite. Le gradient

longitudinal de pression ($\frac{\Delta P}{L}$) est relié à la contrainte pariétale par la loi linéaire donnée par l'«Equation (12)» (12) et l'«Equation (13)» :

$$\tau_p = \frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{D}{4} \tag{12}$$

$$\tau_p = \eta_{ap} \dot{\gamma}_p = \eta_{ap} \left(\frac{8U_d}{D} \right) \tag{13}$$

avec η_{ap} est la viscosité apparente du mélange.

2.2.2 Transfert de la chaleur dans un écoulement de suspensions solide-liquide

Le mécanisme de transfert de chaleur dans les écoulements chargés sont régis par plusieurs types d'échanges. Il y a des échanges de chaleurs particule/fluide, particule/particule, particule/paroi et fluide/paroi.

2.2.2.1 Echange de chaleur particule/fluide

L'échange de chaleur particule/fluide est donné par l'«Equation (14)»:

$$Nu = 2 + f(Re_{part.}, Pr) \tag{14}$$

avec $Re_{part.}$ est le nombre de Reynolds calculé en connaissant la vitesse de glissement de la particule au sein du fluide.

2.2.2.2 Echange de chaleur particule/particule, paroi/fluide et paroi/particule

Si, en général, l'échange de chaleur particule/particule est négligeable aux faibles concentrations, les échanges de chaleur paroi/fluide et paroi/particule ne sont pas discernables l'un de l'autre ; Ils sont ensemble pris en compte par une mesure de température pariétale sur la base d'un bilan thermique. Pour qualifier l'échange de chaleur entre le fluide et les particules, une étude de l'évolution au cœur de l'une des particules, fixe ou mobile, permet d'établir les lois de transfert (Cf. figure 7).

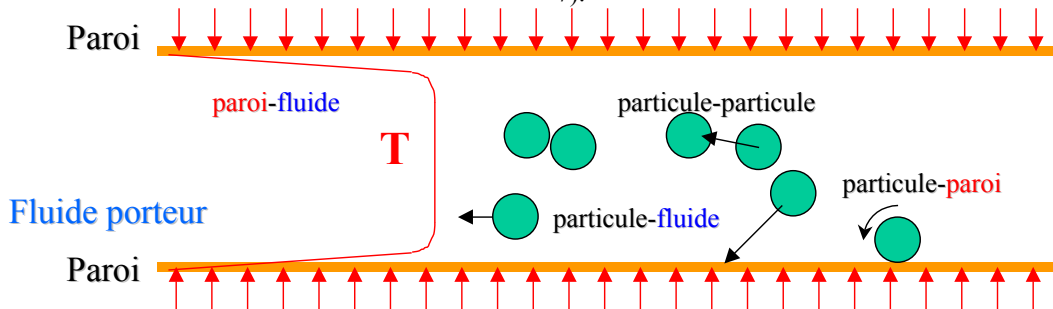


Figure 7. Chauffage à flux constant, imposé électriquement. Mécanismes des différents types d'échanges de chaleur dans un écoulement chargé.

2.2.2.3 Calcul de l'épaisseur de la couche limite thermique dans une suspension en écoulement

Pour mieux apprécier le phénomène du transfert thermique dans une suspension de particule, il est nécessaire de vérifier comment se développe la couche limite thermique au sein de la suspension. Pour ce faire nous allons nous servir de l'équation du bilan thermique. La température du mélange est donnée par l'expression :

$$T_m(z) = T_e + \frac{\phi_P}{M.C.P}$$

La densité de flux de chaleur est donnée par l'expression $\phi(z) = h(z)(T_P - T_\infty)$ et qui peut être aussi de la forme :

$$\phi(z) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = -\lambda_{fluide} \frac{T_P - T_\infty}{\delta}$$

2.2.3 Etude du transfert thermique dans des suspensions

2.2.3.1 Equation de l'énergie

La détermination du coefficient d'échange h suppose la connaissance des champs dynamique et thermique, et donc, la résolution des trois équations (de continuité, de mouvement et de chaleur). En faisant l'hypothèse de propriétés physiques constantes, on peut découpler les équations et entrer le champ de vitesse isotherme dans l'équation de l'énergie.

Graetz (1883) a résolu cette équation dans le cas newtonien en négligeant la dissipation visqueuse et la diffusion radiale (problème de Graetz). Il reste l'"Equation (16)" :

$$\rho C_p u \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (16)$$

Il convient de rappeler les nombres adimensionnels et les variables qui interviennent dans la détermination des lois de transfert.

2.2.3.2 Température du mélange

Il y a lieu de déterminer les lois de transfert thermique entre le fluide (ou la suspension) et la paroi, pour les différents régimes d'écoulement. Nous procédons ici à l'étude expérimentale de transfert de chaleur dans un écoulement de suspensions avec des fluides porteurs newtoniens (sirop de glucose et de l'eau). Cette étude nous permettra de mettre en évidence l'influence des particules sur la convection en déterminant le coefficient d'échange h en supposant la connaissance des champs dynamique et thermique donc, en la résolvant les trois équations (de continuité, de mouvement et de chaleur). En faisant l'hypothèse de propriétés physiques constantes, on peut découpler les équations et entrer le champ de vitesse isotherme dans l'équation de l'énergie. Cette analyse est faite à l'aide de nombres adimensionnels et les variables qui interviennent dans la détermination des lois de transfert. C'est le cas du nombre de Nusselt local défini par l'"Equation (17)" :

La densité de flux de chaleur fournie par la paroi est donnée par :

$$\phi(z) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = -\lambda_{paroi} \frac{T_P - T_\infty}{\delta} = \phi_{connue}$$

Rappelons que :

$$Nu = \frac{h(z)\delta}{\lambda_{fluide}}$$

Ainsi

$$Nu = \frac{hD}{\lambda_{fluide}} = \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) D}{T_P - T_\infty} \text{ or } \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = \frac{T_P - T_\infty}{\delta}$$

D'où

$$Nu(z) \approx \frac{D}{\delta(z)} \rightarrow \delta(z) \approx \frac{D}{Nu} \quad (15)$$

$$Nu(z) = \frac{h(z).D}{\lambda}$$

$$Nu(z) = \frac{\phi_P.D}{[T_P(z) - T_m(z)].\lambda} \quad (17)$$

La position axiale z est souvent présentée sous forme adimensionnelle. Le nombre de Cameron (X^+) est défini par l'"Equation (18)" :

$$X^+ = \frac{2(z/D)}{Re.Pr} \quad (18)$$

Ce nombre adimensionnel est la position axiale z . Le nombre de Cameron est inversement proportionnel au nombre de Graetz (Gz) décrit par l'"Equation (19)" et l'"Equation (20)" :

$$Gz = \frac{\pi Re.Pr}{4z/D} \quad (19)$$

$$Gz = \frac{\pi}{2X^+} \quad (20)$$

Le nombre de Nusselt est une caractéristique thermique. Il a pour "Equation (21)" :

$$Nu = h \cdot \frac{D}{\lambda} = \frac{\phi_P}{T_P - T_m} \cdot \frac{D}{\lambda} \quad (21)$$

avec, la densité de flux de chaleur à la paroi. Elle se calcule à partir de la loi de Fourier exprimée par "Equation (22)"

$$\phi_P = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (22)$$

avec λ , la conductivité thermique du fluide ; T_p température à la paroi ; D , diamètre de la conduite ; h , coefficient d'échange thermique ; T_m , température du mélange. La température du mélange solide-liquide $[T_m(z)]$ exprimée par l'Equation (23) qui est obtenue à partir du bilan d'un élément chauffé sur la longueur z soit :

$$T_m(z) = T_e + \frac{\pi \cdot D \cdot \phi_p \cdot z}{\dot{M} \cdot C_p} \quad (23)$$

Nous présentons ici les lois de transfert thermique auxquelles nous allons comparer nos résultats expérimentaux, à l'aide des résultats des travaux antérieurs. En régime thermique non établi pour un fluide newtonien et dans le cas d'un chauffage à densité de flux constante imposée, le nombre de Nusselt local est donné par Graetz (1885) soit l'Equation (24)''

$$Nu(z) = Cte \cdot (X^+)^{-\frac{1}{3}} \quad (24)$$

Nous avons élaboré deux lois de transfert thermique, l'une dans une suspension à base de la solution de glucose, qui est donnée par l'Equation (25)'' suivante :

$$Nu(z) = 1,04 \left[\frac{\phi_p \cdot D}{2 \cdot \lambda} \right]^{0,14} \cdot (X^+)^{-\frac{1}{3}} \quad (25)$$

et l'autre dans une suspension à base d'eau, qui est donnée par l'Equation (26)'' suivante :

$$Nu(z) = 0,94 \cdot \left[\frac{\phi_p \cdot D}{2 \cdot \lambda} \right]^{0,14} \cdot (X^+)^{-\frac{1}{3}} \quad (26)$$

3. Résultats et discussion

3.1. Etude thermique

Pour étudier l'effet simultané de la concentration en particules et du débit sur le transfert de chaleur, il a été testé plusieurs mélanges de particules à différentes

fractions volumiques (1%, 3%, 5% 7% et 10%) qui sont chauffés successivement à 1000 W/m² et à 15000 W/m² pour vérifier que les effets de thermodépendance sont encore significatifs. Nous analysons les profils longitudinaux et radiaux de température. Nous présentons dans cette partie l'analyse des profils longitudinaux de températures mesurées à la paroi chauffée pour les suspensions newtoniennes. Les profils radiaux de température, mesurés en sortie de la zone chauffée, sont aussi analysés.

3.2 Influence du débit dans des suspensions à base de glucose

Sur les figures 8 et 9, nous présentons des résultats relatifs à une suspension à 1% (faible concentration) que nous chauffons à différentes densités de flux de chaleur. A faible fraction volumique (1%), le régime thermique est d'abord non établi à faible nombre de Cameron puis s'établit d'autant plus rapidement que le débit augmente (figure 8 et 9). On constate qu'en présence de particules (à 1%), le régime thermique turbulent est observé dès $Re_{eff} = 1023$ ($X^+ > 5 \cdot 10^{-4}$) et qu'il est obtenu de manière de plus en plus précoce (valeurs de X^+ plus faibles) lorsque le nombre de Reynolds croît. Pour $Re_{eff} = 2456$ et 3070, la valeur critique de X^+ est la même. Pour une densité de flux égale à 1000 W/m², nous constatons que le régime thermique n'est pas établi à $X^+ > 10^{-4}$ en régime laminaire ($Re_{eff} = 1023$) alors qu'en régime turbulent ($Re_{eff} = 3070$) le régime thermique est établi à faible nombre de Cameron (soit $X^+ \leq 10^{-5}$) (figure 8). Pour une densité de flux égale à 15000 W/m², le régime thermique n'est pas établi à $X^+ > 10^{-4}$ pour le régime laminaire ($Re_{eff} \leq 1459$) alors que pour le régime turbulent ($Re_{eff} = 3127$) le régime thermique est non établi à faible nombre de Cameron ($X^+ < 10^{-5}$). Il s'établit ensuite à partir de ($X^+ \geq 4 \cdot 10^{-5}$). (figure 9).

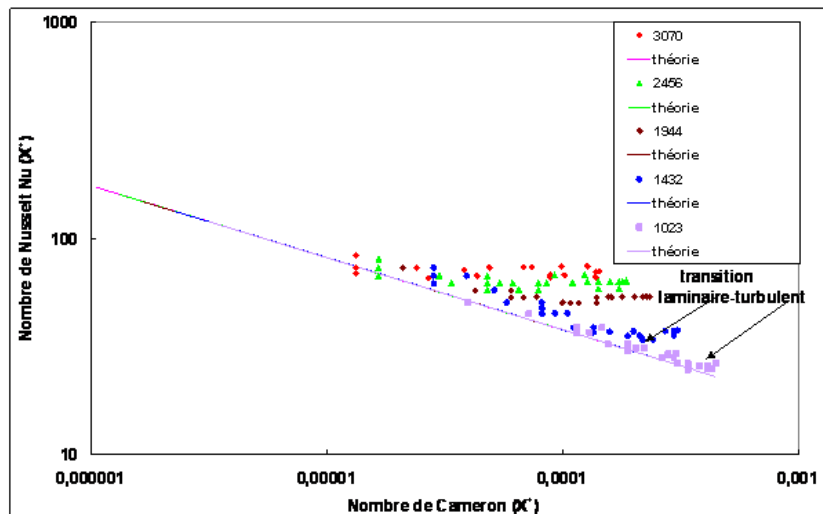


Figure 8. Evolution du nombre de Nusselt local en fonction du nombre de Cameron pour différentes valeurs de débit donc de différents nombres de Reynolds d'écoulements de suspensions à base de glucose à la densité de flux de chaleur ϕ_p constante avec $\phi_p = 1000$ W/m² et à la fraction volumique ϕ constante avec $\phi = 1\%$.

3.3 Cas de l'écoulement turbulent

Pour obtenir un régime turbulent développé, nous avons utilisé l'eau comme fluide porteur. Les résultats que nous présentons donnent l'évolution du nombre de Nusselt local en fonction du nombre de Cameron. Nous constatons que le nombre de Nusselt augmente avec le débit et le régime thermique est constamment établi (figure 10). Pour différentes densités de flux de chaleur, évoluant entre 5000 W/m² et 15000 W/m², et pour une vitesse débitante constante (Ud = 3,25 m/s, Re = 98890) le régime thermique est établi et le nombre de Nusselt est constant (Nu = 850).

Sur la figure 10, nous avons tracé la courbe d'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Cameron (X⁺) à différents nombres de Reynolds ; nous constatons que le régime thermique est établi pour ces différents Re. Ce qui s'explique par le fait que le développement de la couche limite thermique est bloqué par le noyau turbulent. En conséquence la relation de Moudachirou n'est pas applicable dans le cas de régime turbulent (figure 10).

3.4 Profils longitudinaux

La répartition des thermocouples le long du tube chauffé nous permettent d'obtenir des profils de la température de paroi tels que ceux présentés sur les figures 11 et 12. Les suspensions considérées sont des suspensions newtoniennes (eau ou glucose + particules). Ces relevés expérimentaux confirment les résultats bien connus relatifs à la théorie des couches limites. En effet, pour les faibles valeurs de z/D, nous observons une augmentation rapide de la température, suivie d'un accroissement moins marqué. Ces évolutions correspondent bien à la naissance et au développement d'une couche limite thermique. Nous pouvons remarquer que pour un même nombre de Reynolds Re = 2007, la température pariétale est toujours plus élevée dans le cas monophasique que dans le cas des suspensions (Te = 20°C ; vitesse débitante constante). La température pariétale diminue à mesure que la fraction volumique des particules augmente (figures 11 et 12). La température pariétale atteint une limite constante dans les cas de l'écoulement turbulent pleinement développé (figure 12) et dans tous les cas de suspensions dont la concentration est supérieure à 1%.

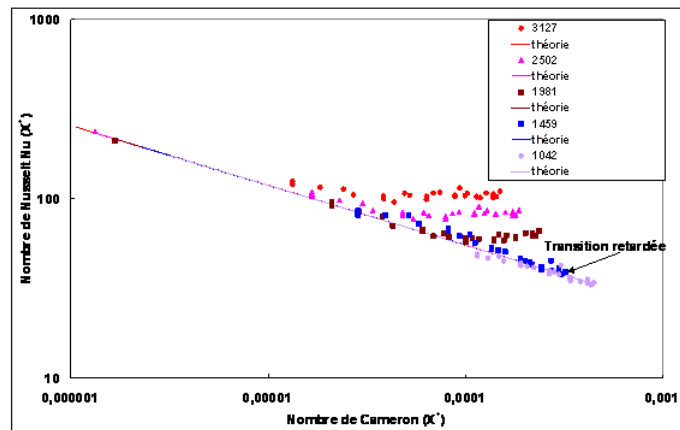


Figure 9. Evolution du nombre de Nusselt local en fonction du nombre de Cameron pour différentes valeurs de débit donc de différents nombres de Reynolds d'écoulements de suspensions à base de glucose à la densité de flux de chaleur ϕ_p constante avec $\phi_p = 15000 \text{ W/m}^2$ et à la fraction volumique ϕ constante avec $\phi = 1\%$.

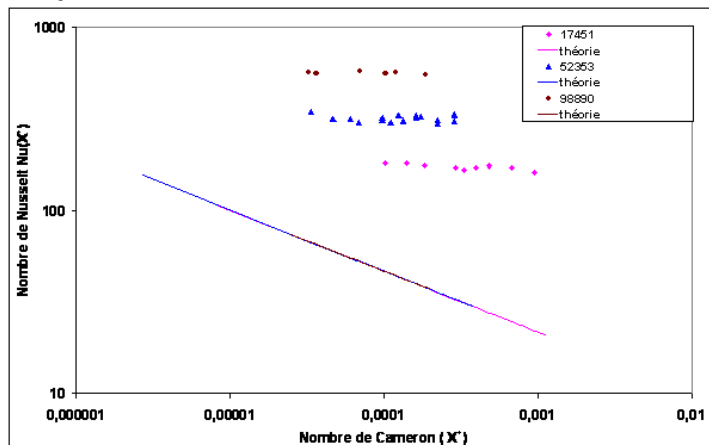


Figure 10. Evolution du nombre de Nusselt local en fonction du nombre de Cameron(x⁺) pour différentes valeurs de débit donc de différents nombres de Reynolds d'écoulements de suspensions à base d'eau à la densité de flux de chaleur ϕ_p constante avec $\phi_p = 15000 \text{ W/m}^2$ et à la fraction volumique ϕ constante avec $\phi = 1\%$.

3.5 Profils radiaux de température

Sur la figure 13, nous donnons l'évolution de la température radiale dans le cas monophasique (eau) et dans le cas diphasique (suspension à 1%). La température proche de la paroi, siège du transfert thermique, est élevée; elle chute rapidement (couche limite thermique) pour atteindre une valeur proche de la température d'entrée (20°C) au cœur de l'écoulement. Nous interprétons ces deux cas précédents par le fait que la couche limite reste mince et le cœur de l'écoulement n'est pratiquement pas chauffé. La présence des

particules, même en faible fraction volumique, conduit à une diminution sensible de l'épaisseur de la couche limite thermique (figure 13). Il est mis en évidence que la couche limite thermique est moins développée dans le cas diphasique. De même il est clair que les effets convectifs des particules (perturbation de la couche limite) conduit à un accroissement du coefficient d'échange donc à une diminution de la température pariétale et à un établissement plus rapide du régime thermique connu pour la turbulence.

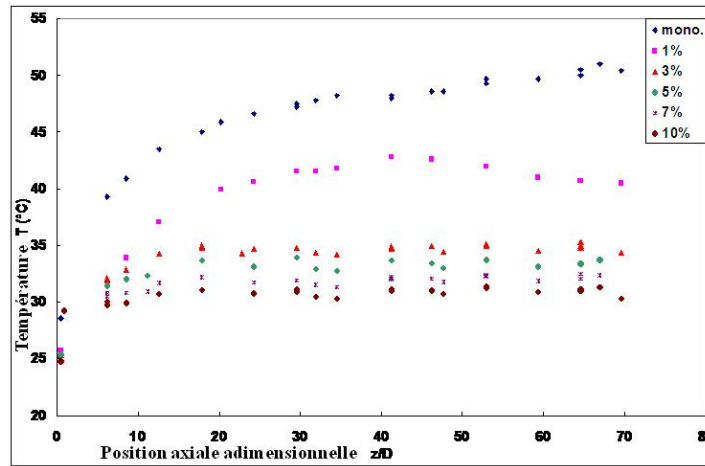


Figure 11. Evolution longitudinale de la température de paroi à différentes fractions volumiques dans des suspensions à base de sirop de glucose à densité de flux de chaleur constante $\phi_p = 15000 \text{ W/m}^2$, à vitesse U_d constante avec $U_d = 1,38 \text{ m/s}$ donc à un nombre de Reynolds Re constant avec $Re = 2007$.

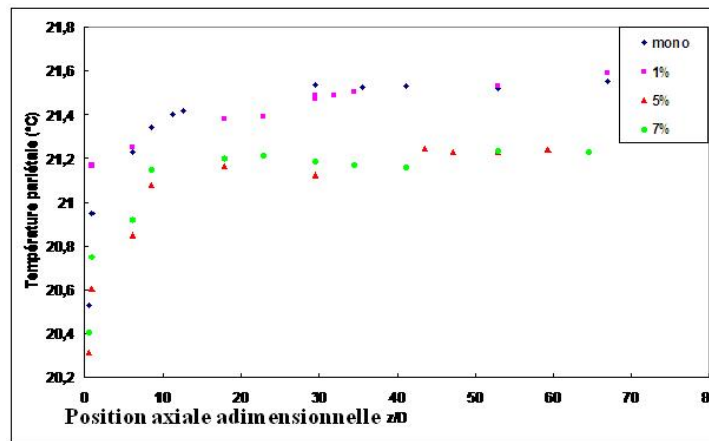


Figure 12. Evolution longitudinale de la température à la paroi à différentes fractions volumiques dans des suspensions à base d'eau à densité de flux de chaleur ϕ_p constante avec $\phi_p = 15000 \text{ W/m}^2$, à vitesse U_d constante avec $U_d = 3,25 \text{ m/s}$ donc à un nombre de Reynolds Re constant avec $Re = 98890$.

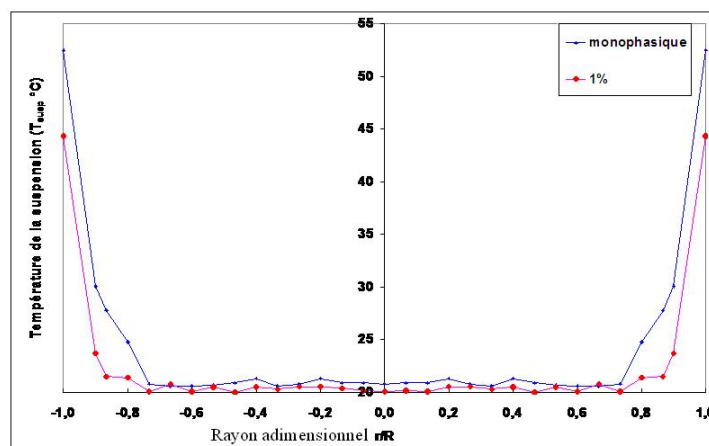


Figure 13. Distribution de température radiale en sortie de zone chauffée du sirop de glucose dans une suspension à la fraction volumique constante de 1%, à la vitesse constante de $U_d = 1,5$ m/s et à la densité de flux de chaleur $\phi_p = 10\,000$ W/m² et au rapport $z/D = 71$.

4. Conclusion

Cette étude met clairement en évidence les limites de la stérilisation des fluides alimentaires en présence des particules sphériques et pose le problème de la stérilisation en continu. Elle a permis de mieux comprendre le transfert thermique et le couplage mécanique dans l'écoulement des suspensions newtoniennes. Elle ouvre un champ d'investigation sur l'influence de la thermorhéologie sur le champ dynamique des vitesses et la répartition du champ thermique. Au cours de cette étude les résultats obtenus en thermique des suspensions montrent que l'ajout de particules influence fortement le transfert paroi-fluide et que la transition entre le régime laminaire et turbulent est d'autant plus précoce que la concentration en particules sphériques est élevée. Ces particules sphériques, bien qu'ayant tendance à favoriser le transfert thermique par le transport de vorticité (amélioration du mélange), limitent l'étendue radiale de la couche limite thermique en déstabilisant l'écoulement. Cette étude sera complétée ultérieurement pour des suspensions de particules de tailles variées et de fluides suspendants présentant une thermor ologie différente.

REFERENCES

- [1] J. S. Chong, E. B. Christiansen, and A. D. Baer, "Rheology of Concentrated Suspensions", *Journal of Applied Polymer Science*, N^o15, 1971, pp. 2007-2021.
- [2] A. Einstein, *Ann. Phys., Lpz.*, N^o19, 1905, pp.289.
- [3] G. K. Batchelor, "Sedimentation in a dilute dispersion of spheres", *J. Fluid Mech.* N^o52, 1959, pp. 245-268.
- [4] G. K. Batchelor, and J. T. Green, "The determination of the bulk stress in a suspension of the spherical particles to order ϕ^2 ", *J. Fluid Mech.*, N^o56, 1972, p.375.
- [5] M. R. Kamal, and A. Mutel, "Rheological properties of suspensions in Newtonian and non newtonian fluids". *J. Polymer Eng.*, (5), 1985, pp. 293-392.
- [6] L. A. Utracki, "The rheology of two phase flows. In rheometrical Measurement", A.A. Collyer and D. W. Clegg (Ed.), Amsterdam, Elsevier Applied Science, Chapter 15, 1988, p. 479.
- [7] D. G. Thomas, "Transport characteristics of suspension", *J. Colloid Sci.*, (20), 1965, pp. 267-277.
- [8] P. Coussot et C. Ancey, "Rh ophysique des p tes et des suspensions",  dition EDP Sciences, 1999.
- [9] I. M. Krieger and T. J. Dougherty, "A mechanism for Non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres". *Trans. Soc. Rh ol.* (3), 1959, pp. 137-152.
- [10] M. Mooney, *J. Colloid Sci.* (6), 1951, pp. 162-170.
- [11] D. Quemada, "Rheological modelling of complex fluid I. The concept of effective volume fraction revisited", *Eur. Phys. J. AP*, (1), 1998, pp. 119-127.
- [12] R. P. Chhabra, "Motion of spheres in power law (viscoelastic) fluids at intermediate Reynolds numbers: an unified approach", *Chem. Eng. Process.*, (28), 1990, pp. 89-94.
- [13] D. C.-H. Cheng, "A design procedure for pipeline flow of Non-Newtonian dispersed systems". *Hydrotransport I*, 1-4 September, paper J5. 1970.
- [14] F. Hoareau, "Etude dynamique et thermique de suspensions solides-liquides non-newtoniennes en conduite". Thèse Université de Nancy I. 1996, p. 369.
- [15] I. Newton, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, (22), 1701, pp. 272-575.
- [16] L. Graetz, *Ann. Physik*, Vol. 18, 1883, pp.79.
- [17] M. A. Lévêque. "Les lois de la transmission de la chaleur par convection". *Ann. Mines*, (13), 1928, p. 201.
- [18] R. P. Bird, R. C. Armstrong, and O. Hassanger, "Dynamics of polymeric liquids", Vol. 1, Wiley, New York. 1977.
- [19] W. M. Kays, "Numerical solutions for laminar flow heat transfer in circular tubes". *Trans. A.S.M.E.*, (58), 1955, pp.1265.
- [20] J. R. Sellars, M. Tribus and J. S. Klein, "Heat transfer to laminar flow in a round tube or flat conduit. The Graetz problem extended", *Trans. A. S. M. E.*, (78), 1956, pp.441.
- [21] E.R.G. Eckert, and R. M. Jr, Drake, "Analysis of heat and mass transfer", Mac Graw Hill, New York. 1972.
- [22] H. Kono E., Harada, M. Toda, M. Kuriyama, and M. Asano, "Heat transfer of solid liquid mixtures in vertical downward flow". *Dept. Of Cem. Eng., Yamagata Univ., Yonezawa* 1979, p. 992.
- [23] D. I. Chandarana and A. Gavin.. "Establishing thermal processes for heterogeneous food to be processed aseptically". *J. Food Process. Sci.* (54), 1989, pp.198.
- [24] S. K. Sastry and D. Bhasar, "Velocity distributions of food particles suspensions in holding tube flow." *J. Food Sci.* (55), 1990, pp.1148-1453.
- [25] N. J. Heppell, "Measurement of the liquid-solid heat transfer coefficient during continuous stabilization of foodstuffs containing particles". *IuFoST Symposium on aseptic*

- processing and packing of foods : proceedings. 1985, pp.108-114. Sep. 9-12. Tylos and, Sweden.
- [26] N. G. Stoforos and R. L. Merson, "Measurement of heat transfer coefficients in rotating liquid/particulate systems". *Biotechnology Progress*, (7), 1991, pp. 267-271.
- [27] V. M. Balasubramaniam et S. K. Sastry, "Liquid-to-particle heat transfer in continuous tube flow: Comparison between experimental techniques", *International Journal of Food Science and Technology*, (31), 1996, pp.177-187.
- [28] F. Z. B. Fagla, "Etude thermomécanique de suspensions solide-liquide newtonienne et non newtonienne en écoulement dans une conduite horizontale", Thèse INPL, 2002, p. 252, France.
- [29] F. Z. B. Fagla, M. Gradeck, C. Baravian, M. Lebouché, "Modeling of Isothermal flow of Carboxymethylcellulose-Alginate Suspension in a Horizontal Conduit. *Journal of Applied Science and Technology (JAST)*, (18), Nos. 1& 2, 2013, pp.8 - 13.
- [30] M. Gradeck, B. F. Z. Fagla, C. Baravian, and M. Lebouché, "Experimental thermomechanic study of Newtonian and Non-Newtonian suspension flows", *International Journal of heat and mass transfer*, (48)2005, pp. 3469-3477.
- [31] T. El Rhafiki, E. Schall, Mimet and Y. Zeraoui, "Modélisation et étude numérique d'un écoulement diphasique solide-liquide subissant un changement de phase dans un échangeur de chaleur", 2009, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour et Université Abdel Malek Essaïdi, Tetouan, Maroc, (1), p.188.
- [32] M. Barigou, S. Mankad And P. J.Fryer, A review, *Chemical Engineers Trans I Chem E, Part C*, (76), 1998, p.29.
- [33] E. Guyon, J.-P. Hulin et L. Petit, "Hydrodynamique physique", nouvelle édition, revue et augmentée édition E.D.P. Sciences et CNRS Edition.2001. France.
- [34] I. Moudachirou, "Transfert thermique et perte de charge pour un fluide de Herschel -Bulkley thermodépendant". Thèse de doctorat de l'Université de Nancy I.1992, France.



ISSN (Online) : 2312-8712

Editeur en Chef : SG Cames, Prof. Bertrand Mbatchi

Directeur de Publication : Le CAMES

Rédacteur en Chef : Prof. Meissa Fall, Université de Thiès

Rédacteurs : Dr Mapathé Ndiaye – Dr. Adama Dione

Spécialiste PAO : Diarga Diouf, Irempt/Resafad UCAD/Min. Education Sénégal

Génie de l'eau et de l'Environnement – Hydraulique
Génie des Procédés – Géologie Appliquée - Hydrologie
Génie Civil – Infrastructures – Géologie de l'Ingénieur
Génie Electrique – Géologie Minière - Hydrogéologie
Génie Mécanique – Mécanique - Modélisations
Electronique – Automatismes -Génie Informatique
Etc.

Comité Internationale de lecture

1. Prof. **Yves BERTHAUD**, Directeur de l'UFR Ingénierie - Université de la Sorbonne - Pierre et Marie Curie (Paris VI) - yves.berthaud@gmail.com (*Mécanique*)
2. Prof. **Fabrice GATUINGT**, - ENS Cachan / Département/Secteur Génie Civil LMT - 61 Avenue du président Wilson 94230 CACHAN (Tél : 33 (0)1 47 40 53 69 - Fax : 33 (0)1 47 40 74 65) - fabrice.gatuingt@dgc.ens-cachan.fr (*Génie Civil*)
3. Prof. Emeritus **Tuncer B. EDIL**, University of Wisconsin-Madison - 2226 Engineering Hall / 1415 Engineering Drive - Madison, WI 53706-1691 - Tel: 608/262-3225 - edil@engr.wisc.edu (*Geotechnical Engineering*)
4. Prof. **Dante FRATTA**, Associate Professor, University of Wisconsin-Madison - 2208 Engineering Hall - 1415 Engineering Drive / Madison, WI 53706-1691 - Tel: 608/265-5644 - fratta@wisc.edu (*Civil and Environmental Engineering*)
5. Prof. **James M. TINJUM**, - University of Wisconsin-Madison - 2214 Engineering Hall - 1415 Engineering Drive / Madison, WI 53706-1691, Tel: 608/262-0785 - tinjum@epd.engr.wisc.edu (*Civil and Environmental Engineering*)
6. Prof. **Serigne FAYE**, Département de Géologie - Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal) - sfaye@ucad.sn (*Hydrogéologie*)
7. Papa Malick NGOM, Département de Géologie - Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal) - papam.ngom@ucad.edu.sn (*Géologie - Géologie de l'Ingénieur*)
8. Dr **Ayité Sénah Akoda AJAVON**, Maître de Conférences des Universités, ENSI - Université de Lomé - Lomé TOGO - asajavon@yahoo.fr (*Génie Electrique*)
9. Dr. **Farid BENBOUDJEMA**, Maître de conférences HdR - ENS Cachan / Département/Secteur Génie Civil LMT - 61 Avenue du président Wilson 94230 CACHAN (Tél : 33 (0)1 47 40 53 69 - Fax : 33 (0)1 47 40 74 65) <http://www.lmt.ens-cachan.fr/benboudjema> - farid.benboudjema@dgc.ens-cachan.fr (*Génie Civil*)
10. Prof. **Salif GAYE**, Directeur de l'IUT - Université de Thiès (Sénégal) - sgaye@univ-thies.sn (*Génie Mécanique*)
11. Prof. **Claude LISHOU**, ESP-Dakar (Université Cheikh Anta Diop de Dakar) - claudio.lishou@gmail.com (*Informatique*)
12. Prof. **Codou MAR**, ESP-Dakar (Université Cheikh Anta Diop de Dakar) - cgmare@gmail.com (*Génie Chimique et Biologie Appliquée*)
13. Prof. **Joseph BATHIEBO** - Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées (U.F.R. S.E.A.) - Tel.: +226 76 65 09 42 / jbathiebo@univ-ouaga.bf; djbathiebo@gmail.com (*Génie Civil*)
14. Dr **Félix Adangba AMARI**, Professeur de Génie Civil - Département Bâtiment & Urbanisme / Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro BP 1093 Yamoussoukro - Tel: (225) 07 87 52 99 / amarifelixad@yahoo.fr (*Génie Civil*)
15. Prof. **Francois TSOBNANG**, 2iE, Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement - ftsobnang@gmail.com (*Matériaux et Physique de l'Ingénieur*)
16. Dr **Roger Marcelin FAYE**, Maître de Conférences - Ecole Supérieure Polytechnique - B.P 5085 Dakar-Fann SENEGAL / roger.faye@ucad.edu.sn (*Génie Electrique*)

Volume 1 - N° 2 :

1. **Konaté, P. Yoboue, E. Soro, O. Asseu, P. Tety, X. Lin-Shi (2015)**. Implementations of a reduced-order Estimator for an Asynchronous Machine drive system. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), pp. 37-45. ISSN 2312-8712.
2. **Mahamane Djoudou (2015)**. Préparation et Calcul du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la région lacustre de la rive gauche du Delta intérieur du Niger au Mali : Estimation de sa Précision. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 46-56. ISSN 2312-8712.
3. **Makhaly Ba, Babacar Diop, Oumar Kamara (2015)**. Etude comparative des caractéristiques des bétons hydrauliques et des bétons bitumineux à base de granulats de basaltes de Diack et de quartzites de Bakel. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 57-64. ISSN 2312-8712.
4. **Adama Dione, Meissa Fall, Yves, Berthaud, Farid Benboudjama, Alexandre Michou (2015)**. Implementation of Resilient Modulus - CBR relationship in Mechanistic-Empirical (M. -E) Pavement Design. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 65-71. ISSN 2312-8712.
5. **Seyni Ndoye, Mamadou Issa Ba, Serigne Faye (2015)**. Hydrodynamique de la nappe côtière du Saloum (Sénégal) : étude par modèle numérique. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 72-78. ISSN 2312-8712.
6. **Seybatou Diop, Momar Samb, Fary Diome, Meissa Fall (2015)**. Etude de caractérisation des matériaux de la carrière de Sindia (Sénégal occidental) pour une utilisation en géotechnique routière. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 79-85. ISSN 2312-8712.
7. **Moustapha Diène, Cheikh Hamidou Kane, Déthié Sarr (2015)**. Overview of the aquifer system in the Senegalese and Mauritanian sedimentary basin. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 86-91. ISSN 2312-8712.
8. **Mapathé Ndiaye, Mohamadou Moustapha Thiam, Seydou Coulibaly, Oustasse Abdoulaye Sall (2015)**. Astronomical Calibration of the Danian Formation of Ndayane : Paleogeographic and Paleoclimatic Implications. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 92-96. ISSN 2312-8712.
9. **Ouoba S., Cherblanc F., Bénét J.-C., Koulidiati J. (2015)**. Modélisation numérique des mécanismes d’atténuation naturelle des polluants organiques volatiles dans les sols du Burkina Faso : application au trichloréthylène (TCE). *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 97-103. ISSN 2312-8712.
10. **S. Gueye, I. Gueye, L. Thiaw, G. Sow, A. Ndiaye, M. Thiam (2015)**. Conception d’un régulateur solaire avec commande MPPT. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 104-108. ISSN 2312-8712.
11. **Fagla B. F. Z., Gradeck M., Baravian C., Vianou A., Dègan G., Lebouché M. (2015)**. Etude Thermique Expérimentale des Suspensions Newtoniennes en Solutions du Glucose et de l’Eau en Ecoulement dans une Conduite Horizontale à Section Constante. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 109-121. ISSN 2312-8712.
12. **Fagla B. F. Z., Gradeck M., baravian C., vianou A., lebouche M. (2015)**. Etude Thermique Expérimentale des Suspensions Non-Newtoniennes en Solution de Carboxyméthylcellulose en Ecoulement dans une Conduite Horizontale à Section Constante. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 122-133. ISSN 2312-8712.