



**HAL**  
open science

## **Ecoulement des fluides agroalimentaires contenant de grosses particules : méthode d'analyse de la distribution cumulée en particules dans des conduites cylindriques.**

Luc Fillaudeau, Jean-Yves Lecompte, Alexandra Legrand, Jean Claude Leuliet

### ► To cite this version:

Luc Fillaudeau, Jean-Yves Lecompte, Alexandra Legrand, Jean Claude Leuliet. Ecoulement des fluides agroalimentaires contenant de grosses particules : méthode d'analyse de la distribution cumulée en particules dans des conduites cylindriques.. 9. Congrès SFGP (Société Française de Génie des Procédés), 2003, Gavy-Océanis, St Nazaire, France. hal-02334247

**HAL Id: hal-02334247**

**<https://hal.science/hal-02334247>**

Submitted on 4 Jun 2020

**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.

# **ÉCOULEMENT DES FLUIDES AGROALIMENTAIRES CONTENANT DE GROSSES PARTICULES : METHODE D'ANALYSE DE LA DISTRIBUTION CUMULEE EN PARTICULES DANS DES CONDUITES CYLINDRIQUES.**

Fillaudeau L., Lecompte J.Y., Legrand A., Leuliet J.C.

*INRA- LGPTA 369, Rue Jules Guesde – BP39 - F-59651 VILLENEUVE D'ASCQ cedex  
Tel.: +(33).3.20.43.54.36 – Fax.: +(33).3.20.43.54.26 – E-mail: [Luc.Fillaudeau@lille.inra.fr](mailto:Luc.Fillaudeau@lille.inra.fr)*

**Résumé.** L'objectif de ce travail est d'étudier le profil de concentration en particules dans des conduites cylindriques, afin de pouvoir caractériser l'homogénéité de cette suspension. Le profil de concentration en particules fournit alors une information complémentaire de la distribution des temps de séjour, des vitesses relatives fluide / particule et des courbes de frottement. Nous étudions expérimentalement la distribution cumulée de la concentration en fonction du débit de circulation, de la concentration en particules, du comportement rhéologique du fluide, et du diamètre de la conduite tout en nous appuyant sur une analyse géométrique de l'écoulement d'une suspension.

## **INTRODUCTION**

Dans les industries agroalimentaires, le traitement thermo-mécanique de produits complexes est désormais très répandu. En revanche, le passage d'un procédé batch à un procédé continu pour le traitement thermique et / ou mécanique de fluides chargés en grosses particules reste une opération délicate pour laquelle peu de connaissances sont disponibles car la présence de particules dans un fluide engendre des modifications d'écoulement (perte de charge, distribution des temps de séjour, transfert de chaleur) de l'aliment [1, 2].

Le traitement thermique en continu offre des avantages : moindre détérioration des particules, durée de procédé diminuée, capacité de production accrue, meilleure homogénéité du traitement thermique, réduction de la consommation énergétique et encombrement surfacique plus faible. Bien que ces technologies soient appliquées avec succès sur des fluides homogènes monophasiques, leur application aux produits alimentaires polyphasiques (fluide+particules) est sévèrement limitée par le manque de connaissances (compréhension et modélisation) des principes physiques qui régissent le comportement de tels produits dans les équipements industriels. Même en l'absence de transfert thermique, la conception et le dimensionnement de tels équipements reste empirique [3]. De plus, le comportement rhéologique complexe des fluides porteurs de particules rencontrés en agroalimentaire implique un écoulement qui n'est ni uniforme ni prévisible. Le procédé peut alors être sujet à une distribution de la concentration, des vitesses d'écoulement et des températures [4, 5].

Dans cette étude, nous avons étudié expérimentalement le profil de concentration en particules au sein d'une section cylindrique. Notre plan d'expériences nous a permis d'étudier l'influence du débit de circulation, de la concentration en particules, du comportement rhéologique du fluide, et du diamètre de la conduite. La distribution cumulée de la concentration en particules a été analysée en fonction de plusieurs variables sans dimension.

## **MATERIELS & METHODES**

### **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. Elle 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. Les conduites sont des tubes cylindriques en acier inoxydable de section circulaire lisse, de diamètre extérieur 1"1/2 (36mm intérieur) et 2" (48mm intérieur). Le produit s'écoule dans une conduite 1"1/2 de 7,50 m (L1), équipée à son extrémité d'un viseur transparent en verre de même section (V1), disposé horizontalement. La suspension circule ensuite dans des conduites 2" de 5m (L2) et 1,5m (L3) de longueurs équipées à leur extrémité de deux viseurs transparents en plexiglass de même section, l'un horizontal (V2) et l'autre vertical (V3).

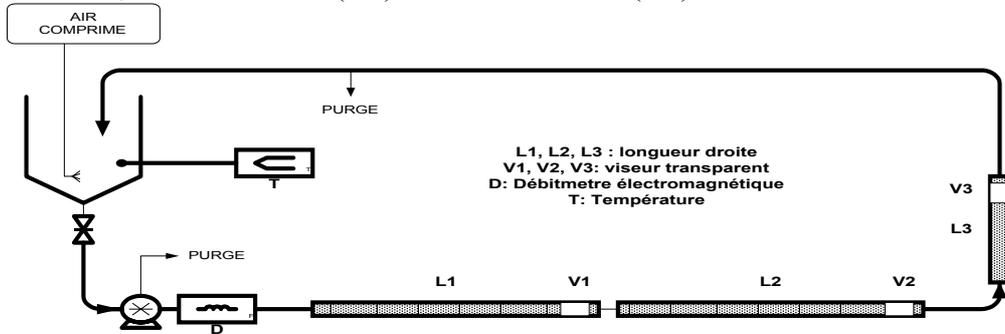


Figure 1 : Schéma de l'installation.

La température du mélange est mesurée par un thermomètre numérique PR510 (PROLABO) avec une précision de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . Le débit du mélange fluide-particules est mesuré par un débitmètre électromagnétique à induction Altoflux DN10 (ALATOMETER, précision 1%). La concentration en particules est obtenue par pesée. Nous tamisons ensuite les particules à l'aide d'un tamis, et nous les essorons avant de les peser. Nous déterminons ainsi une concentration massique que nous corrigeons à l'aide des masses volumiques du fluide et des particules afin d'obtenir une concentration volumique  $C_p$ .

## 2. Etude du profil de concentration en particules

L'étude du mode d'écoulement 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, nous prenons des photos de l'écoulement comme le montre la Figure 2. La prise de vue est réalisée grâce à un appareil numérique (Camedia C2020 Z, 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 son centre corresponde au centre du viseur.

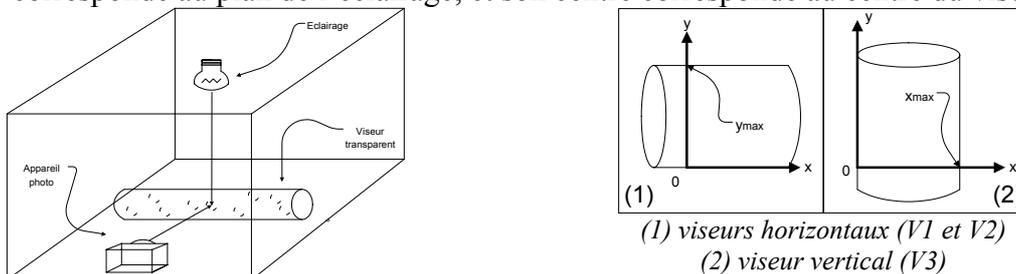


Figure 2 : Emplacements de l'éclairage et de la prise de vue – Orientation des axes  $x$  et  $y$ .

Le traitement des images s'effectue sous Photoshop 6.0 (Adobe). Les images sont analysées à l'aide du logiciel Optimas 6.5 (MEDIA CYBERNETICS, Silver Spring, USA). Une macro permet de calculer : les dimensions de l'image  $x_{max}$  et  $y_{max}$ , le nombre de particules de l'image, 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'image analysée étaient supérieur ou égal à 3 et le nombre de particules identifiées supérieures à 40.

### 3. Mélange solide – liquide étudié et plan d'expérience

#### 3.1. Fluides porteurs

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 IAA.

Les fluides porteurs retenus étaient les suivants : l'eau, une solution à 0,75%w/w de carboxyméthylcellulose (CMC, Prolabo), et une solution à 1,8%w/w de CMC. Les caractéristiques physiques des fluides porteurs, présentées dans le *Tableau 1*, ont été mesurées expérimentalement ou relevées dans la littérature pour l'eau (Robert C. Weast, 1976-1977).

*Tableau 1 : Propriétés physiques à 20°C des fluides porteurs utilisés.*

		Eau	CMC 0,75%	CMC 1,8%
Masse volumique	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	1000	1002,5	1005
Viscosité	$\eta$ (Pa.s)	0,001	-	-
Indice de consistance	$k$ (Pa.s <sup>-n</sup> )	-	0,0311	0,2624
Indice de structure	$n$ (/)	-	0,9319	0,8098

#### 3.2. Particules

Les particules modèles doivent répondre à plusieurs critères : une forme représentative des particules rencontrées en IAA (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. Notre choix s'est porté sur des billes d'alginate ( $\varnothing=9,0\text{mm}\pm 0,1$ ,  $\rho=1043\text{kg.m}^{-3}\pm 8$ ) de forme sphérique.

#### 3.3. Plan d'expérience

Durant cette étude la température du mélange était de 20°C±2 et le débit volumique compris entre 300 et 3000l/h (6 valeurs par fluide) pour une concentration en particules variant de 5 à 40% (4 valeurs par fluide). Nous indiquons dans le *Tableau 2*, les plages couvertes par les nombres sans dimension dans ce travail.

*Tableau 2 : Plage de variation des nombres sans dimension considérés dans l'étude*

$Re_g$	$Ar$	$Fr$	$\alpha$	$d_p/D_c$
$Re_g = \frac{\rho \cdot v^{2-n} \cdot D_c^n}{k \cdot \Phi^n \cdot \zeta^{n-1}}$	$Ar = \frac{g \cdot d_p^3 \cdot \alpha}{\left(\frac{\mu_{app}}{\rho_f}\right)^2}$	$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot d_p \cdot \alpha}}$	$\alpha = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}$	
20 à 30 000	8 à 300 000	0,7 à 14	0,38 à 0,43	0,18 à 0,25

## RESULTATS & DISCUSSIONS

### 1. Analyse théorique : description d'un lit de particules dans une conduite cylindrique

Nous considérons une suspension (fluide/particules) s'écoulant dans une conduite cylindrique circulaire. Nous supposons que les particules sont totalement décantées et forment un lit

homogène en écoulement. Nous déterminons des expressions mathématiques de la hauteur du lit, la concentration maximale admissible dans la conduite, et de la concentration minimale pour former un lit homogène dans la conduite. Nous prenons une conduite de longueur  $dx$  représentée dans la *Figure 3*. Ce lit de particules est caractérisé par une porosité  $\varepsilon$ , correspondant à la fraction liquide du lit ( $V_f$ ) rapportée au volume de ce lit :

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V_f + V_p} = \frac{V_f}{V_{lit}} \quad (1)$$

La porosité minimale de ce lit en écoulement ne pourra pas être inférieure à la porosité du lit déterminée en statique dans des conduites de 1"1/2 et 2".

Nous exprimons : le volume de la conduite :  $V_c = \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot dx = \pi \cdot r^2 \cdot dx \quad (2)$

le volume du lit de particules :  $V_{lit} = \frac{V_p}{1 - \varepsilon}, V_p = C_p \cdot V_c \quad (3 \text{ et } 4)$

Le volume du lit de particules peut aussi s'exprimer à partir des variables géométriques dont  $h$  la hauteur du lit de particules si celles-ci étaient entièrement décantées. Nous pouvons désormais construire l'évolution de  $C_p$  en fonction de  $h$ , et inversement, obtenir la hauteur minimale du lit de particules en fonction de la concentration en particules.

$$C_p = \frac{(1 - \varepsilon)}{\pi} \cdot \left[ \text{Arc cos} \left( \frac{r - h}{r} \right) - \left( \frac{r - h}{r^2} \right) \cdot \sqrt{r^2 - (r - h)^2} \right] \quad (5)$$

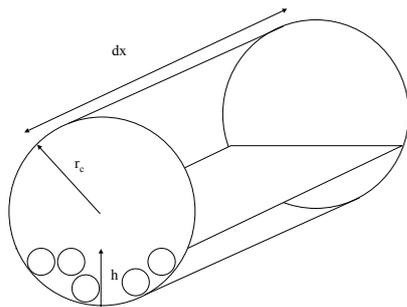


Figure 3 : Schéma d'un lit homogène de particules décantées dans une conduite.

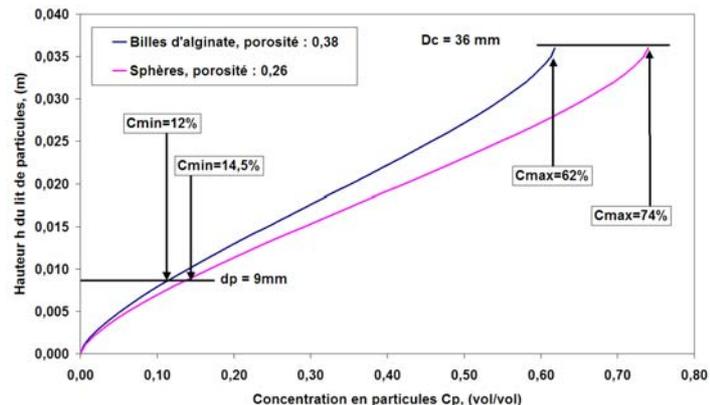


Figure 4 : Hauteur du lit de particules en fonction de la concentration pour des billes d'alginate et des sphères (empilement hexagonal compact) : conduite 1"1/2.

• **Mesure de la porosité et détermination de la hauteur du lit de particules :**

Dans le cas de sphères idéales, empilées de la manière la plus compacte (empilement hexagonal compact noté HC), la porosité est de  $\varepsilon=0,26$ . Cependant, le lit de particules ne suit pas cet empilement. Nous déterminons expérimentalement que les porosités en statique du lit de billes d'alginate sont respectivement de 0,38 et 0,35 dans les conduites 1"1/2 et 2". Nous observons tout d'abord que la porosité mesurée expérimentalement est supérieure à la porosité d'un empilement de compacité maximale de sphères parfaites. Cette différence peut s'expliquer de plusieurs manières : les particules ne sont pas des sphères parfaites et l'empilement des particules ne correspond pas à un empilement le plus compact possible. Par ailleurs, la porosité est plus importante dans la conduite de petit diamètre (1"1/2) que dans la conduite de grand diamètre (2"). Ce phénomène semble logique dans la mesure où un diamètre relatif  $dp/D_c$  des particules plus petit permettra à celles-ci de se répartir de manière plus régulière. Il convient cependant de rappeler que les mesures ont été réalisées sur un empilement de particules statiques. Dans le cas d'un lit de particules en mouvement dans une

conduite, la porosité est obligatoirement supérieure. Nous présentons dans la *Figure 4*, l'évolution de la hauteur du lit de particules en fonction de la concentration pour des billes d'alginate et des sphères en empilement hexagonal compact.

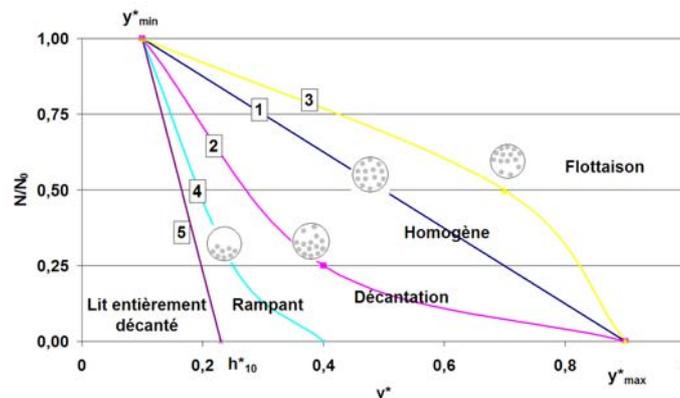
- **Concentrations maximale ( $C_{pmax}$ ) et minimale ( $C_{pmin}$ ) de formation d'un lit**

La concentration maximale correspond à une hauteur de lit égale au diamètre de la conduite considérée, il s'agit de la concentration pour laquelle :  $C_{max}=1-\varepsilon$ , soit respectivement 62 et 65% pour les conduites 1"1/2 et 2". 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 ; du fait de la présence de nombreux coudes, nous constatons généralement des phénomènes de bouchage de l'installation dès que les concentrations en billes d'alginate excèdent 50%.

Nous pouvons également déterminer la concentration minimale nécessaire à l'obtention d'un lit uniforme, en supposant une décantation totale. Sachant que les particules mesurent environ 9 mm de diamètre, nous obtenons donc un lit d'une hauteur de 9 mm. En utilisant les relations établies précédemment, nous déterminons ainsi les concentrations minimales de 12% pour la conduite 1"1/2 et de 8,4% pour la conduite 2". Si les particules sont entièrement décantées, en dessous de cette concentration, elles ne pourront jamais former un lit uniforme. Cette concentration minimale augmente lorsque le diamètre de la conduite diminue, du fait de la diminution de la porosité. Dans une conduite de diamètre plus important, les particules formeront un lit continu à de plus faibles concentrations que dans une conduite de diamètre inférieur, ce qui modifie les interactions entre particules, et donc le mode d'écoulement.

## 2. Distribution cumulée de la concentration en particules

Les positions relatives des particules ( $y^*$  et  $x^*$ ) sont classées par ordre décroissant, et associées à un numéro d'ordre  $N^*=N/N_0$ . Les particules correspondant aux  $N$  les plus faibles seront donc situées en haut des viseurs horizontaux, et à gauche pour le viseur vertical. Nous déterminons ainsi une fonction de distribution cumulée de la concentration en particules en fonction de la hauteur dans la conduite ( $N^*(y^*)=1-F(y^*)$ ).

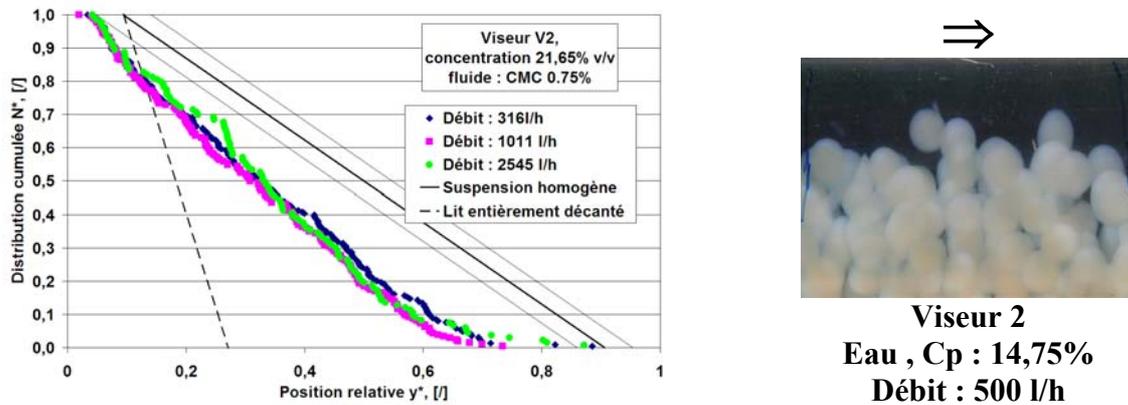


*Figure 5 : Schéma explicatif des graphes obtenus à partir des données brutes*

Dans un premier temps, construisons pour un viseur, un fluide porteur, une concentration en particules et un débit, la courbe  $N^*$  en fonction de  $y^*$  ou  $x^*$ . Plus les particules seront réparties de manière homogène dans la section du tube, plus cette courbe s'approchera d'une droite (*Figure 5*, courbe 1). Si les particules ont tendance à s'accumuler dans le fond du tube ( $y^*$  faible), la courbe présentera une allure concave, une tendance à s'affaisser (courbe 2). Si au contraire elles ont tendance à flotter (courbe 3), la courbe présentera une allure convexe (ce cas ne s'est jamais présenté). Dans le cas d'un écoulement rampart, toutes les particules se trouvent sous un certain seuil (courbe 4).

Nous pouvons ainsi représenter sur nos graphiques, la droite obtenue pour une distribution parfaitement homogène. De même, nous pouvons placer sur ce graphique la hauteur du lit de particule que l'on obtiendrait si nous avions une décantation totale pour la concentration en particules et le diamètre de conduite considérés, et tracer la courbe ainsi obtenue.

Nous effectuons ces opérations pour toutes nos données expérimentales : concentrations et débits différents pour chacun des fluides porteurs et des viseurs. Un exemple des résultats obtenus est représenté dans la *Figure 6*.



*Figure 6 : Distribution cumulée de la concentration en particules (CMC 0,75%) et illustration des écoulements (Eau) dans le viseur 2 (horizontal).*

A partir de notre plan d'expériences, nous pouvons faire les observations suivantes :

- Lorsque la concentration augmente, l'écoulement se rapproche d'un écoulement homogène, et ce quel que soient les débits et les fluides porteurs. Lorsque la concentration 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 augmente, l'influence du débit sur l'homogénéité de l'écoulement semble diminuer.
- Moins le fluide porteur est visqueux, plus l'écoulement est homogène, à concentration constante. 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 aux plus faibles concentrations en particules.

### 3. Analyses des critères $y^*_{50}$ , $x^*_{50}$ et $y^*_{10}$ , $x^*_{10}$

Pour chaque condition expérimentale, connaissant la concentration et la porosité des lits de particules statiques, nous pouvons définir les deux indices suivants :  $h^*_{10}$  : la hauteur théorique du lit de particules s'il était entièrement décanté,  $h^*_{50}$  : la mi-hauteur du lit.

Ces deux paramètres sont corrigés par le diamètre des particules, afin de pouvoir être comparés plus facilement à  $y^*_{10}$  et  $y^*_{50}$  correspondant aux mesures expérimentales. Nous représentons l'évolution de  $y^*_{10}$  et  $y^*_{50}$  en fonction des indices  $h^*_{10}$  et  $h^*_{50}$  (*Figure 7*) directement corrélés à la concentration en particule.

Sur le viseur vertical, nous ne constatons pas d'influence de la concentration 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. Nous observons donc dans les conduites verticales un écoulement

préférentiellement au centre du tube, occupant 70% de la largeur aux faibles concentrations, et dont l'homogénéité augmente légèrement avec la concentration.

Sur le Viseur 1, quel que soit le débit, l'allure des courbes est sensiblement la même : nous constatons une augmentation de  $y^*_{50}$  et  $y^*_{10}$  avec l'augmentation de la concentration. Cette augmentation est relativement linéaire sur l'intervalle de concentrations 10%-38%. Sur cet intervalle,  $y^*_{50}$  est compris entre 0,32 et 0,52, et  $y^*_{10}$  entre 0,65 et 0,90. Nous avons donc un écoulement légèrement décanté pour des concentrations inférieures à 30%, et quasi-homogène pour des concentrations supérieures. Sur le Viseur 2, les observations sont similaires : nous constatons une augmentation de  $y^*_{50}$  et  $y^*_{10}$  en fonction de la concentration, devenant relativement linéaire sur l'intervalle de concentrations 10%-38%. 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.

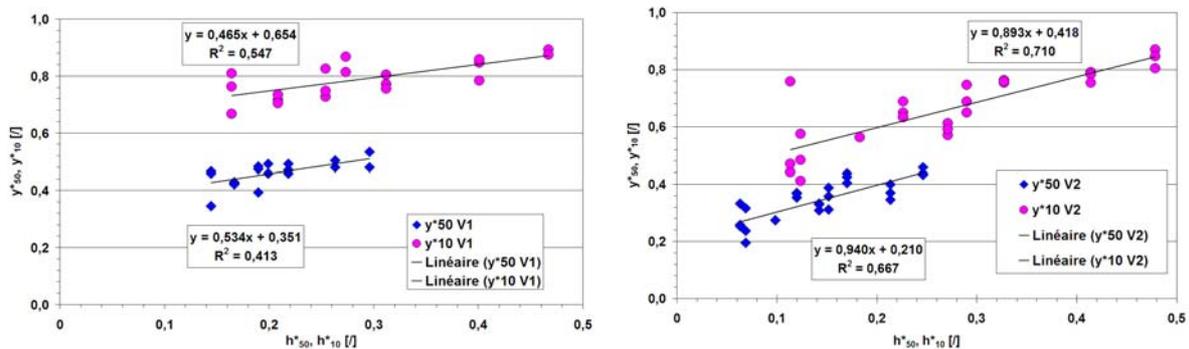


Figure 7 :  $y^*_{50}$  et  $y^*_{10}$  en fonction de  $h^*_{50}$  et  $h^*_{10}$  - Viseurs 1 et 2.

Si nous effectuons une régression linéaire sur l'intervalle de concentrations 10% - 38%, nous constatons nettement que l'augmentation de  $y^*_{50}$  et  $y^*_{10}$  est parallèle à l'augmentation de la hauteur théorique du lit  $h^*_{50}$  et  $h^*_{10}$ . Par ailleurs, la limite inférieure de la zone linéaire ( $C_p=10\%$ ) correspond à la concentration minimale de formation d'un lit ( $C_{pmin}=12\%$  pour des conduites de 1"1/2 et 8,4% pour des conduites de 2"). Nous pouvons donc envisager l'hypothèse que pour des concentrations supérieures à la concentration minimale de formation d'un lit, dans des conduites horizontales, la hauteur d'expansion de la suspension est étroitement corrélée avec la hauteur de formation d'un lit, ce que corrobore la Figure 7. Les relations empiriques déterminées pour des concentrations en particules supérieures à  $C_{min}$  sont données dans le Tableau 3 :

Tableau 2 : Corrélation empirique entre  $y^*_{50}$ ,  $y^*_{10}$  et  $h^*_{50}$ ,  $h^*_{10}$

Conduite	Relations empiriques ( $R^2$ )
1"1/2 horizontale	$y^*_{50} = 0,5342 \cdot h^*_{50} + 0,3509$ (0,41) / $y^*_{10} = 0,4651 \cdot h^*_{10} + 0,6542$ (0,55)
2" horizontale	$y^*_{50} = 0,9397 \cdot h^*_{50} + 0,2098$ (0,67) / $y^*_{10} = 0,8934 \cdot h^*_{10} + 0,4176$ (0,71)
2" verticale	$x^*_{10}$ ( $\cong 0,90$ ) et $x^*_{50}$ ( $\cong 0,50$ ) sont indépendants de $h^*_{50}$ et $h^*_{10}$

Ces graphes mettent en évidence une relation linéaire entre la hauteur du lit de particules et le mode d'écoulement des particules, dans les viseurs horizontaux. Cette relation est encore plus marquée dans le cas du viseur 2. Dans le viseur 3, en revanche,  $x^*_{50}$  semble indépendant de la hauteur du lit, alors que  $x^*_{10}$  est faiblement corrélé à la hauteur du lit. Pour des concentrations en particules supérieures à la concentration minimale de formation d'un lit, 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.

## CONCLUSIONS

Le traitement de fluides contenant de grosses particules en continu se heurte à un manque de connaissance, rendant difficile la prédiction de l'allure et de la structure des écoulements. L'objectif de ce travail était d'étudier le profil de concentration en particules dans des conduites cylindriques, afin de pouvoir caractériser l'homogénéité de cette suspension dans une section. Le caractère hétérogène ou décanté d'une suspension aura une incidence à la fois sur l'écoulement de la suspension et sur le transfert de chaleur. Suivant le type de technologie de chauffage adopté (échangeur conventionnel, tube à passage de courant ou chauffage ohmique tubulaire), des problèmes spécifiques peuvent apparaître à cause de l'hétérogénéité du profil de concentration.

Une discussion de ces résultats et la définition de quelques nombres sans dimension a ainsi été effectuée. En parallèle, une description théorique d'un lit de particules entièrement décantées a été présentée. Cette approche nous 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 ( $C_{pmin}$ ). Nous montrons que l'orientation de la conduite (horizontale / verticale) reste un critère fondamental. En conduite verticale, les suspensions sont parfaitement homogènes, quelque soit le fluide porteur, le débit de circulation et la concentration. En revanche, pour des conduites horizontales, l'analyse devient beaucoup plus délicate. Une grandeur apparaît déterminante pour caractériser les écoulements : la concentration minimale  $C_{pmin}$ . En effet, le comportement des suspensions semble très différent selon que la concentration en particules est supérieure ou inférieure à  $C_{pmin}$ . Dans ce cas des faibles concentrations, les interactions entre particules semblent être négligeables. Par opposition, pour des concentrations supérieures à  $C_{pmin}$ , les termes  $y^*_{50}$  et  $y^*_{10}$  sont parfaitement corrélés avec les termes  $h^*_{50}$  et  $h^*_{10}$ , c'est-à-dire la concentration en particules.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Pinheiro Torres A., Oliviera F.A.R., *Residence time distribution studies in continuous thermal processing of liquid foods : a review*, Journal Food Eng., 36 (1998), 1-30.
- [2] Fairhurst P.G., Pain J.P., *Passage time distributions for high solid fraction solid-liquid food mixtures in horizontal flow : unimodal size particle distributions*, Journal Food Eng., 39 (1999), 345-357.
- [3] Lareo C., Fryer P.J., Barigou M., *The fluid mechanics of two-phase solid-liquid food flows: a review*, TranslChemE, 75 (1997), 73-105.
- [4] Fillaudeau L., *Traitement thermique de fluides contenant de grosses particules en échangeurs tubulaires à parois modifiés*, DEA Génie des Procédés Industriels, Université de Compiègne, (1994).
- [5] Eliot-Godereaux S., Fairhurst P.G., Goullieux A., Pain J.P., *Passage time distributions of cubes and spherical particles in an ohmic heating pilot plant*, Journal Food Eng., 47 (2001), 11-22.

## NOMENCLATURE

	<b>Lettres latines</b>		<b>Lettres grecques</b>
$Ar$	Nombre d'Archimède, [1]	$\alpha$	Simplex de densité, [1]
$C$	Concentration volumique, [% vol/vol]	$\epsilon$	Porosité, [1]
$D, d$	Diamètre, [m]	$\mu$	Viscosité, [Pa.s]
$Fr$	Nombre de Froud, [1]	$\rho$	Masse volumique, [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Gravité, [m/s <sup>-2</sup> ]	$\zeta$	Facteur géométrique (=8), [1]
$h$	Hauteur du lit de particules décantées, [m]	$\Phi(n)$	Facteur $= (3n+1)/(4n)$ , [1]
$k$	Indice de consistance, [Pa.s <sup>-n</sup> ]	<b>Indice</b>	
$n$	Indice de structure, [1]	$f$	Fluide
$r$	Rayon, [m]	$p$	Particule
$Re_g$	Nombre de Reynolds généralisé, [1]	$c$	Conduite
$v$	Vitesse, [m/s]		
$V$	Volume, [m <sup>3</sup> ]		
$x^*, y^*$	Position relative, [1]		