HAL open science

Analyse de la distribution cumulée en particules dans des conduites cylindriques :application à l'écoulement de suspensions alimentaires solide-liquide

Alexandra Legrand, Marc Berthou, Luc Fillaudeau

To cite this version:

Alexandra Legrand, Marc Berthou, Luc Fillaudeau. Analyse de la distribution cumulée en particules dans des conduites cylindriques :application à l'écoulement de suspensions alimentaires solide-liquide. Industries Agro-Alimentaires, 2006, 123 (01-02), pp.10-18. hal-02310097

HAL Id: hal-02310097

https://hal.science/hal-02310097v1

Submitted on 10 Oct 2019

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

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

Analyse de la distribution cumulée en particules dans des conduites cylindriques : application à l'écoulement de suspensions alimentaires solide-liquide

Alexandra Legrand*, Marc Berthou**, Luc Fillaudeau***

* INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) LGPTA (Laboratoire de Génie des Procédés et Technologie Alimentaires)
369, rue Jules Guesde – 59650 Villeneuve d'Ascq cedex, France. Tel: +33(0) 561 559 691, Fax: +33(0) 561 559 400
E-mail: alexandra.legrand@caramail.com

** EDF-R&D, Les Renardières, 77818 Moret Sur Loing Cedex, France.

*** INSA - Laboratoire de Biotechnologie - Bioprocédés - CNRS UMR 5504 - INRA UMR 792 135, avenue de Rangueil - F-31077 TOULOUSE cedex 4

Résumé

Une méthode basée sur la visualisation de l'écoulement et sur une analyse géométrique de suspensions solide-liquide a été développée afin de caractériser leur homogénéité.

Elle consiste à déterminer la distribution cumulée des particules dans des conduites cylindriques. L'écoulement de suspensions modèles et réelle a été étudiée en fonction du débit de circulation ($233 \leq Q \leq 2922$ l.h^{-1} soit $1 \prec \mathrm{Re} \prec 30000$), de la concentration en particules ($3 \leq C_p \leq 28$ %p/p), du comportement rhéologique du fluide (1<n<0,8 et 0,26<k<0,001 Pa.sn), du diamètre de la conduite Dc (36 et 48 mm) et de son orientation (horizontale ou verticale).

Les résultats montrent que des critères quantitatifs *(h^*_{50}, h^*_{10}, y^*_{50} et y^*_{50})* issus de la distribution cumulée des particules peuvent être définis pour caractériser l'homogénéité des suspensions. La concentration en particules minimale de formation d'un lit ($C_{p_{\min}}$) apparaît comme un critère fondamental pour distinguer les comportements des suspensions. En revanche, les corrélations établies en fonction d'invariants de similitude tels que Cp, Re, Fr, Ar restent d'un intérêt limité même si de fortes analogies comportementales sont observées entre les suspensions réelles et modèles.

Mots-clés : suspension solide-liquide, particules, tubes horizontaux et verticaux, caractérisation des écoulements.

Abstract

The objective of this study was to develop a methodology based on flow visualisation in order to measure the cumulative particle distribution in vertical or horizontal tubes and to validate it with model and real food suspensions. This method first enabled to draw up a geometrical description based on a theoretical analysis of the suspension (homogeneous suspension, stationary bed) and second to define the quantitative criteria (h^*50, h^*10, y^*50 et y^*10) issued from the cumulative particle distributions. The cumulative distribution was investigated with a model suspension (alginate beads in CMC solution) and a real industrial product (bean mixture) versus flow-rate (from 233 up to 2922 l.h^{-1}, $1 \prec \mathrm{Re} \prec 30000$), concentration (from 3 up to 28 %w/w) and particle-to-pipe diameter ratios (from 0.187 up to 0.330). Strong analogies between model and real suspension behaviour were noted when the particle concentration increases. However noticeable differences were observed and the results show that the flow pattern depends on the minimal concentration $C_{p_{\min}}$. For concentrations higher than $C_{p_{\min}}$, the criteria y^*50 and y^*10 were correlated perfectly with h^*50 and h^*10 and consequently the particle concentration. For concentrations lower than $C_{p_{\min}}$, the suspension homogeneity seemed mainly to depend on the flow regime. On the other hand, analysis of quantitative criteria with dimensionless numbers (Cp, Re, Fr, Ar) was much more delicate.

Keywords: solid-liquid suspension, particle food, horizontal and vertical tubes, food processing, flow characterisation.

1. Introduction

Dans les industries agroalimentaires (IAA), le traitement thermique en continu se présente aujourd'hui comme un moyen efficace et économique de détruire des micro-organismes dans une grande variété d'aliments (produits lactés, macédoine de légumes, petits pois, fruits au sirop, etc.). En raison de ses applications industrielles, l'écoulement des fluides newtoniens et non-newtoniens a fait l'objet de très nombreuses études théoriques et expérimentales. A l'inverse, les travaux portant sur l'écoulement de produits alimentaires diphasiques (solide - liquide) sont sévèrement limités par le manque de connaissances (compréhension et modélisation) des principes qui régissent le comportement de tels produits dans les équipements industriels. L'état de l'art sur la caractérisation de suspensions montre également une grande diversité des classifications des écoulements (Okuda, 1981 ; Fagla, 2002 ; Grabowski & Ramaswamy, 1995 ; Sastry & Zuritz, 1987). Ces dernières sont généralement basées sur une appréciation visuelle, les auteurs observant les particules se déplaçant dans des sections

Ind. Alim. Agr. 123 (01/02) 10-18 (2006) • Manuscrit reçu le 21/04/2004, accepté le 14/09/2005

transparentes. De nombreuses variables expérimentales régissent le comportement des suspensions solide-liquide : les dimensions, la forme et la concentration en particules, les ratios de masses volumiques et leur dispersion, le comportement rhéologique du fluide porteur, le régime d'écoulement ou encore la géométrie et l'orientation des conduites (Chandarana, 1992 ; Ramaswamy *et al.*, 1992 ; Sancho & Rao, 1992 ; Singh & Lee, 1992 ; Yang & Swartzel, 1991 ; Sastry, 1993 ; Abdelrahim *et al.*, 1993 ; Lareo *et al.*, 1997). Toutefois, l'influence de ces divers paramètres sur la distribution des particules au sein de la section de passage est assez mal connue. Le manque de données expérimentales sur les écoulements de fluides alimentaires chargés en grosses particules, en particulier pour des concentrations de solides élevées, ne facilite pas l'élaboration de modèles prédictifs décrivant l'allure et la structure de l'écoulement. La plupart des études est réalisée avec des suspensions modèles, ce qui limite leur domaine de validité en raison d'hypothèses simplificatrices et l'extrapolation des résultats à des suspensions alimentaires réelles. Enfin, le manque d'informations sur des études comparatives entre particules modèles et réelles est indéniable.

L'objectif de ce travail vise à pallier ces lacunes en développant une méthode basée sur la visualisation de l'écoulement et une analyse géométrique d'une suspension solide-liquide afin de caractériser son homogénéité en déterminant la distribution cumulée des particules dans des conduites cylindriques. Un plan d'expérience a permis d'étudier l'écoulement de suspensions modèles et réelle en fonction du débit de circulation, de la concentration en particules, du comportement rhéologique du fluide considéré comme un fluide d'Ostwald de Waele, du diamètre et de l'orientation de la conduite.

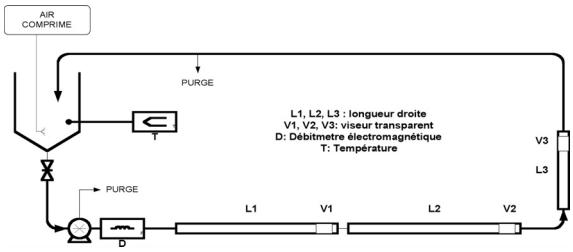
2. Matériels et méthodes

2.1 Plate-forme expérimentale et instrumentation

La plate-forme expérimentale (Figure 1) se compose d'une cuve de lancement cylindrique à fond conique d'une capacité de 200 l. La cuve est munie d'une vanne d'isolation et est équipée d'un système de bullage (air comprimé), afin d'éviter tout phénomène de décantation des particules. La circulation de la suspension est assurée par une pompe à lobes SINE SPS 3" (LASSOUDRY), limitant la destruction des particules.

Figure 1 : Schéma de la plate-forme expérimentale et instrumentation.

Figure 1 : Experimental pilot plant and instrumentation.



Les conduites sont des tubes cylindriques en acier inoxydable (Inox 316L) de section circulaire lisse, de diamètres intérieurs 36 mm et 48 mm. Le produit s'écoule dans une conduite de diamètre 36 mm de 7,5 m (L1) de longueur, équipée à son extrémité d'un viseur transparent en verre de même section (V1), disposé horizontalement. La suspension circule ensuite dans des conduites de diamètre 48 mm de 5 m (L2) et 1,5 m (L3) de longueur, équipées à leurs extrémités de deux viseurs transparents en plexiglas de même section, disposés horizontalement (V2) et verticalement (V3).

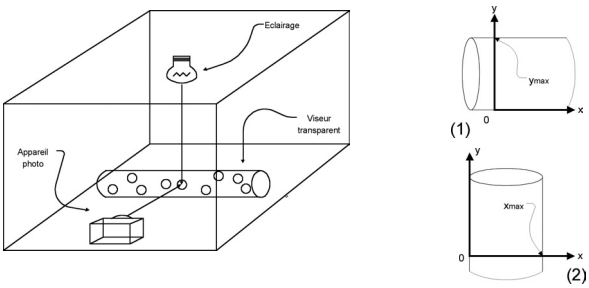
La température du mélange est mesurée par un thermomètre numérique PR510 (PROLABO) avec une précision de ±0,2 °C. Le débit du mélange solide-liquide est mesuré par un débitmètre électromagnétique à induction Altoflux DN10 (ALTOMETER, Max : 5000 $l.h^{-1}$, précision 1 %).

2.2 Etude du profil de concentration en particules

L'étude du mode d'écoulement de la suspension consiste à mesurer la répartition des particules en fonction du diamètre dans la section de passage pour différentes conditions opératoires (fluide, débit, concentration, orientation). La détermination de la distribution des particules nécessite de connaître la position et le nombre de particules dans un volume défini de la conduite. Pour ce faire, des photos de l'écoulement de la suspension sont prises comme le montre la figure 2. La prise de vue est réalisée grâce à un appareil numérique (Camedia C 2002Z, OLYMPUS), placé perpendiculairement au sens de l'écoulement et à l'éclairage, de manière à ce que le plan de l'image corresponde au plan de l'éclairage et que son centre corresponde au centre du viseur. Le traitement des images s'effectue sous Photoshop 6.0 (Adobe).

Figure 2 : Emplacements et orientation relative de l'éclairage et de la prise de vue – Orientation des axes x et y pour les conduites horizontales (1) et verticales (2).

Figure 2 : Relative positions of camera and light – Orientation of axes (x, y) in horizontal (1) et vertical (2) ducts.



Les images sont analysées à l'aide du logiciel Optimas 6.5 (MEDIA CYBERNETICS, Silver Spring, USA) comme le montre la figure 3. Une application permet de calculer : les dimensions de l'image x_{max} et y_{max}, le nombre de particules de l'image N_0, les positions absolues des centres des particules x et y et les positions relatives des centres des particules $x^*=x/x_{max}$ et $y^*=y/y_{max}$. Pour les viseurs horizontaux (V1, V2), y_{max} correspond au diamètre du tube, pour le viseur vertical (V3), c'est x_{max}. Pour chaque point de fonctionnement, le nombre d'images analysées est supérieur ou égal à 3 et le nombre de particules identifiées supérieur à 40.

2.3 Suspensions modèles (A) et réelle (B)

2.3.1 Suspensions modèles (A)

Les fluides porteurs devaient répondre au cahier des charges établi pour cette étude à savoir : être transparents de manière à visualiser et localiser les particules, avoir des masses volumiques sensiblement identiques, des viscosités apparentes et des comportements rhéologiques différents de manière à couvrir une plage de régime d'écoulement relativement large et modéliser le comportement rhéologique de fluides porteurs

rencontrés dans les industries agroalimentaires. Les fluides porteurs retenus étaient les suivants : l'eau, une solution à 0,75 % p/p de carboxyméthylcellulose (CMC, PROLABO) et une solution à 1,8 % p/p de CMC. Les caractéristiques physiques des fluides porteurs, présentées dans le tableau 1, ont été mesurées expérimentalement.

Les particules modèles devaient répondre à plusieurs critères : une forme représentative des particules rencontrées en industrie alimentaire (cubes de légumes, petits pois, etc.), une masse volumique proche des produits réels, une dimension représentative des particules réelles, compatible avec l'installation utilisée et une résistance mécanique suffisante pour que les particules supportent plusieurs passages dans l'installation. Le choix s'est porté sur des billes d'alginate dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 1 : Propriétés physiques des fluides porteurs (à 20 °C).

Tableau 1 : Physical properties of carrier fluids (at 20 °C).

		Eau	CMC 0,75 %	CMC 1,8 %	Fluide B
Masse volumique	ρ [kg.m^{-3}]	1000	1002	1005	1101
Viscosité	μ [Pa.s]	0,001	-	-	-
Indice de consistance	k [Pa.s^n]	-	0,03	0,26	15,72
Indice de structure	n [-]	-	0,93	0,81	0,19

Tableau 2 : Propriétés physiques des particules modèles (A) et réelles (B) (à 20 °C).

Tableau 2 : Physical properties of model (A) and real (B) particles (at 20 °C).

Caractéristiques	A	B
Forme	Sphérique	Ovoïde
Dimension [mm]	D_p = 9,0	e = 7,4, l = 10,4 L = 20,7 soit D_{sp} = 12,0
Volume [mm^3]	381,7	900,0
ρ [kg.m^{-3}]	1048 ± 8	1116 ± 64
ε [-] en 36 mm	0,38	0,47
ε [-] en 48 mm	0,35	0,39

2.3.2 Suspension réelle (B)

Pour des raisons de confidentialité souhaitées par l'industriel engagé dans cette étude, le nom et la composition du produit alimentaire ne peuvent être fournis dans ce document. Par conséquent, la démarche optant pour la réalisation d'un fluide simulant au mieux le comportement rhéologique du fluide alimentaire s'est avérée indispensable. Ce fluide est une solution de xanthane 0,6 %p/p, saccharose 22,6 %p/p, NaCl 1,5 %p/p, eau 75,3 %p/p (Tableau 1). Les particules réelles sont des haricots rouges dont les propriétés physiques sont résumées dans le tableau 2.

2.4 Plan d'expérience

Le fluide circule pendant 15 minutes pour assurer un bon remplissage de l'installation. Une quantité appropriée de particules est ensuite versée dans la cuve de lancement. L'ensemble solide - liquide circule 3 minutes pour atteindre des conditions stables d'écoulement (homogénéité en concentration en particules et en débit). Pour le produit réel, la tenue mécanique des particules ne permet qu'une présence de quelques minutes (< 15 minutes) en écoulement dans l'installation avant leur dégradation complète. Des photos de l'état de la suspension sont alors prises puis analysées comme le montrent les figures 2 et 3. L'encombrement stérique des particules (diamètre de particules, 9 à 20 mm, du même ordre de grandeur que celui des conduites, 36 et 48 mm) et les concentrations de travail permettent d'identifier chacune des particules sur les prises de vue. Durant cette étude, la température du mélange était de 20 ±2°C. La concentration en particules et le débit étaient respectivement compris entre 5 et 30 %p/p et 316 et 2922 l.h^{-1} ($20 < Re_f < 30000$) pour les produits modèles et entre 3 et 20 %p/p et 233 et 980 l.h^{-1} ($1 < Re_f < 66$) pour le produit réel. Nous indiquons dans le tableau 3 les plages couvertes par quelques invariants de similitude.

Tableau 3 : Plage de variation des invariants de similitude

Tableau 3 : Range of various dimensionless numbers

Produit	Re_g	Ar	Fr	α	d_p/D_c	C_p
	$Re_g = \frac{\rho \cdot v^{2-n} \cdot D_c^n}{k \cdot \Phi^n \cdot \xi^{n-1}}$	$Ar = \frac{g \cdot d_p^3 \cdot \alpha}{\left(\eta_{app}/\rho_f\right)^2}$	$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot d_p \cdot \alpha}}$	$\alpha = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}$	d_p/D_c	C_p
MODÈLE	20 – 30 000	8 - 300 000	0,7 - 15	0,038 – 0,043	0,18 – 0,25	0,05 – 0,40
RÉEL	1 – 66	0,1 - 5	1,3 -14	0,014	0,25 – 0,33	0,03 – 0,20

3. Résultats et discussion

3.1 Analyse théorique

3.1.1 Description d'un lit de particules sédimentées dans une conduite cylindrique

Considérons une suspension (solide-liquide) s'écoulant dans une conduite cylindrique circulaire de longueur dx dans laquelle les particules sont totalement sédimentées et forment un lit homogène en écoulement de surface A et de hauteur h, comme l'illustre la figure 4. En posant T, la surface du triangle OPQ définie par $T = (r-h)\sqrt{r^2-(r-h)^2}$, la portion de cercle de rayon r et d'angle α a une surface de $A = r^2 \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - (r-h)\sqrt{r^2}$. La surface occupée par le lit de particules devient alors :

$$A = r^2 \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - (r-h)\sqrt{r^2-(r-h)^2} \qquad \textbf{Eq. 1}$$

Le lit de particules est par ailleurs caractérisé par une porosité e, correspondant à la fraction liquide du lit (V_f) rapportée au volume de ce lit (V_{lit}) :

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V_f + V_p} = \frac{V_f}{V_{lit}} \quad \textbf{soit} \quad \varepsilon = \frac{V_f}{V_f + V_p} = \frac{V_f}{V_{lit}} \qquad \textbf{Eq. 2}$$

Connaissant le volume de particules ($V_p = \Phi_V V_c$ avec $V_c = \pi r^2 dx$), il est aisé de déterminer la fraction volumique en particules Φ_V :

$$\Phi_V = \frac{(1-\varepsilon)}{V_c} V_{lit} \qquad \textbf{Eq. 3}$$

Sachant que $\Phi_V = \frac{(1-\varepsilon)}{V_c} V_{lit}$, la fraction volumique en particules devient :

$$\Phi_V = \frac{(1-\varepsilon)}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - \left(\frac{r-h}{r^2}\right) \sqrt{r^2-(r-h)^2} \right] \qquad \textbf{Eq. 4}$$

La concentration en particules s'écrit alors :

$$C_p = \frac{\Phi_V \rho_p}{\Phi_V \rho_p + (1-\Phi_V)\rho_f} \qquad \textbf{Eq. 5}$$

3.1.2 Concentrations maximale, $C_{p_{max}}$ et minimale, $C_{p_{min}}$

Comme le volume de particules (V_p) est relatif à la concentration en particules C_p, plus celle-ci sera élevée, plus le volume occupé par le lit décanté sera grand et par conséquent, plus la hauteur du lit de particules décantées sera élevée. Le volume occupé par les particules (V_p) à la concentration maximale admissible ($C_{p_{max}}$) dans une conduite cylindrique, correspond alors au volume de la conduite (V_c) dont le diamètre est égal à la hauteur de lit. Il s'agit de la concentration pour laquelle :

$$\phi_c = 1 - \varepsilon \qquad \textbf{Eq. 6}$$

Les porosités en statique du lit de billes d'alginate (produit A), déterminées expérimentalement, sont respectivement de 0,38 et 0,35 dans les conduites de diamètres 36 et 48 mm. Dans le

cas d'un lit de particules en mouvement dans une conduite, la porosité est obligatoirement supérieure de part l'expansion du lit générée soit par les chocs, soit par l'écoulement du fluide.

Dans la présente étude, les concentrations maximales admissibles en particules ($C_{P_{max}}$) sont respectivement de 62 % et de 65 % pour les conduites de diamètres 36 et 48 mm (produit B). Il sera donc impossible d'obtenir des concentrations en particules supérieures, à moins de les déformer. Cette valeur ne représente cependant qu'une concentration maximale théorique pour des conduites droites. Compte tenu de la présence de nombreux coudes sur les équipements industriels, cette concentration n'est souvent jamais atteinte. Des phénomènes de bouchage de l'installation apparaissent en effet dès lors que la concentration en billes d'alginate excède 50 %.

La concentration minimale en particules ($C_{P_{min}}$) nécessaire à l'obtention d'un lit uniforme, en supposant une décantation totale peut également être déterminée. Un lit uniforme est constitué de particules sédimentées les unes à côté des autres en monocouche et formant un chaînon sur le fond de la section.

La hauteur minimale du lit de particules décantées (h) correspond alors l'épaisseur (e) de la particule, soit 9 mm (produit A). En utilisant les relations établies précédemment (équations 4 et 5), il s'avère que les concentrations minimales en particules ($C_{P_{min}}$) sont de 12 % pour la conduite de diamètre 36 mm et de 8,4 % pour la conduite de diamètre 48 mm (produit A).

3.1.3 Représentation des distributions cumulées en particules

Suite à l'analyse des prises de vue, les positions des particules (y ou x) sont classées par ordre décroissant. Un chiffre N est attribué à chaque position selon une suite arithmétique du type $U_{N+1}=U_{N+1}$. Un numéro d'ordre $N^*=N/N_0$, variant de 0 à 1, est alors associé à chaque position.

Pour pouvoir comparer les positions des particules au sein de la conduite, quels que soient son diamètre et son orientation, il est nécessaire de normer ces grandeurs par rapport au diamètre de la conduite, Dc. Nous définissons ainsi les positions relatives des particules $x^*=x/D_c$ et $y^*=y/D_c$. Une fonction de distribution cumulée en particules, $N^*(y^*)=1-F(y^*)$ en fonction de la hauteur normée dans la conduite est ainsi déterminée. Notons que les particules correspondant aux valeurs de N^* les plus faibles sont situées en haut des viseurs horizontaux et à gauche du viseur vertical.

De manière comparable, dans le cas de conduites cylindriques, l'évolution de la distribution cumulée en particules aurait pu être représentée en fonction du volume occupé et non de la hauteur dans la conduite. Ce type de représentation aurait conduit à des observations et discussions comparables, d'autant que l'effet de courbure des profils se trouve amoindri par un ratio élevé du diamètre des particules sur le diamètre des conduites, 0,19 à 0,50.

3.1.4 Définition des critères y^*_{10}, x^*_{10}, y^*_{50} et x^*_{50}

Une suspension peut évoluer vers deux cas extrêmes : la suspension parfaitement homogène et le lit de particules complètement sédimentées. Etant donné que x et y représentent les positions du centre des particules, dans le cas d'une suspension homogène, les positions minimales et maximales sont égales à y^*_{min} ou $x^*_{min}=\frac{e}{2?D_c}$ et $y^*_{max_{hom}}$ ou $x^*_{max_{hom}}=\frac{2}{D_c}$, e étant l'épaisseur de la particule. Pour chaque condition expérimentale, quatre critères y^*_{10}, x^*_{10}, y^*_{10} et x^*_{10} peuvent a priori être retenus afin d'étudier plus rigoureusement l'influence des conditions opératoires sur l'écoulement des suspensions. y^*_{10} *ou* x^*_{10} *et* y^*_{50} ou x^*_{50} représentent respectivement la position relative du centre de la particule correspondant aux valeurs de $N^*=0,1$ *et* $N^*=0,5$ dans les conduites horizontales (y) ou verticales (x) comme l'illustre la figure 5. Ainsi, à titre d'exemple, sur la courbe expérimentale, lorsque y^*_{50} est égal à 0,18, cela signifie que 50 % des particules occupent 19 % de la hauteur de la conduite et lorsque y^*_{10} est égal à 0,57, 90 % des particules occupent 57 % de la hauteur. Pour des suspensions homogènes ou totalement sédimentées, les critères y^*_{10} et y^*_{50} évoluent entre des valeurs seuils (Tableau 4). La suspension deviendra en effet homogène lorsque y^*_{50} sera égal à 0,5 et y^*_{10} à $1-\frac{d_p}{2?D_c}$ et $1-\frac{d_p}{2?D_c}$ sédimentée lorsque y^*_{50} *et* y^*_{10} seront proches des caractéristiques d'un lit fixe. Le critère, h^* est alors la hauteur équivalente d'une suspension décantée (lit statique) établie à partir des équations 1 à 5; h^*_{10} *et* h^*_{50}, correspondent aux hauteurs théoriques du lit de particules à 90 % et 50 % de la population (Figures 4 et 5).

Tableau 4 : Plage de variation des critères y*10 et y*50 pour les différents types de suspensions observés

Tableau 4 : Range of various criteria y*50 and y*10 versus different suspension types

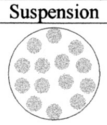
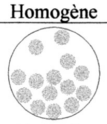
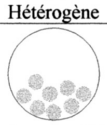
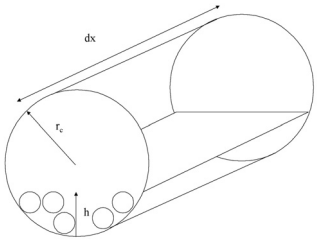
Suspension	y^*_{50}	y^*_{10}
 Homogène	$y^*_{50}=0,5$	$y^*_{10}\cup 1-\frac{d_p}{2?D_c}$
 Hétérogène	$0.5\succ y^*_{50}\succ h^*_{50}$	$1-\frac{d_p}{D_c}\succ y^*_{10}\succ h^*_{10}$
 Lit stationnaire (décanté)	$y^*_{50}\cup h^*_{50}=\frac{h}{2D_c}$	$y^*_{10}\cup h^*_{10}=\frac{h-\frac{d_p}{2}}{D_c}$

Figure 4 : Schéma d'un lit homogène de particules décantées dans une conduite.

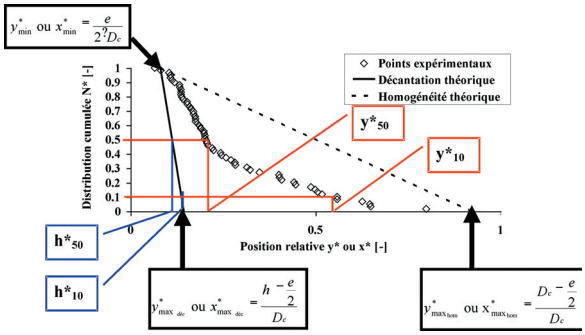
Figure 4 : Description of a homogeneous bed in a cylindrical duct.



il manque l'autre partie de la figure 4

Figure 5 : Distribution cumulée en particules N* en fonction de la position relative y* ou x*.

Figure 5 : Cumulative distribution of particles N* versus relative position y* ou x*.



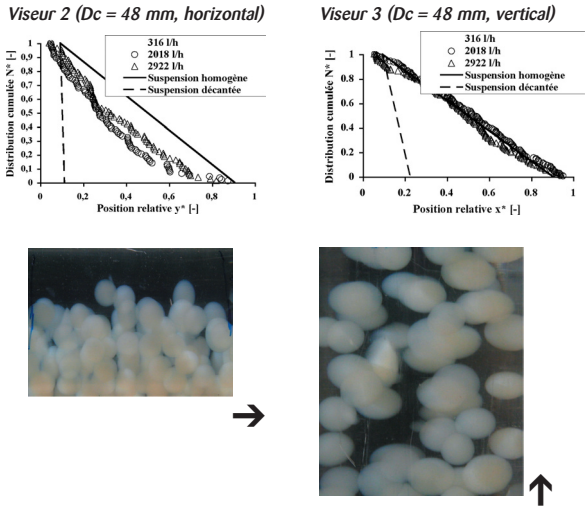
3.2 Ecoulement des suspensions modèles (A)

3.2.1 Influence des différents facteurs expérimentaux

L'influence du débit de circulation, de la concentration en particules, du comportement rhéologique du fluide, du diamètre et de l'orientation des conduites a été analysée à partir de la représentation graphique de la distribution cumulée du nombre de particules N^* en fonction de la hauteur normée de la conduite y^* ou x^*. Un exemple des résultats obtenus est représenté sur la figure 6.

Figure 6 : Distributions cumulées de la concentration en particules (CMC 0,75 %) et illustration des écoulements (Eau) - V2 et V3.

Figure 6 : Cumulative particles distributions (CMC 0.75 %) and illustrations of flows (water) in horizontal (V2) and vertical(V3) ducts.



Les observations sont les suivantes :

- lorsque la concentration en particules augmente, l'écoulement se rapproche d'un écoulement homogène, et ce quel que soient les débits et les fluides porteurs. Ce résultat est cohérent puisque des concentrations élevées en particules gênent la sédimentation de celles-ci et la vitesse de décantation est freinée. Par ailleurs, lorsque la concentration en particules est supérieure à 20 %, l'écoulement est généralement homogène.
- lorsque le débit augmente, l'écoulement se rapproche d'un écoulement homogène pour des concentrations en particules inférieures à 20 %, bien que l'influence du débit soit inférieure à celui de la concentration. Lorsque la concentration en particules augmente (Cp>20 %p/p), l'influence du débit sur l'homogénéité de l'écoulement semble diminuer.
- moins le fluide porteur est visqueux (k<0,03 Pa.sn), plus l'écoulement est homogène, à concentration constante en particules. Plus le fluide porteur est visqueux, plus le débit semble avoir une influence sur l'homogénéité de l'écoulement.
- plus le diamètre de la conduite est faible, plus l'écoulement est homogène, pour une même concentration et un même débit.
- lorsque la conduite est verticale, l'écoulement est toujours homogène, hormis dans le cas du fluide porteur le plus visqueux (k=0,26 Pa.sn), aux plus faibles concentrations en particules.

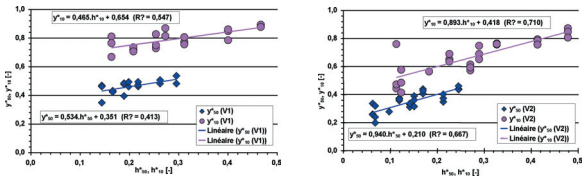
3.2.2 Analyses des critères y^*_{50}, x^*_{50} et y^*_{10}, x^*_{10}

Sur le viseur vertical (V3), aucune influence de la concentration en particules n'est observée sur les valeurs de X^*_{50} qui restent proches de 0,5. L'écoulement est donc homogène de part et d'autre du centre du tube. La valeur de X^*_{10} augmente légèrement en fonction de la concentration et reste toujours supérieure à 0,7. Un écoulement préférentiel au centre du tube a donc lieu dans les conduites verticales, occupant 70 % de la largeur aux faibles concentrations, et dont l'homogénéité augmente légèrement avec la concentration.

Sur le viseur horizontal de diamètre 36 mm (V1), quel que soit le débit, l'allure des courbes est sensiblement la même : y^*_{50} et y^*_{10} augmente avec la concentration. Cette augmentation est relativement linéaire sur l'intervalle de concentrations 10 % - 28 %. Sur cet intervalle, y^*_{50} est compris entre 0,32 et 0,52, et y^*_{10} entre 0,65 et 0,90. L'écoulement est légèrement "décanté" pour des concentrations inférieures à 10 % et quasi-homogène pour des concentrations supérieures. Sur le viseur horizontal de diamètre 48 mm (V2), les observations sont similaires : y^*_{50} et y^*_{10} augmentent en fonction de la concentration, devenant relativement linéaire sur l'intervalle de concentrations 10 % - 28 %. Sur cet intervalle, y^*_{50} est compris entre 0,3 et 0,4 et y^*_{10} entre 0,5 et 0,9. L'écoulement n'est jamais homogène, aux faibles comme aux fortes concentrations et est fortement "décanté" aux faibles concentrations. Pour illustrer ces propos, nous avons représenté sur la figure 7 l'influence de la concentration en particules sur la distribution des particules au sein de la section de passage pour des conduites horizontales de diamètres 36 et 48 mm (V1 et V2).

Figure 7 : Evolution des critères y*50 et y*10 en fonction de h^*_{50} et h^*_{10} pour les suspensions modèles A – Conduites horizontales (V1, Dc= 36 mm et V2, Dc=48 mm)

Figure 7 : Evolution of criteria y*50 and y*10 as a function of h*50 and h*10 for the suspensions A – Horizontal ducts (V1, Dc=36 m and V2, Dc=48 mm)



L'évolution de y^*_{10} et y^*_{50} en fonction des indices h^*_{10} et h^*_{50} est directement corrélée à la concentration en particules.

Une régression linéaire sur l'intervalle de concentrations 10 % - 28 % montre que l'augmentation de y^*_{50} et y^*_{10} est parallèle à l'augmentation de la hauteur théorique du lit h^*_{50} et h^*_{10} dans les viseurs horizontaux (V1 et V2). Cette relation est encore plus marquée dans le cas du viseur de diamètre 48 mm (V2). Dans le viseur vertical (V3), en revanche, X^*_{50} semble indépendant de la hauteur du lit, alors que X^*_{10} est faiblement corrélé à la hauteur du lit. Par ailleurs, la limite inférieure de la zone linéaire (C_p=10 %) correspond à la concentration minimale de formation d'un lit ($C_{p_{min}}$=12 % pour des conduites de diamètre 36 mm et 8,4 % pour des conduites de diamètre 48 mm). Pour des concentrations en particules supérieures à la concentration minimale de formation d'un lit ($C_p > C_{p_{min}}$), la répartition des particules dans les conduites horizontales est directement corrélée à la hauteur du lit que l'on obtiendrait si les particules étaient toutes décantées. En-dessous de cette limite, le mode d'écoulement est indépendant de la concentration en particules. Dans les conduites verticales, les particules circulent préférentiellement au centre de la conduite.

3.2.3 Corrélations entre y^*_{50} et y^*_{10} et les invariants de similitude

Connaissant les nombreux paramètres susceptibles d'influencer le comportement des suspensions, il serait fort utile, en

s'appuyant sur une analyse dimensionnelle, d'écrire une relation entre un critère quantitatif traduisant l'état de la suspension (à titre d'exemple y^*_{50}) et tous les paramètres régissant la séparation solide-liquide suivant leur rôle moteur ou frein à savoir une relation du type : $y^*_{50} = f(\Delta\rho, D_{ch}, d_p, Q, \mu, CC_p, ...)$. Malheureusement, l'ensemble des corrélations obtenues (Tableau 5) en nous appuyant sur les invariants de similitude retenus (Cp, Fr, Re, Ar) ne permet pas de tirer de conclusions claires de cette analyse. Nous noterons par ailleurs que des propriétés fondamentales telles que la géométrie, la forme ou encore les propriétés mécaniques des particules ne sont que rarement prises en considération dans ces invariants de similitude.

Tableau 5 : Corrélations semi-empiriques entre les critères y*50 et y*10 et les invariants de similitude (Ar, Cp, Fr, Re) établies pour les suspensions modèles (A) – NS : non significatif – Viseurs horizontaux (V1, Dc=36 mm et V2, Dc=48 mm) et verticaux (V3, Dc=48 mm).

Tableau 5 : Semi-empirical correlations between criteria y*50 and y*10 and the dimensionless numbers (Ar, Cp, Fr, Re) for model suspensions (A) – NS : non significant – horizontal ducts (V1, Dc=36 mm et V2, Dc=48 mm) and vertical ducts (V3, Dc=48 mm)

	Invariant	Corrélations semi-empiriques (R_)
$C_p > C_{p_{max}}$	C_p	V1 : $y^*_{50} = 0{,}53 \cdot h^*_{50} + 0{,}35$ (R_=0,41), $y^*_{10} = 0{,}47 \cdot h^*_{10} + 0{,}65$ (R_=0,55) V2 : $y^*_{50} = 0{,}94 \cdot h^*_{50} + 0{,}21$ (R_=0,67), $y^*_{10} = 0{,}89 \cdot h^*_{10} + 0{,}42$ (R_=0,71) V3 : NS
	Ar, Fr et Re	NS
$C_p < C_{p_{max}}$	Re	V1 : $y^*_{50} = 0{,}20 \cdot Re^{0{,}09}$ (R_=0,55), $y^*_{50} = 0{,}40 \cdot Re^{0{,}09}$ (R_=0,49) V2 et V3 : NS
	Fr	V1 : $y^*_{50} = 0{,}01 \cdot Fr + 0{,}30$ (R_=0,35), $y^*_{10} = 0{,}02 \cdot Fr + 0{,}51$ (R_=0,50) V2 : $y^*_{50} = 0{,}01 \cdot Fr + 0{,}17$ (R_=0,26), $y^*_{10} = 0{,}02 \cdot Fr + 0{,}37$ (R_=0,57) V3 : NS
	Ar et C_p	NS

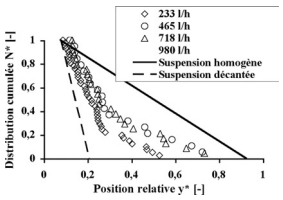
3.3 Ecoulement de la suspension réelle (B)

La figure 8 montre la visualisation de l'écoulement de la suspension réelle à une concentration donnée dans des conduites horizontales et verticales, de diamètre interne 48 mm (V2 et V3).

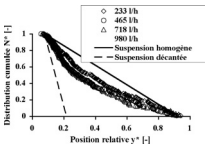
Figure 8 : Distributions cumulées de la concentration en particules (Cp = 18 %p/p) et illustration des écoulements - V2 et V3.

Figure 8 : Cumulative distributions of particles (Cp = 18 %w/w) and illustrations of flows in horizontal (V2) and vertical(V3) ducts.

Viseur 2 (Dc = 48 mm, horizontal)



Viseur 3 (Dc = 48 mm, vertical)



Fluide B - Cp : 18 % - Débit : 465 l/h

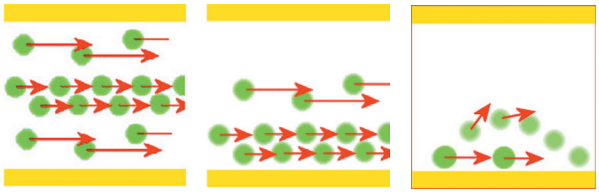
Fluide B - Cp : 18 % - Débit : 718 l/h

La nature des écoulements solide-liquide observés au cours de cette étude est décrite qualitativement, à partir de l'observation visuelle de ces photos. La littérature souligne un nombre important de classifications différentes pour décrire la nature des écoulements. Néanmoins, les travaux de Sastry & Zuritz (1988) ont servi de base pour présenter les résultats expérimentaux de cette étude car leurs conditions opératoires étaient très proches de celles rencontrées au cours de ces travaux. En appliquant leur classification, trois types d'écoulement ont pu être identifiés, selon la distribution de la concentration en particules dans la hauteur du tube. Ces modes d'écoulement sont illustrés sur la figure 9 et peuvent se définir de la manière suivante :

- intermédiaire ou quasi-homogène : les particules se déplacent essentiellement dans le centre du tube,
- hétérogène : les particules les plus lourdes sont dans la partie inférieure du tube,
- lit mouvant avec sauts : les particules sautent les unes au-dessus des autres.

Figure 9 : Principaux modes d'écoulement de la suspension réelle B (Sastry et Zuritz, 1988).

Figure 9 : Flow patterns for the real suspension B (Sastry et Zuritz, 1988)



La concentration en particules étant choisie comme variable expérimentale, il est utile de déterminer les concentrations maximales admissibles en particules $C_{p_{max}}$ théorique (obtenue en statique en mesurant la porosité e) et expérimentale (obtenue en écoulement), autorisées dans des conduites de diamètres 36 et 48 mm.

Il s'avère que la concentration expérimentale, quel que soit le diamètre des conduites, est estimée à 22 %p/p au lieu de 50 % p/p (valeur théorique) en raison de la géométrie des conduites (Figure 10). Au-delà de cette concentration, des agglomérats peuvent se former obstruant les conduites de l'installation, de même qu'une forte dégradation mécanique des particules est observée. Il est intéressant de constater une différence significative entre la concentration $C_{p_{max}}$ admissible en théorie et celle possible expérimentalement, contrairement aux suspensions modèles A.

Ce résultat pourrait s'expliquer par les propriétés mécaniques des particules. Les particules B peuvent en effet se déformer uniquement à 45 % de leur état initial. Au-delà de cette déformation, elles se dégradent. Pour conserver leur intégrité, il est donc recommandé de ne pas dépasser ce taux de compression. Les particules A étant facilement déformables et de façon réversible constituent le cas idéal. Les concentrations maximales $C_{p_{max}}$ admissibles en particules en théorie et expérimentalement sont très voisines.

Le problème essentiel ici posé pour la suspension réelle est qu'il ne faut aucun obstacle (coude, rétrécissement) dans l'installation si l'on veut pouvoir travailler à une concentration en particules la plus proche possible de la concentration maximale admissible en théorie. Ceci n'est évidemment pas envisageable car cela supposerait une longueur droite de conduites très importante. A défaut, de faibles concentrations sont souhaitées si l'on ne veut pas boucher d'emblée l'installation. Evidemment, dans ce cas, la suspension reste décantée et ce quel que soit le diamètre de la conduite.

3.3.1 Influence des différents facteurs expérimentaux

A partir de la représentation graphique de la distribution cumulée du nombre de particules en fonction de la hauteur normée de la conduite (Figure 8), les observations suivantes peuvent être faites :

- la décantation est sensiblement identique dans les conduites horizontales de diamètres 36 et 48 mm.
- malgré une augmentation de la concentration en particules, la suspension reste décantée quels que soient le diamètre de la conduite et le débit.
- aucune incidence nette du débit n'est observée, le régime d'écoulement restant laminaire (1<Reg<66).
- la suspension reste décantée quelle que soit l'orientation des conduites.

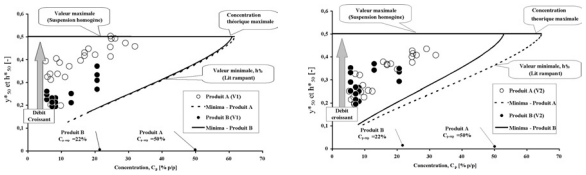
La distribution cumulée montre également qu'il existe deux lots de particules (V2), qui présentent un comportement particulier. Un premier lot de particules qui se trouve au-delà de la droite obtenue dans le cas d'une homogénéité parfaite et un deuxième lot de particules qui présente une "cassure" récurrente dans les profils d'écoulement autour de 60 % de la population (N^*=0,4). Cette observation peut s'expliquer par l'écart de masse volumique entre le fluide porteur et les particules qui s'élève à 1,5 %. En effet, ce dernier, même le plus faible qui soit, est suffisant pour induire une suspension hétérogène caractérisée par des phénomènes de décantation ou de flottaison (Ohashi, 1980). Par ailleurs, la masse volumique des particules B est fortement dispersée (±64 kg.m^{-3}) car il s'agit de particules réelles donc, non uniformes engendrant des propriétés physiques variant d'une particule à l'autre (Tableau 2). Notons que 62 % des particules B ont une masse volumique supérieure à celle du fluide porteur (1101 kg.m^{-3}). Ceci explique pourquoi la plupart des particules sédimente au fond du tube et que seules les particules dont la masse volumique est inférieure à celle du fluide "flottent", soit 38 % de la population (premier lot de particules).

3.3.2 Analyse des critères y^*_{50}, x^*_{50} et y^*_{50}, X^*_{50}

Pour les viseurs horizontaux de diamètres 36 et 48 mm (V1 et V2), sur l'intervalle de concentrations en particules testées (2,9<Cp<20,7 %), y^*_{50} est compris entre 0,21 et 0,35 signifiant que 50 % des particules se répartissent entre 21 et 35 % de la section de passage quel que soit le diamètre interne de la conduite (Figure 10).

Figure 10 : Evolution de y*50 en fonction de la concentration en particules pour différents débits – Conduites horizontales (V1, Dc= 36 mm et V2, Dc=48 mm) – produits modèles (A) et réel (B)

Figure 10 : Evolution of y*50 as a function of particle concentration for different flow rates – Horizontal ducts (V1, Dc=36 m and V2, Dc=48 mm) – Model (A) and real (B) products



Autrement dit, l'écoulement n'est jamais homogène, aux faibles comme aux fortes concentrations et fortement décanté aux faibles concentrations. Pour le critère y*10, les mêmes constations sont remarquées. 90 % des particules sont réparties entre 58 et 81 % de la hauteur ; ceci prouve l'hétérogénéité de la suspension sur toute la section de passage.

Pour le viseur vertical (V3), aucune influence de la concentration en particules n'est constatée sur les valeurs de x^*_{50} et x^*_{10} qui restent proches de 0,33 et 0,71. Ces chiffres montrent que dans les conduites verticales pour de faibles concentrations en particules (Cp<20 % p/p), ces dernières s'isolent d'un seul côté de la conduite.

4. Conclusion

L'objectif de ce travail était d'étudier le profil de concentration en particules dans des conduites cylindriques, afin de pouvoir caractériser l'homogénéité d'une suspension dans une section. Dans cette étude, une méthode optique, simple et rapide, a permis d'obtenir une information sur la distribution cumulée en particules définissant des critères quantitatifs pour caractériser l'état des suspensions aussi bien modèles (A) que réelle (B). L'analyse de la littérature montre qu'il n'existe quasiment aucune étude portant sur la description du profil de concentration en particules en fonction de la hauteur dans la section de passage. Ce point semble cependant extrêmement important pour quantifier l'homogénéité et / ou l'hétérogénéité d'une suspension. Le profil de concentration fournit alors une information complémentaire de la description qualitative d'une suspension, de la distribution des temps de séjour, des vitesses relatives fluide - particule, des vitesses limites de chute, des vitesses minimales d'entraînement et des courbes de frottement.

Les résultats expérimentaux et leurs analyses ont permis de déterminer l'influence des facteurs suivants : débit de circulation de la suspension, concentration en particules, comportement rhéologique du fluide porteur, diamètre de la conduite et orientation du tube. Une discussion de ces résultats et leur analyse en fonction des invariants de similitude ont ainsi été effectuées. En parallèle, une description théorique d'un lit de particules entièrement décantées a été présentée. Cette approche permet de définir une hauteur théorique de lit en fonction de la concentration en particules et de définir une concentration minimale de formation d'un lit ($c_{p_{min}}$). Nous avons montré que l'orientation de la conduite (horizontale / verticale) reste un critère fondamental pour des écoulements de suspensions. En conduite verticale, les suspensions modèles sont parfaitement homogènes, quel que soit le fluide porteur, le débit de circulation pour des concentrations en particules élevées (Cp>10 %), contrairement au produit réel qui lui, reste très décanté. En revanche, pour des conduites horizontales, l'analyse devient beaucoup plus délicate.

Une grandeur apparaît déterminante pour caractériser les écoulements : la concentration minimale $c_{p_{min}}$. En effet, le comportement des suspensions semble très différent selon que la concentration en particules est supérieure ou inférieure à $c_{p_{min}}$. Dans le cas des faibles concentrations, les interactions entre particules semblent être négligeables. Par opposition, pour des concentrations supérieures à $c_{p_{min}}$, les termes y^*_{50} et y^*_{10} sont parfaitement corrélés avec les termes h^*_{50} et h^*_{10}, c'est-à-dire à la concentration en particules. Cette dernière a montré son influence sur la distribution des particules au sein de la section de passage. Nous avons en effet observé (même si la tendance n'est pas très évidente dans le cas du produit réel) que lorsque la concentration en particules augmente, la suspension devient homogène.

L'approche expérimentale sur produit réel démontre que le comportement d'une suspension réelle est caractérisé par les distributions au niveau de la forme, de la masse volumique et

des propriétés mécaniques des particules et peut être très différent du comportement d'une suspension modèle caractérisée par l'homogénéité de ces mêmes propriétés. A ce stade, les produits réels nécessitent une expérimentation spécifique et une caractérisation complète. En effet, le problème essentiel, ici posé, avec ce type de produit, est l'écart significatif de masse volumique entre le fluide porteur et les particules imposé par la formulation de la sauce et induisant inévitablement une séparation de phase. Connaissant les inconvénients que peut susciter une suspension hétérogène sur la qualité du traitement thermique, il est indispensable de trouver des solutions. La littérature mentionne les différents facteurs régissant la séparation des phases solide - liquide comme la viscosité du fluide porteur, la taille des particules ou la concentration en particules sur lesquels il est possible d'agir pour améliorer l'état de la suspension. La solution la plus intéressante à envisager en premier lieu est la concentration en particules. La sédimentation est en effet limitée et la vitesse de décantation freinée par la présence d'interactions particule/particule et particule/paroi. Toutefois, pour pouvoir travailler à des concentrations élevées en particules, ces dernières doivent présenter des propriétés mécaniques favorables à la déformation et une résistance mécanique suffisante. La différence de masse volumique ne constitue plus alors un frein à l'homogénéité de la suspension en raison d'une augmentation possible de la concentration en particules. Dans le cas de la suspension réelle, les particules restent fermes et cassantes lorsqu'elles sont soumises à des contraintes mécaniques. Dans ces conditions, l'augmentation de la concentration en particules n'est plus une solution envisageable. Le débit de circulation et le comportement rhéologique (viscosité, indices de consistance et de structure) restent d'éventuelles issues pour générer une répartition uniforme des particules sur toute la section de passage.

Remerciements

Les auteurs remercient la société EDF pour le soutien financier des présents travaux ainsi que D. Bocquet (Bonduelle SA) pour son intérêt, sa confiance et sa contribution tout au long de cette étude.

Nomenclature

• Lettres latines

A, T	Surface, [m²]
Ar	Nombre d'Archimède, [-]
C	Fraction massique, [kg/kg ou %p/p]
D, d	Diamètre, [m]
e	Epaisseur, [m]
Fr	Nombre de Froude, [-]
g	Gravité, [m/s-2]
h	Hauteur du lit de particules décantées, [m]
k	Indice de consistance, [Pa.sn]
L	Longueur, [m]
l	Largeur, [m]
n	Indice de structure, [-]
N	Numéro associé à la particule, [-]
N^*	Distribution cumulée, [-]
N_0	Nombre total de particules, [-]
Q	Débit, [l.h^{-1}]
r	Rayon, [m]
R_e	Nombre de Reynolds, [-]
Re_g	Nombre de Reynolds généralisé, [-]
v	Vitesse, [m/s]
V	Volume, [m3]
x^*, y^*	Position relative, [-]
x, y	Position absolue du centre des particules, [-]

• Lettres grecques

α	Simplex de densité, [-]
ε	Porosité, [-]
μ	Viscosité, [Pa.s]
ρ	Masse volumique, [kg/m3]
z	Facteur géométrique (=8), [-]
$\Phi(n)$	Facteur géométrique et rhéologique =(3n+1)/(4n), [-]
Φ_v	Fraction volumique en particules, [v/v]

• Indice

10	A 90 % de la population
50	A 50 % de la population
c	Conduite
$Déc$	Décanté
f	Fluide
hom	Homogène
lit	lit
max	Maximal
min	Minimal
p	Particule
sp	Diamètre équivalent à une sphère
app	Apparente

Références

Abdelrahim K.A., Ramaswamy H.S., Marcotte M., & Toupin C. (1993) Residence time distribution of carrot cubes in starch solutions in a pilot scale aseptic processing system. *Food Research International*, **26**, 431-442

Chandarana D.I. (1992) Acceptance procedures for aseptically processed particulate foods. *Advances in Aseptic Processing Technologies*, R.K. Singh and P.E. Nelson Eds; Publisher: Elsevier Applied Science, London

Fagla B. (2002) Etudes thermomécaniques expérimentales de suspensions "solide-liquide" newtoniennes et non newtoniennes en écoulement dans une conduite horizontale. *Doctorat*, Institut National Polytechnique de Lorraine

Grabowski S., & Ramaswamy H.S. (1995) Characterization of single particle tube-flow behaviour at elevated temperatures. *J. Food Process Eng.*, **18**, 343-361

Lareo C., Fryer P.J., & Barigou M. (1997) The fluid mechanics of two-phase solid-liquid food flows: a review. *TransIChemE*, **75,** 73-105

Ohashi H., Sugawara R., Kikuchi K.I., & Ise M. (1980) Average particle velocity in solid-liquid two phase flow through vertical and horizontal tubes. *J. Chem. Eng. Jpn.*, **13** (5) 343-349

Okuda K. (1981) Trajectory and diffusion of particles in liquid-

solid flow of slurry pipeline. *Journal of pipeline*, **1**, 211-223

Ramaswamy H.S., Pannu K., Simpson B.K., & Smith J.P. (1992) An apparatus for particle-to-fluid relative velocity measurement in tube flow at various temperatures under nonpressurized flow conditions. *Food Research International*, 25, 277-284

Sancho M.F., & Rao M.A. (1992) Residence time distribution in a holding tube. *J. Food Eng.*, **15**, 1-19

Sastry S.K., & Zuritz C.A. (1987) A review of particle behaviour in tube flow: applications to aseptic processing. *J. Food Process Eng.*, **10**, 27-52

Sastry S.K., & Zuritz C.A. (1988). A review of particle behaviour in tube flow : applications for aseptic processing. *J. Food Process Eng.*, **10**, 27-52

Sastry S.K. (1993) Momentum and heat transfer in particulate sterilization. I*n Proceedings of Third Conference on Food Engineering*, Chicago-IL, USA

Singh R.K., & Lee J.H. Residence time distribution of foods with/without particulates in aseptic processing systems. *In Advances in Aseptic Processing Technologies*, (1992) Elsevier Appl. Sci., Plubl., London

Yang B.B., & Swartzel K.R. (1991) Photo-sensor methodology for determining residence time distribution of particles in continuous flow in thermal processing systems. *Journal of Food Science*, **56**, 1076-1081