



20 Brilliant Inventions
20 Seriously Brilliant Inventions
Which Will Change Your Life



Home Paper Archives Journal Indexing Research Conference Research Position

Main Menu

My Profile
My Journal
Add Journal

Searching By

Search More ...

News Notice

Your email

Subscribe

Feedburner

Ads

Ads by Google

► Open Journ

► Sci Journal

Journal de la recherche scientifique de l'Université de Lomé (ISSN: 1727-8651)

Publisher: Direction de la Recherche de l'Université de Lomé

ISSN-L: 1727-8651

ISSN: 1727-8651

E-ISSN: 2413-354X

IF(Impact Factor) : 2016 Evaluation Pending

Website: <http://www.ajol.info/index.php/jrsul/index>

Regarder TV en Ligne
Transformez Votre PC en Télévision.
Regardez avec TelevisionFanatic™!

1. Recherche et documentation - Comité de direction scientifique, Centre de documentation en sciences humaines, Université du Québec à Montréal
2. "Bulletin signalétique - Centre national de la recherche scientifique. 110, Informatique, automatique, recherche opérationnelle, gestion"
3. "Bulletin signalétique - Centre national de la recherche scientifique. 110, Analyse numérique, informatique, automatique, statistique et probabilités, recherche opérationnelle, gestion, économie"
4. VIE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
5. Université, recherche et développement

Description

Le Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé (Togo) est un journal international et pluridisciplinaire qui publie des travaux de recherche rédigés en français ou en anglais dans les domaines des Lettres et Sciences Humaines, des Sciences Fondamentales et Appliquées, des Sciences Juridiques, Économiques et de gestion. Le journal paraît quatre fois par an (quatre volumes par an). Le journal reçoit des articles originaux, des revues de la littérature, des petites communications, des commentaires et critiques d'articles et des études de cas

Last modified: 2015-10-13 07:56:54

Volumes

Vol.16 No.1

0 Comments

Sort by Oldest



Add a comment...

Facebook Comments Plugin

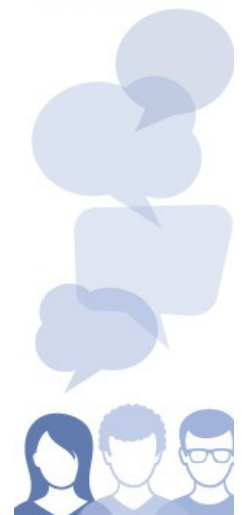
Advertisement

facebook

Créer un profil Facebook

Ses amis, sa famille et
Copains de classe.
Créez un profil!

Inscrivez-Vous



About

ResearchBib
Contact us
Advertise
Careers

Resources

Research Conference
Research Position
Journal Indexing
Paper Archives

Legal

Terms of Service
Privacy Policy
Ad Choices
Cookies



Home
Journals List
Statistics
Our Journals

TOP 50 Most Downloaded Articles

For Publishers
Apply for Evaluation / Free Service
Journal Search
OAJI Logo

Advertising options on OAJI

Contact Us

Recently Added Articles

[International Journal Of Engineering Research and General Science](#)

[ÁGORA: Revista do Arquivo Público do Estado de Santa Catarina & Curso de Arquivologia da Universidad](#)

[Journal of community health research](#)

[Albanian Medical Journal](#)

Register Journal

Our partners



Visitors Counter

Today	892
Yesterday	1101
This week	3065
Last week	7934
This month	25903
Last month	34024
All days	496400

Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé

Published by [Direction de la Recherche de l'Université de Lomé](#)

Year publication 1995

Frequency 4

Article Publishing Frequency 0

Impact Factor OAJI 2012 —

Abbreviation J. Rech. Sci. Univ. Lomé

Country Togo

ISSN (print) 1727-8651

ISSN (online) 2413-354X

Journal Website <http://www.ajol.info/index.php/jrsul/issue/archive>

Editor in Chief Ampah Kodjo Christophe JOHNSON

ISI — **All articles** [1](#) **Date added to OAJI** 21 Nov 2015

Scopus — **All issues** [17](#) **Free access** 1995-2015

DOAJ — **Full text language** French/english

Journal discipline

Multidisciplinary Sciences

Journals

[353](#)

Journal description

Le Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé (Togo) est un journal international et pluridisciplinaire qui publie des travaux de recherche rédigés en français ou en anglais. Le journal paraît quatre fois par an (quatre numéros par an). Il reçoit des articles originaux, des revues de la littérature, des petites communications, des commentaires et critiques d'articles et des études de cas.

Journal is indexed by

AJOL, Google scholar, ResearchBib





ISSN 1727 - 8651

JOURNAL
de la
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
de
l'UNIVERSITÉ DE LOMÉ



LOME - TOGO

Série "Sciences et Techniques" (série E)

Volume
TOME 7
(2005)

No
Volume 2

EDITEUR :

Direction de la Recherche, Université de Lomé ; B.P. 1515, Lomé (Togo) ;
Tél. / Fax : (228) 25 40 76 ; Fax : (228) 21. 85. 95
E-mail : dr_univ_lom@yahoo.fr

COMITE DE REDACTION :

Rédacteur en Chef :	Prof. Koffi AKPAGANA
Membres :	Baté KOLANI
	Yaovi AKAKPO
	Kouglo LAWSON-BODY
Traitement et Mise en page :	Komi AGBAVON

COMITE DE LECTURE :

ABALO Kokou (Etats-Unis),
ASSIAMOUA Kofi (Lomé, Togo),
ASSIH Toyi (Lomé, Togo),
AWANOU Norbert (Bénin),
BEDJA Koffi-Sâ (Lomé, Togo),
BOITEUX Michel (Paris, France),
GNANVO Cyprien (Cotonou, Bénin),
DUNN Flyod (Urbana, USA),
HEGRON Gérard (Nantes, France),
MOUDACHIROU Mansour (Cotonou, Bénin),
JOHNSON T. R. Ansah A. (Espagne),
KASSE Moustapha (Dakar, Sénégal),
KASSEGNE Komlan (Lomé, Togo),
NAPO Kossi (Lomé, Togo),
PORTIER Richard (Paris, France),
SIB-SIE Faustin (Burkina Faso),
TCHAKPELE Komi (Lomé, Togo).

ABREVIATION DE L'APPELLATION DE LA REVUE :

Le Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé doit être abrégée sous la forme : J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo), série E.

ETUDE DE L'HETEROGENEITE DES SUSPENSIONS NEWTONIENNES DE «GROSSES SPHERES DURES» EN ECOULEMENTS ISOTHERME ET ANISOTHERME AU MOYEN DES PROFILS DE VITESSES DANS UNE CONDUITE HORIZONTALE

FAGLA B. F. Z.¹, GRADECK M.², BARAVIAN C.², LEBOUCHE M.²

1. Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées (LEMA), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi 01 B.P. 2009 Cotonou (Bénin)
2. Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA) INPL/ UHP 2, avenue de la forêt de Hayes - BP 160, 54504 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex (France)

(Reçu le 10 Juin 2010 ; Révisé le 06 Février 2011 ; Accepté le 24 Février 2011)

RESUME

Dans le présent papier nous exposons les résultats d'une étude expérimentale des suspensions newtoniennes de « grosses sphères dures » (diamètre moyen = 4,4 mm) à l'aide des profils de vitesses. Cette étude est menée en vue de répondre aux préoccupations des industriels du secteur agro-alimentaire qui mettent sur le marché de produits nouveaux tels que les fluides chargés en sphères dures (suspensions). Ces suspensions solide-liquide, au cours de leur transport, se comportent comme un mélange non homogène. Cet aspect est mis en évidence sur le présent papier au moyen des profils de vitesses. Cette étude permet d'analyser le caractère hétérogène des suspensions en écoulements isotherme et anisotherme dans une conduite horizontale. Le phénomène de migration latérale des sphères dures vers l'axe de la conduite génère un fort gradient de concentrations en particules. La modification de la rhéologie donc de l'hydrodynamique du mélange explique la variation de la viscosité des suspensions. Ces modifications posent le problème de sédimentation des sphères dures lors de l'écoulement des suspensions. On observe une organisation générale « en anneau monophasique » des suspensions, au cœur de l'écoulement, siège d'une forte concentration en sphères dures avec absence de fluctuations. L'analyse du champ dynamique montre que la transition entre le régime laminaire et turbulent est d'une précocité proportionnelle à la concentration en sphères dures.

Mots clés : Sphères, Solide-liquide, Profil, Vitesse et Sédimentation.

ABSTRACT

Study of the heterogeneity of Newtonian suspensions of «large sized hard spheres» in isothermal and non isothermal flow using the velocity profiles in a horizontal pipeline.

In this paper we present the results of an experimental study of Newtonian suspensions of "large hard spheres" (mean diameter = 4.4 mm) using the velocity profiles. This study was conducted to answer the concerns of industrial food sector which place on the market of new products such as fluid-loaded hard spheres (suspensions). These solid-liquid suspensions, during transport, behave as a non-homogeneous mixture. This is demonstrated on this paper, using the velocity profiles. This study analyzes the heterogeneity of suspensions in isothermal and non isothermal flow in a horizontal pipe. The phenomenon of lateral migration of hard spheres to the axis of the pipe generates a high gradient of particle concentrations. The rheology-modifying therefore the hydrodynamics of mixing explains the change in the viscosity of suspensions. These changes raise the problem of sedimentation of hard spheres in the flow of suspensions. There is a general organization "ring monophasic" suspensions, in the heart of the flow, seat of a high concentration of hard spheres with no fluctuations. The analysis of the dynamic field shows that the transition between laminar and turbulent regime is precocity proportional to the concentration of hard spheres.

Keys words: Spheres, Solid-liquid, Profile, Velocity and Sedimentation.

NOMENCLATURE

Notation Latine

V : voulume ; V_p : volume de la phase solide ; V_f : volume de la phase fluide

U_d : vitesse débitante (dans $\frac{u}{U_d} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2$);

u_p : vitesse à la paroi ; u_e : vitesse à l'entrée avec $\frac{u_p}{u_e}$

v, u, u^* : vitesse ; $u(y, z)$: vitesse ; d : diamètre moyen de la sphère dure ; D : diamètre du tube avec $\frac{d}{D}$
ratio ; T : température en K ; L : longueur totale de la veine de mesures ;
 R, r : rayon ; x, y, z : distance axiale (ou encore x abscisse suivant l'axe du tube)

ΔP : chute de pression (dans $\frac{\Delta P}{L} = \eta \cdot 8 \cdot \frac{U_d}{R^2}$) ; p : pression ;

τ_p : contrainte pariétale (avec $\tau_p = \frac{\Delta \hat{p} \cdot D}{4 \cdot L}$) (Pa) ; τ : contrainte de cisaillement (Pa)

$Tu(r)$: taux de fluctuation de la vitesse avec $Tu(r) = \frac{\sqrt{u'^2}}{u^*}(r)$

Notation grecque

ρ : masse volumique ; ρ_f : masse volumique de la phase fluide ;

ρ_p : masse volumique de la phase solide ; $\dot{\gamma}$: taux de cisaillement ;

η_0 : viscosité du fluide suspandant ; η_{eff} viscosité effective

$\eta(T)$: viscosité en fonction de la température ;

Nombres adimensionnels

ϕ : fraction volumique ; Fr : nombre de Froude $Fr = \frac{\rho \frac{u^2}{D}}{\rho g} = \frac{u^2}{Dg}$

V : voulume ; V_p : volume de la phase solide ; V_f : volume de la phase fluide

$u(y, z)$: u, u^* : vitesse

d : diamètre moyen de la sphère dure ; D : diamètre du tube avec $\frac{d}{D}$

T : température en K ; L : longueur ; ΔP : chute de pression avec $\frac{\Delta P}{L} = \eta \cdot 8 \cdot \frac{U_d}{R^2}$

p : pression ; τ_p : contrainte pariétale (avec $\tau_p = \frac{\Delta \hat{p} \cdot D}{4 \cdot L}$) (Pa) ;

τ : contrainte de cisaillement (Pa) ;

R, r : rayon ; $Tu(r)$: taux de fluctuation de la vitesse avec $Tu(r) = \frac{\sqrt{u'^2}}{u^*}(r)$

x, y, z : distance axiale (ou encore x abscisse suivant l'axe du tube)

INTRODUCTION

Dans l'industrie agro-alimentaire, des produits nouveaux de plus en plus complexes sont mis à la disposition des consommateurs. Parmi ces plats cuisinés, on en rencontre des fluides chargés en particules de différentes formes. Au cours de la phase de transport, le fluide chargé se comporte comme un mélange non homogène. Les suspensions solide-liquide en écoulement se comportent différemment dans les liquides monophasiques suivant leur nature rhéologique. Les régimes d'écoulement sont étroitement liés à plusieurs paramètres dont la fraction volumique en particules solides (ϕ), les propriétés rhéologiques du fluide porteur, le rapport des dimensions caractéristiques $\frac{d}{D}$ (diamètre du tube D et diamètre moyen des particules d), les masses volumiques respectives du fluide porteur et des particules solides en suspension. Des formules semi-empiriques ont été proposées par Chong et al. (1971). Elles ont été établies par calage des résultats obtenus avec un grand nombre de suspensions monodisperses et polydisperses.

Les auteurs tels que Durand (1953) et Kyokai (1981) ont observé les différents types d'écoulements pour des vitesses débitantes décroissantes donc pour divers régimes ; c'est le cas des écoulements symétrique, asymétrique, en lit circulant et en lit stationnaire. Pour des vitesses élevées, la répartition des particules est homogène, c'est l'*écoulement symétrique*. Il n'est pas nécessaire d'atteindre le régime turbulent pour obtenir ce type d'écoulement ; il dépend surtout de la vitesse limite de chute. Si la vitesse décroît, les forces hydrodynamiques ne maintiennent plus la phase solide en suspension ; le profil de concentrations n'est plus symétrique et les particules circulent préférentiellement dans la partie inférieure de la conduite, c'est l'*écoulement asymétrique*. A une vitesse inférieure à celle qui maintient la phase solide en suspension, un lit se forme sur le fond de la conduite. Ce lit s'écoule à une vitesse inférieure à celle du liquide, c'est l'*écoulement en lit circulant*. Quand le débit du mélange décroît encore, les particules sédimentent et restent immobiles ; la section de passage diminuant, la vitesse du liquide se maintient mais si le débit diminue encore, on risque de bloquer totalement l'écoulement : c'est l'*écoulement en lit stationnaire*.

Les auteurs tels que Ayukawa (1970) et Kyokai (1981) ont, eux aussi, travaillé sur des suspensions de

grosses particules enfin d'en étudier la particularité de leurs dimensions caractéristiques sur l'hydrodynamique et sur la thermique de la suspension. Ce sont des facteurs qui influent sur les mesures du profil de vitesses, de la distribution de concentration et du caractère de la turbulence dans la conduite selon les travaux de Ayukawa (1969) et de Silin et al (1969).

Ayukawa (1970) a fait une analyse phénoménologique du profil de vitesses en considérant les interactions entre les particules et le fluide. L'auteur a fait des recherches expérimentales sur le profil de vitesses, sur la distribution de la concentration des particules et sur la perte de charge d'un écoulement diphasique dans une conduite horizontale droite transparente faite de plaque de vinyle de section carrée de 40 mm de côté. Les différentes mesures, sur cet écoulement, ont été effectuées dans la zone de profil de vitesses stationnaire et pleinement développé. D'autres auteurs tels que Round et al (1970) ont travaillé sur des particules de plastique d'acrylique en mesurant les pertes de charge dans le cas de l'écoulement des suspensions dans lesquelles les particules se sont organisées sous formes de trains de sphères de longueur finie. Ces données obtenues sur les pertes de charge sont associées à l'écoulement stationnaire de l'eau dans une conduite remplie de trains de sphères excentrées et sont présentées sous forme de ratios de gradient de pression dans l'écoulement des sphères au gradient de pression dans l'écoulement monophasique

et aussi de celui des diamètres $\frac{d}{D}$. Quant aux auteurs

Mills et Snabre (1995), ils ont donné l'expression de la viscosité apparente de cisaillement des suspensions de sphères dures en considérant un volume élémentaire contenant un fluide (de densité ρ_f) et de sphères dures (de densité ρ_p) dans des interactions purement hydrodynamiques, et en partant de l'expression du champ de vitesses moyennées du volume V avec $V = \phi V_p + (1-\phi) V_f$ où V_p et V_f , sont respectivement la vitesse moyennée du volume des particules et du fluide porteur et ϕ , la fraction volumique en sphères dures. Kyokai (1981) a aussi orienté ses recherches sur des suspensions de grosses

particules en montrant que le ratio $\left(\frac{u_p}{u_e}\right)$ des vitesses

moyennes dépend principalement du nombre de

Froude Fr tel que $Fr = \frac{\rho \frac{u^2}{D}}{\rho g} = \frac{u^2}{Dg}$. Ce nombre

représente le rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur. L'effet de la sédimentation dépend en grande partie de la vitesse d'écoulement de la particule. La trajectoire d'une particule isolée peut être prédite en intégrant le bilan des forces qui agit sur elle. Au fur et à mesure que la fraction volumique de particules solides augmente, les interactions particule-particule deviennent prééminentes sur l'écoulement. Ces interactions qui ne sont pas nécessairement des chocs entre particules, ont généralement pour effet de diminuer la valeur de la vitesse limite de chute. Ce qui montre l'influence de la concentration en particules sur la vitesse limite de chute. Cette influence sur la vitesse limite de chute a été étudiée par plusieurs auteurs autant en régime laminaire que turbulent.

En régime laminaire, Famularo et Happe (1965) donnent une expression de la vitesse limite de chute en fonction de la concentration volumique de sphère et ont montré qu'en régime turbulent, les collisions entre sphères agissent comme facteurs d'accélération ou de décélération. Le nombre et l'effet des collisions augmentent avec la concentration. Lorsque les collisions prédominent sur les interactions fluide-particules, les sphères sédimentent en masse. Il n'existe pas de corrélation décrivant un profil de vitesses, mais des méthodes valables pour un mélange donné. Elles ont été proposées pour des suspensions eau-solide par Newwitt et al (1955) qui ont étudié des mélanges d'eau et de sable ou de gravier en régime de suspension asymétrique et en régime turbulent pour un écoulement horizontal. De plus, ces auteurs ont recherché des corrélations empiriques pour décrire des profils de concentrations de gros grain de sable, de gravier, et de sable fin dans l'eau. Pennell et al (1972) ont étudié des écoulements newtoniens en régime de turbulence faible. Ils ont montré que pour des valeurs de nombres de Reynolds inférieures à 10.000, les profils de vitesses s'écartent de ceux donnés par Von Karman (1931); ce qui permet de mettre en évidence la migration latérale des sphères vers l'axe de conduite, conséquence de la modification de la rhéologie et de la dynamique du mélange en écoulement. Ils ont aussi appuyé leurs remarques en traçant l'intensité de turbulence $Tu(r)$ tel que

$$Tu(r) = \frac{\sqrt{u'^2}}{u_*} (r) \text{ pour différents nombres de}$$

Reynolds. Lorsque ce nombre augmente, le taux de fluctuations au centre de l'écoulement diminue. Ceci

est en accord avec les résultats de Laufer (1954). Mais lorsque l'on s'éloigne de l'axe, les valeurs de $Tu(r)$ sont beaucoup plus dispersées avec le nombre de Reynolds. Ces différents taux de fluctuations et la migration des particules vers l'axe de la conduite sont à la base du caractère hétérogène des suspensions en écoulement ; ce qui fait l'objet de la présente étude.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1 Matériel - Disposition expérimentale et techniques de mesures

Le montage expérimental schématisé sur la figure 1 est essentiellement constitué d'une boucle d'essais et d'une veine d'expériences. Le montage est composé d'un groupe motopompe [2], d'un échangeur tubulaire en graphite [3], d'un bac en amont [4], d'un tube de PVC (chlorure de polyvinyl) placé en aval du bac en amont, d'un tube de PMMA (polyméthacrylate de méthyle) transparent, d'une veine de mesure [5], d'une conduite de dérivation, d'un débitmètre électromagnétique [7] et d'un bac aval [1]. La présence d'une phase de particules solides sensible aux contraintes mécaniques a déterminé le choix du groupe motopompe. Celui que nous avons 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 (P.M.M.A.) d'une longueur de 39,87 diamètres (soit 1,212 m), disposé 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'expériences qui est aussi en P.M.M.A. Une conduite de dérivation placée en parallèle à la veine d'expériences relie la sortie du bac amont au bac aval ; elle permet d'adapter le débit du mélange aux conditions de manipulations désirées sans entraîner la formation d'un bouchon dans la conduite. En sortie de la zone de mesures, un débitmètre électromagnétique, 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'expériences et de la conduite de dérivation, a pour but de tranquilliser l'écoulement en amortissant les pulsations issues du groupe motopompe, 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. Les sphères dures en suspensions sont faites de sphères d'alginate (de diamètre moyen de l'ordre de 4,4 mm). L'étude est menée à plusieurs concentrations (1%, 3%, 5%, 10%, et 15%) en sphères dures en suspensions monodisperses dans la solution de sirop de glucose. Le sirop de glucose, phase fluide de la suspension (de masse volumique $\rho = 1141,3 \text{ kg/m}^3$) à la température de 20°C, est dilué à 80 %. Cette solution a un comportement newtonien avec une viscosité allant jusqu'à 0,069 Pa.s. Le fluide a un comportement newtonien très visqueux, thermodépendant avec une conductivité thermique (λ) égale à 0,404 W/ m °C.

1. 2 METHODES

1.2.1 Qualification de l'installation par :

- L'étude des profils de vitesses

Pour qualifier l'installation, nous étudions le profil de

vitesses et celui du taux de fluctuations de vitesses dans un écoulement laminaire du glucose monophasique. Il y a lieu de vérifier si les données expérimentales sont en adéquation avec la théorie de la loi de Poiseuille (le profil de vitesses doit avoir alors une forme parabolique). Pour y arriver, nous utilisons les techniques de la vélocimétrie à effet Doppler et l'U.V.P. (Ultrasonic Velocity Profil) pour tracer les profils de vitesses et le profil du de taux de fluctuations des vitesses (Figure 2). En effet nous avons effectué une étude du profil de vitesses du glucose en écoulement monophasique (fluide newtonien de masse volumique $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ et de viscosité dynamique $\eta_0 = 0,36 \text{ Pa.s}$) en écoulement laminaire isotherme à $Re = 58$. La courbe expérimentale (Figure 2) obtenue est en parfaite corrélation avec la courbe théorique de répartition de

vitesse u telle que $u = U_d \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right)$. La forme demi

parabolique de la courbe nous permet de dire que l'écoulement laminaire est établi. Ces différents résultats nous autorisent à dire que nos installations et les instruments de mesures que nous utilisons sont fiables.

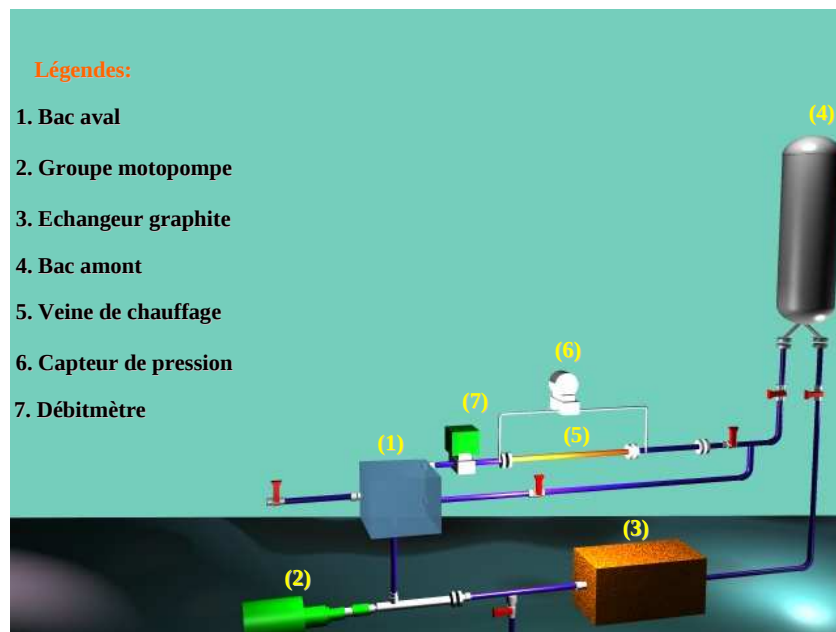


Figure 1: Schéma de la boucle d'essais.

• L'étude du Profil du taux de fluctuations de vitesses

Les taux de fluctuations sont faibles sur l'axe ($\approx 2\%$) au cœur de l'écoulement (existence de fluctuation résiduelle) puis augmentent lorsqu'on se rapproche de la paroi pour atteindre 45% (Figure 2). Le volume de mesure étant tronqué à la paroi, nous n'avons pas pu mesurer de façon fiable les taux de fluctuations de vitesses pour un rayon adimensionnel $r/R > 0,03$. Ces

résultats sont conformes à un régime laminaire (Figure 2).

Ces résultats obtenus sont conformes à ceux obtenus par Gradeck et al. (2005). et qui mettent en évidence les différents régimes observés lors de l'écoulement et plus particulièrement le régime laminaire qui est obtenu expérimentalement sous forme parabolique et confirmé théoriquement par la loi de Poiseuille du régime laminaire (Figure 2).

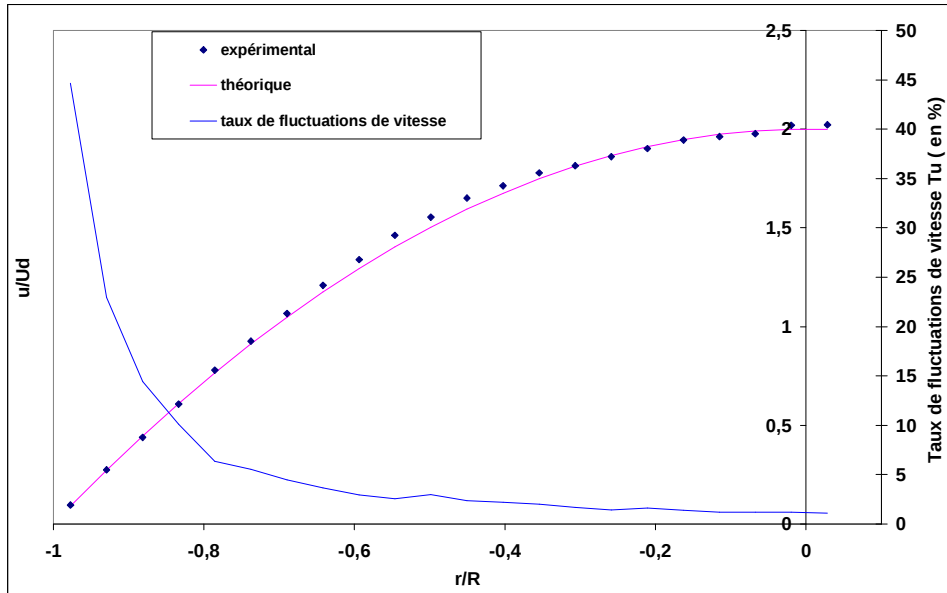


Figure 2 : Evolution du profil de vitesses du sirop de glucose (en écoulement laminaire) avec un débit de $0,26 \text{ m}^3/\text{h}$ et du taux de fluctuations.

2.1 Profils de concentration

Les profils de concentrations sont calculés pour chaque cas en utilisant l'équation de Navier – Stokes en régime dynamique établi soit :

$$\Rightarrow -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial z} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0.$$

En négligeant le terme $\frac{\partial \eta}{\partial z} \cdot \frac{\partial u}{\partial z}$, nous avons

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$

Le profil de vitesses étant symétrique dans le plan horizontal, nous faisons l'hypothèse que la viscosité effective est constante (η_{eff}) dans chaque plan horizontal. La viscosité effective (η_{eff}) est, d'après Krieger et Dougherty (1959) et Krieger (1972), de la

$$\begin{aligned} & \begin{array}{c} \uparrow z \\ \leftarrow y \end{array} \\ & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta(y, z) \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta(y, z) \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \\ & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \Leftrightarrow \text{à } y = 0 \end{aligned}$$

forme $\eta_{eff} = \eta_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_p}\right)^{-2}$ où η_0 , ϕ et ϕ_p sont

respectivement la viscosité du fluide suspendant, la fraction volumique en sphères dures et la fraction volumique d'empilement maximal de sphères dures (proche de 0,637, dans le cas de sphères dures) (Quemada, 1982, 1995, 1998) et (Quemada et al, 1997).

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1 Etude des profils de vitesses dans les suspensions (fluide porteur/ sirop de glucose)

• Influence des particules sur les profils de vitesses

Pour examiner l'influence des particules sur l'écoulement du mélange, nous avons utilisé la mesure des profils de vitesses par méthode ultrasonore [Ultrasonic Velocity Profil (U.V.P.)]. Plusieurs mesures sont effectuées dans des positions différentes (plan vertical, plan incliné à 45° et plan horizontal) afin d'apprécier la répartition des particules solides dans les suspensions en écoulement. L'allure

parabolique des profils de vitesse obtenus confirme le régime laminaire de l'écoulement. Ces vérifications sont faites avec un débit constant de $8,9.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (soit à la vitesse $U_d=1,2 \text{ m/s}$) à des fractions volumiques de 1% et de 10% de sphères dures. Le profil de vitesse dans le plan vertical est dissymétrique et présente une survitesse dans la partie supérieure où les particules sont en concentration moins élevée (ceci est dû à la sédimentation), alors que celui mesuré dans le plan horizontal est symétrique (Figure 3). Sur la base de cette répartition non homogène des particules dans l'écoulement, nous faisons l'hypothèse qu'elle serait, peut être, à l'origine de la variation spatiale de la viscosité apparente dans les suspensions, qui induit la dissymétrie du profil de vitesse. Selon le plan de mesure adopté, nous remarquons une variation continue de la survitesse constatée plus haut (Figure 3). D'où il nous est cohérent de dire que la répartition de grosses sphères dures en suspensions, dans une solution de sirop de glucose en écoulement, n'est pas régulière. Ces suspensions sont non homogènes d'où le caractère hétérogène des suspensions étudiées.

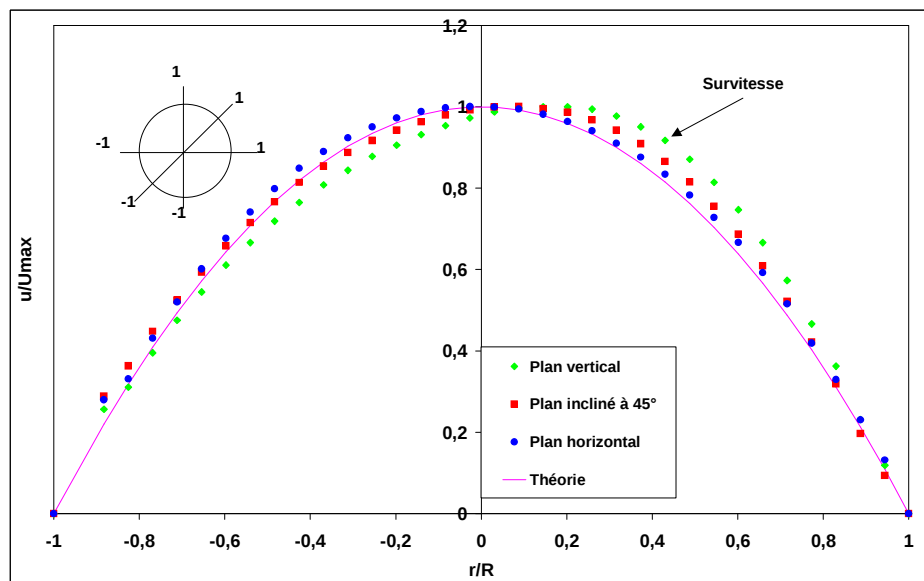


Figure 3 : Exemples de profils de vitesse normalisés obtenus pour une suspension isotherme à fraction volumique en particules de 1% dans une solution de sirop de glucose (U.V.P.)

2.2 Comparaison du profil de vitesses normalisé dans les suspensions en fonction de différentes fractions volumiques

Prenons comme référence le cas des profils de vitesses

de la suspension de fraction volumique à 5% de la figure (4). Dans le plan horizontal nous remarquons, non loin de l'axe de conduite, un gradient de vitesse très sensible (à 5%) par rapport aux autres courbes.

Dans le plan vertical nous constatons que c'est la courbe (à 1%) qui connaît un décalage (gradient de vitesse très sensible) par rapport aux autres courbes (Figure 5). C'est le même constat qui est fait au sujet de la répartition dans une suspension à 1%. En observant les figures 4 et 5, nous constatons que les particules ne sont pas réparties de manière régulière

dans l'écoulement ; ceci nous amène à dire que la répartition des particules dans la conduite n'est pas faite de manière homogène et ce indépendamment de la valeur de la fraction volumique. Cette situation pourrait être à la base de la variation de la viscosité apparente du mélange au cours de l'écoulement.

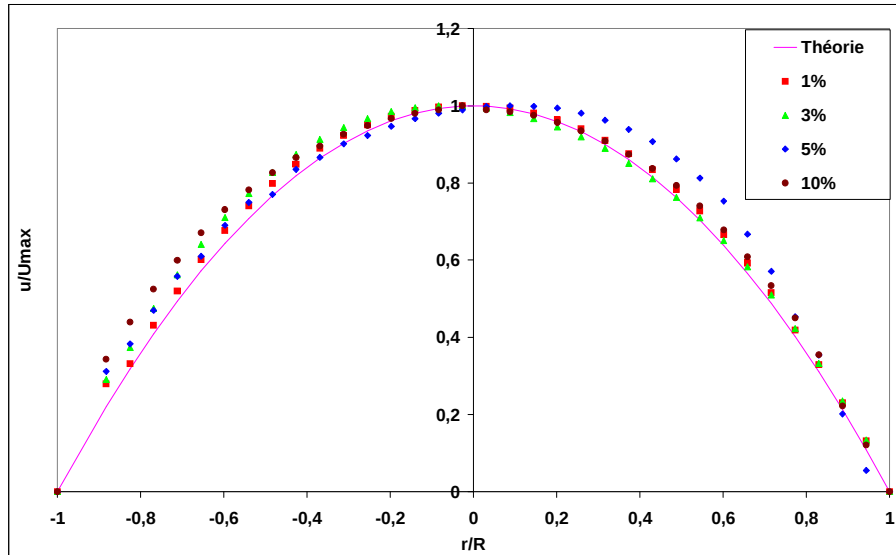


Figure 4: Etude comparative des profils de vitesses normalisés des suspensions isothermes à différentes fractions volumiques en particules solides de $\phi=1\%$ à 10% et mesurés dans le plan horizontal (U.V.P.)

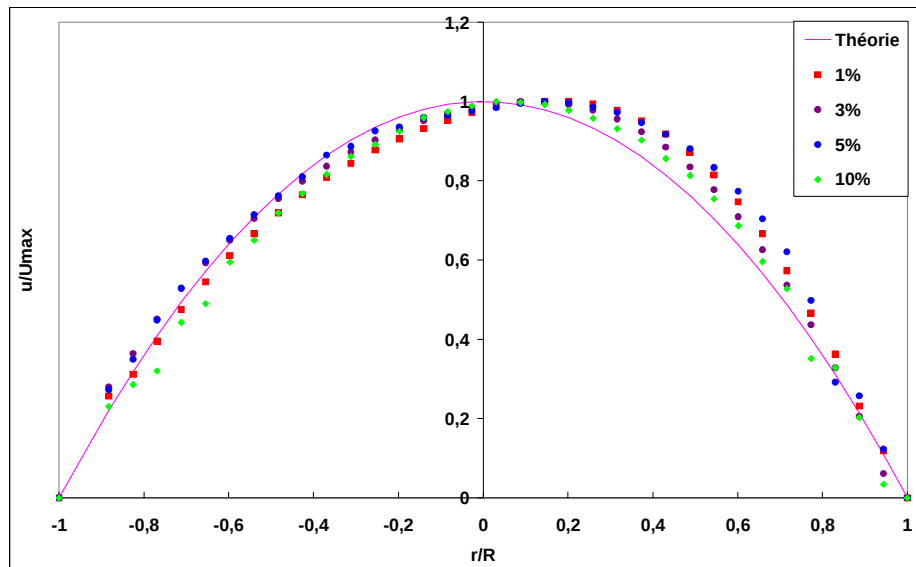


Figure 5 : Etude comparative des profils de vitesses normalisés des suspensions isothermes à différentes fractions volumiques en particules solides de $\phi=1\%$ à 10% et mesurés dans le plan vertical (U.V.P.)

2.3 Analyse de l'évolution de la viscosité dans les suspensions en écoulement

L'équation de Navier - Stokes en régime dynamique

établi devient $-\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$ et que nous résolvons

en fonction de $u(y,z)$ approchée par une fonction polynomiale (Cf. Fig. 6 et 7). Au niveau de la paroi inférieure, la viscosité varie en fonction de la fraction volumique; elle est très faible à 10% et élevée à 1%. Elle augmente avec la fraction volumique.

La viscosité semble indépendante de la fraction volumique aux environs du centre de la conduite et devient maximale, dans la partie supérieure juste un peu au-dessus du centre de la conduite.

- **Variation de la concentration en particules et son influence sur la viscosité dans les suspensions (suspensions non homogènes)**

L'évolution de la viscosité est étroitement liée à la variation de la concentration locale des particules dans l'écoulement et pour mieux apprécier cette évolution (donc cette concentration qui varie au cours de l'écoulement isotherme de la suspension), nous avons mené l'étude pour différentes fractions volumiques de particules solides (Figures 6 et 7) en analysant la variation de la viscosité dans les suspensions à différentes fractions volumiques ($\phi=1\%$ et $\phi=10\%$). En observant les résultats obtenus (Figures 6 et 7) pour chacune des fractions volumiques, nous constatons qu'à $\phi=1\%$, il y a une survitesse dans le plan vertical de mesure avec une viscosité maximum légèrement au dessus de l'axe central de la conduite. Ce qui nous permet de dire qu'il y a concentration de particule à ce niveau de la conduite pendant qu'elle l'est moindre aux environs de la paroi.

A la concentration de $\phi=10\%$, la répartition de la concentration est plus symétrique par rapport à l'axe. D'autre part les profils de vitesse sont proches dans les différents plans; ce sont les chocs interparticulaires qui limitent les effets de la stratification mais le regroupement des particules au voisinage de l'axe demeure. Ces chocs interparticules homogénéisent le milieu. Ces résultats rappellent ceux obtenus par Mills et Snabre (1995) et de Fan et al (2002).

Pour les fractions volumiques de 1%, 3%, 5% la répartition des particules n'est pas régulière dans la

conduite. Au fur et à mesure que la fraction volumique augmente, la variation de la concentration des particules est mieux répartie dans le milieu pour la fraction volumique; C'est le cas de $\phi=10\%$. Quelle que soit la fraction volumique, les particules solides ont tendance à émigrer vers les environs de l'axe de la conduite. Nous avons observé la variation de la viscosité de la suspension aux environs de l'axe et plus précisément en sa partie immédiatement supérieure, en constatant une forte viscosité qui a tendance à diminuer au fur et à mesure que nous approchons de la paroi dans la plupart des cas étudiés. Ceci nous a permis de dire que les particules émigrent de la paroi vers le centre de la conduite lors de l'écoulement du mélange. L'examen des profils de vitesse obtenus par vélocimétrie ultrasonore montre clairement un effet de *sédimentation des particules* (Figure 3). Le profil de vitesse dans le plan vertical est dissymétrique et présente une survitesse dans la partie supérieure où les particules sont en *concentration plus faible*, alors que le profil obtenu dans le plan horizontal est symétrique. Ces figures semblent montrer de façon nette le *caractère hétérogène* de nos suspensions en écoulement isotherme. Mais ce caractère hétérogène n'est pas pris en compte dans l'approche globale effective validée par les résultats obtenus et décrits sur la figure 4. Dans l'approche globale et en première approximation, nous n'avons pas pris en compte l'effet de la sédimentation.

2.4 Etude de profil de vitesses dans les suspensions en écoulement isotherme en régime turbulent (fluide porteur étant l'eau)

Nous avons étudié les suspensions monodisperses (0%, 1%, 3%) avec pour fluide porteur l'eau à la vitesse débitante $U_d = 2,22$ m/s avec un nombre de Reynolds $Re = 66491$ (régime turbulent). Les résultats, ont montré qu'au fur et à mesure que la fraction volumique de particules croît, il y a une *survitesse aux environs de la paroi. Cette valeur de la viscosité apparente, elle-même, est liée à une faible concentration. Cette concentration est plus élevée au centre de la conduite (courbe légèrement aplatie) au centre*; ce que nous avons observé avec la solution de glucose comme fluide porteur en régime laminaire (Figure 8). L'eau pure et les suspensions à 1% et à 3%, en écoulement isotherme, ont leur profil de vitesse s'aplatir sur l'axe de la conduite. A l'origine de cette observation il y a le *phénomène de la diffusivité turbulente*.

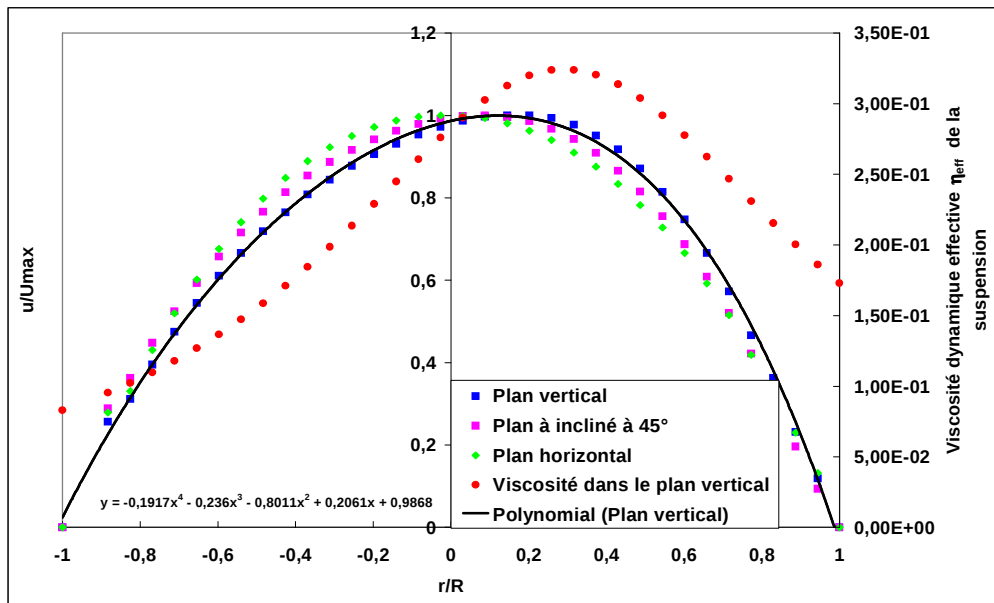


Figure 6: Profils de vitesses normalisés et de viscosité de la suspension isotherme à la fraction volumique en particules de $\phi = 1\%$ (U.V.P.)

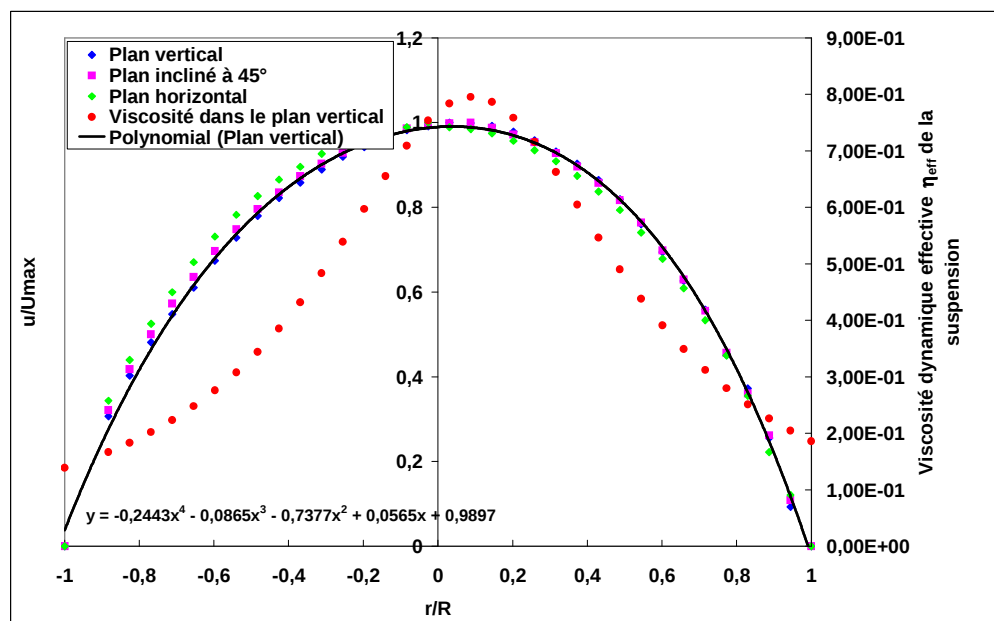


Figure 7 : Profils de vitesses normalisés et de viscosité de la suspension isotherme à la fraction volumique en particules de $\phi = 10\%$ (U.V.P.)

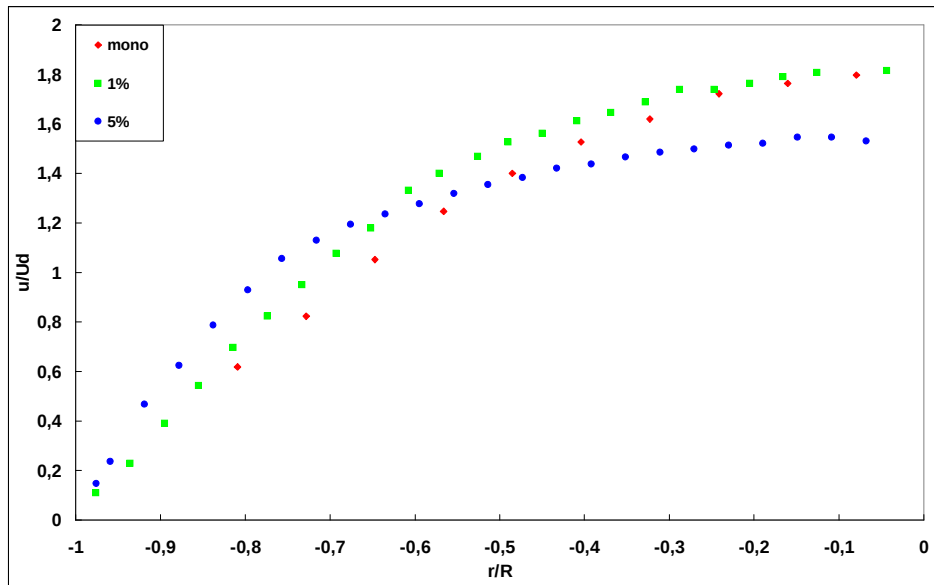


Figure 8 : Evolution des profils de vitesses des suspensions en écoulement isotherme à différentes fractions volumiques y compris le monophasique avec pour fluide porteur l'eau.

2.5 Etude du chauffage sur le profil de vitesse et le taux de fluctuations des vitesses du glucose monophasique

Nous étudions l'influence de la chaleur sur profil de vitesse dans un écoulement du glucose monophasique. **Pour le cas du profil de vitesses en situation anisotherme**, nos observations ont montré que le profil de vitesse expérimentale isotherme est en accord avec le profil de vitesse théorique.

Dès que nous commençons à chauffer à la densité de 5000 W/m^2 nous constatons l'apparition de gradient de vitesse par rapport au profil isotherme, au niveau de la paroi ; une variation de vitesse qui devient importante quand nous augmentons la densité de flux de chaleur portée à 10000 W/m^2 . Cette variation de vitesse s'explique parfaitement par le *phénomène de la fluidification liée à la diminution de la viscosité à la paroi car la température à la paroi est plus élevée que dans le fluide (lieu de forts gradients de température)* (Figure 9). Au même moment, les profils de vitesses à 5000 W/m^2 et à 10000 W/m^2 s'aplatissent au centre de la conduite ; ce qui peut être interprété comme l'influence de la chaleur sur l'écoulement. *En effet le glucose étant thermodépendant sa conductivité thermique varie plus ou moins avec la température.* La propriété $\eta(T)$ entraîne un couplage entre les

champs de vitesse et de température et ceci quelle que soit la géométrie. *Dans les canalisations, la thermodépendance a souvent pour effet d'interdire l'existence d'un régime établi stricto sensu.* La température du glucose n'est pas constante le long de l'écoulement. Les variations de viscosité qui en résultent, ont alors pour conséquence une modification progressive du profil de vitesses. Nous constatons que, à débit constant, *le gradient de vitesse à la paroi est plus important quand le fluide est chauffé ; c'est le cas de la courbe à 10000 W/m^2 par rapport à la courbe à 5000 W/m^2 et la courbe à 5000 W/m^2 par rapport à la courbe isotherme), ceci est compensé par une diminution de la vitesse dans la partie centrale imposée par la conservation du débit* (Figure 9).

Pour le cas du profil de taux de fluctuations de vitesse, nous comparons les valeurs des taux de fluctuations mesurées en aval de la zone chauffée à celles du régime laminaire isotherme pour la valeur du nombre de Reynolds égal à 58 (Figure 9). Nous mettons en évidence que, *même dans la région de forts gradients thermiques, le régime turbulent n'est pas atteint et qu'aucune instabilité n'apparaît.* Cependant, il est à remarquer un accroissement du niveau de fluctuations avec le nombre de Reynolds aux environs de la paroi. *Ceci nous amène à dire qu'il n'y a pas de fluctuations au cœur de l'écoulement.*

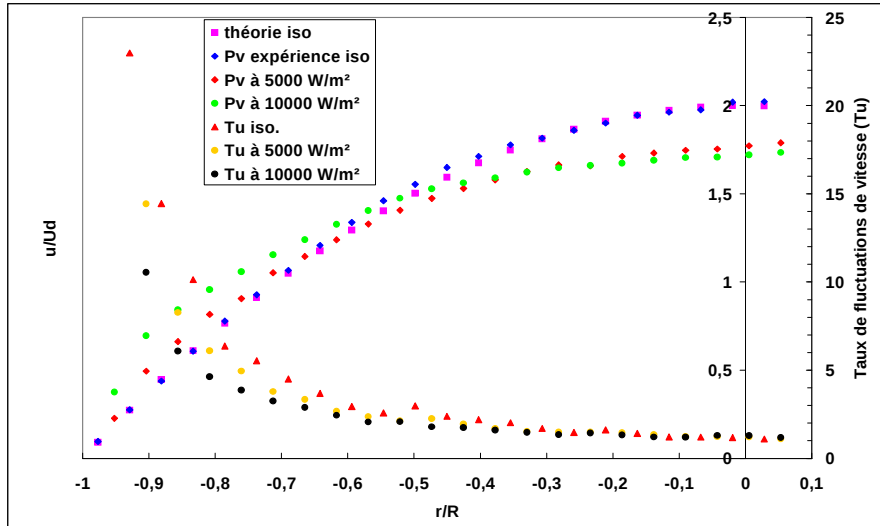


Figure 9 : Profils de vitesses et de taux de fluctuation de vitesses de l'écoulement anisotherme d'une solution de glucose à différentes densités de flux de chaleur (isotherme, 5000 W/m² et 10000 W/m²) (Re = 58).

2.6 Etude de profil de vitesses dans les suspensions anisothermes à base de glucose et des taux de fluctuations de vitesses

Nous effectuons l'étude des profils de vitesses dans les suspensions en écoulement laminaire anisotherme et ainsi que celle des taux de fluctuation des vitesses.

• Profils de vitesses en régime laminaire

Nos observations ont montré qu'il y a un décalage entre le profil de suspension à 1% isotherme et le profil de vitesse monophasique isotherme.

Il y a isovitesse entre ces deux profils au niveau de la paroi (Figure 10). Cette vitesse diminue au fur et à mesure que l'on tend vers le centre de la conduite ; la faible vitesse constatée au niveau du profil au centre implique une certaine concentration de sphères d'où localement *le mélange est plus visqueux*.

Dès que nous commençons à chauffer à la densité de 5000 W/m² nous constatons l'apparition d'une légère survitesse par rapport au profil isotherme et suffisamment sensible par rapport profil monophasique au niveau de la paroi. Cette survitesse prend d'ampleur quand nous augmentons la densité de flux de chaleur que nous avons portée à 10000 W/m². Cette survitesse s'explique alors par le phénomène de la fluidification liée à la diminution de la viscosité à la paroi indiquée ci-dessus.

• Profils des taux de fluctuations de vitesses

Les valeurs des taux de fluctuations mesurées en aval de la zone chauffée ont été comparées à celles du régime laminaire isotherme pour un nombre de Reynolds Re = 552 (Figure 10). *Ainsi dans la région de forts gradients thermiques, le régime turbulent n'est pas atteint et aucune instabilité n'apparaît.*

Il est à remarquer un accroissement du niveau de fluctuations avec le nombre de Reynolds aux environs de la paroi. Ceci nous amène à dire qu'il n'y a pas de fluctuations au cœur de l'écoulement ce qui montre que dans la région de forts gradients thermiques le régime turbulent n'est pas atteint et aucune instabilité n'apparaît.

En régime turbulent, le taux de fluctuations de vitesses en isotherme est de l'ordre de 11% alors que chauffé, il n'en est que de l'ordre de 7% au centre de la conduite (Figure 10). Près de la paroi, le taux est devenu le même (Tu ≈ 33%) pour les deux profils. Alors se pose la question de savoir pourquoi chauffé, le profil chute de 11% à 7% au centre de la conduite. Nous dirions qu'il a dû y avoir un effet global du transfert de chaleur sur l'ensemble du mélange, mais qui affecte très peu le centre de la conduite. Alors se pose la question de savoir pourquoi le profil a le même taux de fluctuations (aussi bien en isotherme

que chauffé soit $17\% \leq Tu \leq 33\%$ près de la paroi de la conduite. Les effets combinés de l'absence des particules près la paroi et de gradients de température élevés près de la paroi, sont probablement, à l'origine de ce phénomène. Ces différentes observations nous amènent à conclure que le phénomène de migration des particules est une fois encore confirmé (Chong et al, 1971); la présence des particules modifie le champ de vitesse aussi bien au centre qu'aux environs de la

paroi de la conduite (aplatissement du profil au centre et apparition de sensibles gradients de vitesses près de la paroi). Chauffé, il y a fluidification du mélange près de la paroi (gradients de vitesse élevés aux environs de la paroi et une augmentation de la viscosité (i.e. agglutination des particules au centre qui accentue un temps soit peu l'aplatissement du profil). D'où l'effet de couplage de la présence des particules et le transfert de chaleur dans une suspension de grosses sphères

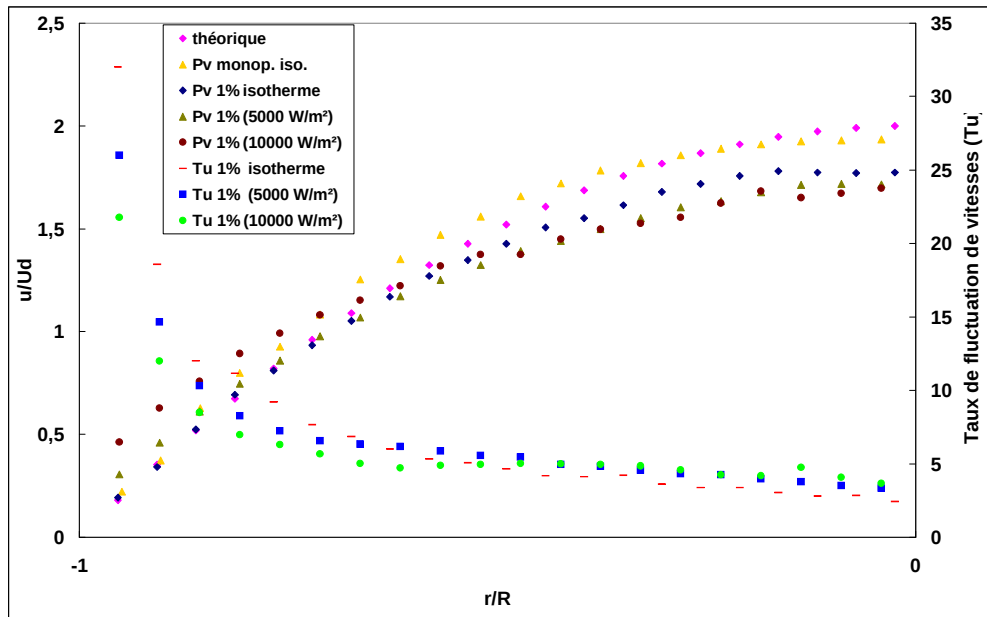


Figure 10 : Profils de vitesses et taux de fluctuations de vitesses d'une suspension à 1% à différentes densités de flux de chaleur dans un fluide porteur de glucose ($Re = 552$)

2. 7 Etude de profil de vitesses dans des suspensions en écoulement turbulent anisotherme et des taux de fluctuations des vitesses

• Profils de vitesses en régime turbulent

Dans ce cas de profil de vitesses nous aboutissons aux mêmes résultats, même si la fraction volumique est montée à 3% à savoir fluidification au niveau de la paroi et concentration élevée de particules au centre de la conduite. Quant au taux de fluctuations de vitesse, elles sont assez élevées pour atteindre le régime turbulent (Figure 11).

Influence accumulée des particules et de la thermodépendance du fluide porteur.

En effet les résultats en du profil de vitesse à la fraction volumique de 3% isotherme, montre un

courbe aplatie au centre de la conduite (zone d'accumulation des particules d'où viscosité élevée : champ de vitesses modifié) : c'est l'influence des particules sur le champ de vitesse (Figure 11). En observant le profil de vitesse à 3% chauffé, nous remarquons que la courbe s'est aplatie davantage au centre (effet des particules) et les gradients de vitesse qui en est issus près de la paroi montre l'effet de la chaleur (fluidification du mélange à la paroi) (Figure 11).

Ainsi nous pouvons dire qu'il y a un effet accumulé de la chaleur et de la présence des particules qui modifie sensiblement le profil de vitesses.

• Profils du taux de fluctuations de vitesse en régime turbulent

Le taux de fluctuations de vitesses en isotherme est de l'ordre de 11% alors que chauffé, il n'en est que de l'ordre de 7% au centre de la conduite (Figure 11). Près de la paroi, le taux est devenu le même ($Tu \approx 33\%$) pour les deux profils.

Nous constatons que chauffé, le profil chute de 11% à 7% au centre de la conduite ; ceci est certainement dû à l'effet global du transfert de chaleur sur l'ensemble du mélange, mais qui affecte très peu le centre de la conduite.

Nous remarquons aussi que le profil a le même taux de fluctuations aussi bien en isotherme que chauffé soit ($17\% \leq Tu \leq 33\%$) près de la paroi de la conduite. Les effets combinés de l'absence des particules près la paroi et de gradients de température élevés près de la paroi, sont probablement, à l'origine de ce phénomène constant.

Ces différentes observations nous amènent à dire que le phénomène de migration des particules est une fois encore confirmé aussi bien par la présence des particules modifiant le champ de vitesse, aussi bien au centre qu'aux environs de la paroi de la conduite (aplatissement du profil au centre et apparition de sensibles gradients de vitesses près de la paroi) que par le Chauffage qui génère la fluidification du mélange près de la paroi (gradients de vitesse élevés aux environs de la paroi et une augmentation de la viscosité); ceci s'explique par l'agglutination des particules au centre qui accentue un temps soit peu l'aplatissement du profil). Ce résultat confirme l'étude thermique par Gradeck et al (2005). Ceci met en évidence le couplage de la présence des particules et le transfert de chaleur dans une suspension de grosses sphères

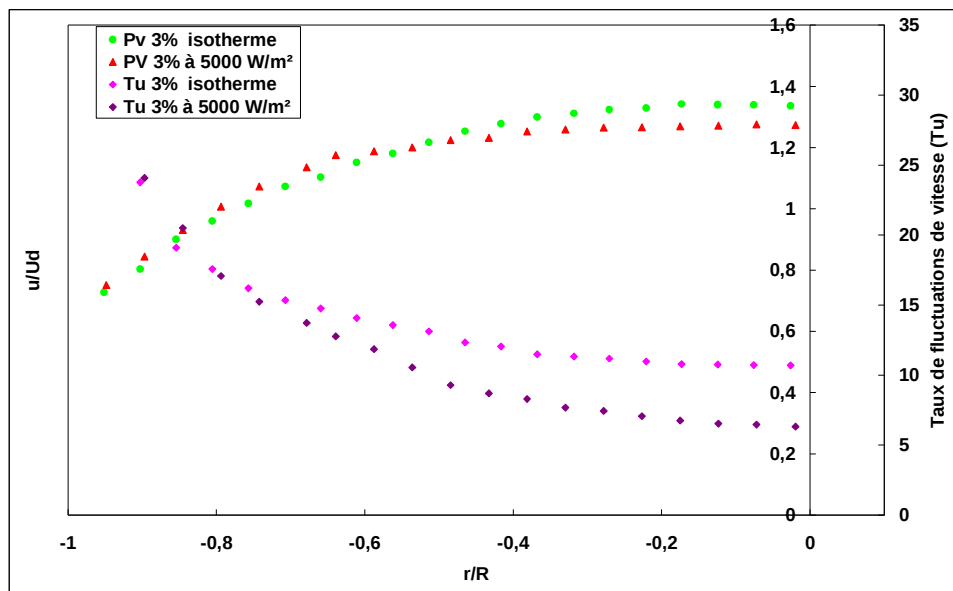


Figure 11 : Profils de vitesses et taux de fluctuations de vitesses d'une suspension à 3% à différentes densités de flux de chaleur dans un fluide porteur de glucose ($Re = 5383$).

3. CONCLUSION

En situation isotherme les différentes études que nous avons effectuées montrent que les profils de vitesses montrent la sédimentation des particules, de leur regroupement au cœur de l'écoulement aussi bien en régime laminaire qu'en régime turbulent. Ces résultats confirment que l'organisation générale des suspensions (au cœur de l'écoulement, forte concentration en particule et anneau « monophasique

en paroi »). Ceci nous amène à dire qu'il n'y a pas de fluctuations au cœur de l'écoulement.

En situation de chauffage des fluides newtoniens, il y a aplatissement du profil de vitesse et cet aplatissement est important avec les particules. L'étude de l'écoulement des suspensions dans une solution de du sirop de glucose et de l'eau met en évidence l'influence des sphères dures sur l'écoulement. L'étude des profils de vitesse des

suspensions de grosses sphères dures en écoulements isotherme et anisotherme confirme l'influence des sphères dures dont la présence modifie la rhéologie du mélange et celle du fluide porteur. Ces différentes observations nous amènent à conclure que le phénomène de migration des sphères dures est, une fois, encore confirmé ; la présence des sphères dures modifie le champ de vitesses aussi bien au centre qu'aux environs de la paroi de la conduite (aplatissement du profil au centre et apparition de sensibles gradients de vitesses près de la paroi). Le phénomène de migration des particules vers le centre de la conduite génère un fort gradient de

concentrations en particules. Ce qui est à la base de la variation de la viscosité au sein du mélange. L'analyse de l'écoulement en conduite horizontale permet de mettre en évidence non seulement l'hétérogénéité des particules en suspensions mais fait ressortir la transition entre le régime laminaire et turbulent. Ainsi cette transition est d'autant plus précoce que la concentration en particule est élevée. La forme demi-parabolique de la courbe nous emmène à dire que l'écoulement est laminaire et établi. Ces résultats nous autorisent à préciser aussi que l'installation et les instruments de mesures, que nous avons utilisés, sont fiables.

4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. AYUKAWA K., 1969.- Velocity profile in a horizontal duct in the hydraulic transport of solid. *Proceedings of 47th Congress of Japan Soc. Mech. Engrs.*
2. AYUKAWA K., 1970.- Velocity distribution and pressure drop of heterogeneously suspended flow in hydraulic transport through a horizontal pipe. *First International Conference on the hydraulic transport of solids in pipes.*
3. DURAND R., 1953.- Minnesota Int. Hydraulics Conv., Proc. Int. Ass. for hydraulics Research, pp. 89. Famularo J. et Happe J., 1965. *A.I. Ch. E. Journal*, 11: 981.
4. FANG Z., MAMMOLI A. A., BRADY J. F., INGBER M. S., MONDY L. A., GRAHAM A. L., 2002.- Flow-aligned tensor models for suspension flows. *International Journal of Multiphase Flow*, N° 28 : 137-166.
5. KYOKAI O., 1981.- Trajectory and Diffusion of Particles in Liquid-Solid Flow of Slurry Pipeline. *Journal of Pipelines*, 1: 211-223, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam- Printed in The Netherlands.
6. LAUFER J., 1954.- The structure of turbulence in fully developed pipe flow. N.A.C.A. report 1174. Mills, P. et Snabre, P., 1995. Rheology and Structure of Concentrated Suspensions of Hard spheres. Shear Induced Particle Migration. *J. Phys.*, vol. 10: 1597-1608.
7. NEWITT D. M., RICHARDSON J. F., ABBOTT, M. and TURTLE R. B., 1955.- Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes. *Trans. Instn Chem. Engrs*, Vol. 33: 93-113.
8. PENNELL, W. T., SPARROW E. M. and ECKERT E. R. G., 1972.- Turbulence intensity and time mean velocity distributions in low Reynolds number turbulence pipe flow. *Int. J. of Heat and Mass Transfer, Part III*, 652-661, D-159, D-211-215, ASME New York.
9. ROUND G. F. and TAWO E.N., 1970.- Incompressible turbulent flow in tubes containing spheres trains. *First international conference on the hydraulic transport of solids in pipes* 1st-4th septembre, c5-89-c5-99.
10. SILIN, N. A, VITOSHKIN, YU. K., KARASIK, V. M. and OCHERETKO, V. E., 1969.- Research on solid liquid flows with high consistency. *Proceedings of 13th Congress of I. A. H. R.*, Vol. 2, pp. 147-156, (September).
11. KRIEGER I M., DOUGHERTY T. J., 1959.- A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Trans. Soc. Rheol.*, 3: 137-152.
12. KRIEGER I. M., 1972.- Rheology of monodisperse latices *Advan. Colloid Interface Sci.* 3: 111-136.
13. QUEMADA D., 1982.- Unstable flows of concentrated suspensions, in *Stability of*

Thermodynamic Systems. Edited by J. Casas-Vasquez and G. Lebon, Lect. Notes in Physics, 164 (Springer-Verlag, Berlin) 210-247.

14. QUEMADA D., 1995.- Modélisation structurelle du comportement rhéoépaississant des fluides complexes en application aux dispersions colloïdales, 30^{ième} coll. Gr. Franç. Rheol., *les Cahiers de Rhéologie*, XIV-1 : 1-10

15. QUEMADA D., ILDEFONSE B., ALLAIN C. et COUSSOT P., 1997.- Rhéologie et structures des suspensions concentrées. In *Des grands écoulements naturels à la dynamique du tas de sable- introduction aux suspensions en géologie et en physique*. Ed., Antony (France).

16. QUEMADA D., 1998.- Rheological modelling of complex fluid I. The concept of effective volume fraction revisited. *Eur. Phys. J.*, AP 1: 119-127.

17. CHONG J. S., CHRISTIANSEN E. B. et BAER A. D., 1971.- Rheology of Concentrated Suspensions. *Journal of Applied Polymer Science*, 15: 2007-2021.

18. GRADECK, M., FAGLA, B. F. Z., BARAVIAN C., LEBOUCHE M., 2005.- Expérimental Thermo-mechanic Study of Newtonian and Non-Newtonian Suspension Flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48: 3469-3477.