

# Etude expérimentale de l'écoulement d'une suspension dans un canal horizontal : Mise en place d'un critère énergétique.

Denis EDELIN<sup>1</sup>, Christophe JOSSET<sup>1</sup>, Cathy CASTELAIN<sup>1\*</sup>, Francine FAYOLLE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Thermocinétique de Nantes, LTN UMR CNRS 6607  
Polytech, La Chantrerie, rue Christian Pauc 44306 Nantes, cedex 03

<sup>2</sup>Laboratoire de Génie des Procédés, Environnement, Agroalimentaire, GEPEA UMR CNRS 6144  
ONIRIS, Site de la Géraudière, BP 82225, 44322 Nantes cedex 03

\* (auteur correspondant : [cathy.castelain@univ-nantes.fr](mailto:cathy.castelain@univ-nantes.fr))

**Résumé** - Les coulis de glace sont des fluides frigoporteurs diphasiques utilisés en refroidissement indirect et présentant de nombreux avantages. Ils ont une capacité de refroidissement supérieure aux frigoporteurs monophasiques par l'utilisation partielle du changement d'état eau/glace. Cependant, de nombreux verrous scientifiques subsistent, portant aussi bien sur leur génération que sur leur utilisation et limitant actuellement l'essor de cette technologie. A partir de la mesure des pertes de charges et de la quantification du débit de solide en écoulement, il a été possible de calculer un coefficient de performance énergétique.

## Nomenclature

$L_v$	chaleur latente de fusion, $J/kg$	$\Delta P$	pertes de charge, $Pa/m$
$m$	masse, $kg$		
$V$	volume, $m^3$		<i>Indices et exposants</i>
$\dot{m}$	débit massique, $kg/s$		
$\dot{V}$	débit volumique, $m^3/s$	$l$	liquide
$C$	concentration volumique en solide	$m$	mélange
$\alpha$	facteur de compacité	$s$	solide
$\rho$	masse volumique, $kg/m^3$	$tot$	total
$\varphi$	concentration délivrée		

## 1. Introduction

Les coulis de glace [1] sont des fluides frigoporteurs diphasiques utilisés en refroidissement indirect (agro-alimentaire, climatisation...) et présentant de nombreux avantages. La production de froid est confinée et les fuites de fluides frigorigènes sont réduites. Ils ont une capacité de refroidissement supérieure aux frigoporteurs monophasiques par l'utilisation partielle du changement d'état eau/glace ce qui permet de faire du stockage énergétique. Les technologies de génération sont aujourd'hui maîtrisées [2-3-4], seule la puissance limitée des générateurs est encore un frein dans ce domaine.

De nombreuses études ont été réalisées sur les écoulements de coulis de glace dans des tubes [5-6] et dans des géométries avec des changements de section abruptes [7-8]. A haut débit, l'hypothèse d'un milieu homogène peut être retenue pour modéliser l'écoulement. Pour cela certains auteurs ont analysé la rhéologie du coulis de glace [9]. Un certain nombre de travaux ont porté sur l'étude des transferts de chaleur dans les échangeurs de chaleur [10-11].

Au vu des résultats, l'utilisation des coulis de glace peut être énergétiquement profitable [12]. Cependant cette technologie ne semble pas se développer sur le territoire français. Ceci peut s'expliquer notamment par le manque de modèles réalistes et la grande dispersion des résultats concernant le comportement thermo hydraulique des coulis de glace en écoulement. En effet, la synthèse des études réalisées [13] met en avant une hétérogénéité de résultats, en

terme de pertes de charges et coefficient de transfert. Il en est de même pour une étude comparative des modèles rhéologiques [14], qui n'a pas permis de mettre en exergue un modèle parmi ceux proposés dans la littérature.

Au final cette dispersion des résultats ne permet pas un dimensionnement correct des installations. D'ailleurs, à la connaissance des auteurs, aucune méthode de dimensionnement hydraulique d'installation de coulis n'est disponible, contrairement aux réseaux d'eau glycolée par exemple. La régulation de tels systèmes a tout de même été abordée [15]. La notion de régime optimal d'un point de vue transfert ou minimisation des pertes de charge en fonction de la concentration en glace, du régime (laminaire ou turbulent), n'a été que faiblement étudié [12]. Il apparaît donc important d'analyser finement les différentes configurations d'écoulement et les transferts associés qui peuvent apparaître dans ces systèmes afin de compléter les études existantes.

Pour simplifier l'étude et découpler les phénomènes entrant en jeu, nous avons choisi d'étudier l'écoulement d'une suspension isotherme, dans laquelle les cristaux de glace ont été remplacés par des particules de polypropylène qui ont des caractéristiques physiques semblables à celles des cristaux de glace. L'idée de substituer les cristaux de glace par des particules modèles n'est pas récente [16-17-18], mais n'avait pas été réalisée avec des particules de petites dimensions ( $d < 2$  mm) plus représentative d'un coulis de glace. L'objectif de cette étude est de proposer un dispositif expérimental et une métrologie adéquate pour caractériser l'écoulement de particules dans un tube horizontal et de proposer un critère d'optimum énergétique en fonction du débit et de la concentration en particules.

## 2. Présentation du dispositif expérimental et des procédures associées

### 2.1. Présentation de la veine d'essais

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 1. Il est constitué d'une boucle fermée dans laquelle le mélange eau-particules circule à température ambiante. La boucle d'essais est constituée d'un tube transparent en PMMA (1), de 4 m de long (3 m pour l'établissement et 1 m pour la section d'étude) et 30 mm de diamètre, connecté, grâce à des tubes flexibles de même diamètre, à une pompe (5) et un débitmètre Coriolis (4). Un système d'injection de particules (3) permet de contrôler la quantité de particules solides ajoutées dans la boucle. Des capteurs de pression (2) sont mis en amont et aval de la section d'étude.

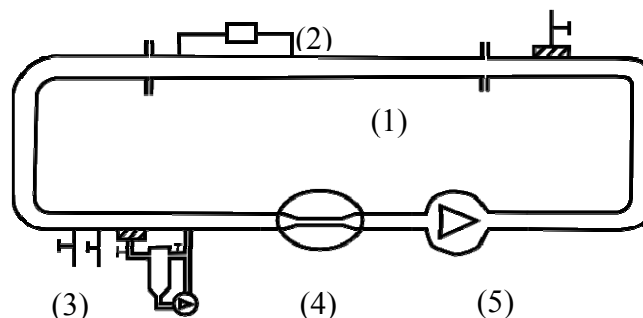


Figure 1: Schéma du dispositif expérimental (1. Tube en PMMA, 2. Capteurs de pression, 3. Système d'injection en particules, 4. Débitmètre Coriolis, 5. Pompe centrifuge)

### 2.2. Description du fluide modèle

Les particules utilisées ont été obtenues à partir de granulés de polypropylène, utilisés dans les procédés de rotomoulage (Compagnie *Icopolymer*). Les particules sont à 95 % noires et à 5 % blanches, afin de mieux observer l'écoulement. Les particules sont obtenues par un

procédé industriel de micronisation. La forme des particules obtenues n'est pas sphérique (figure 2). Ce matériau a été choisi afin d'avoir une phase solide qui a une masse volumique proche de celle de la glace ( $917 \text{ kg/m}^3$ ), mais également une taille très proche des cristaux de glace obtenus par les technologies de génération actuelles. La masse volumique a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre à hélium (*Micrometrics AccuPyc 1330*). Elle est de  $907 \pm 1 \text{ kg/m}^3$  pour les particules noires et  $910 \pm 1 \text{ kg/m}^3$  pour les particules blanches. La figure 3 présente la répartition en taille des particules, obtenue après passage dans un granulomètre laser (*Malvern Mastersizer 2000*).

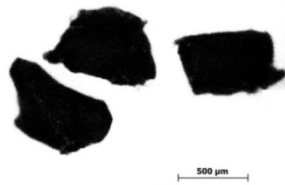


Figure 2: Aspect des particules utilisées

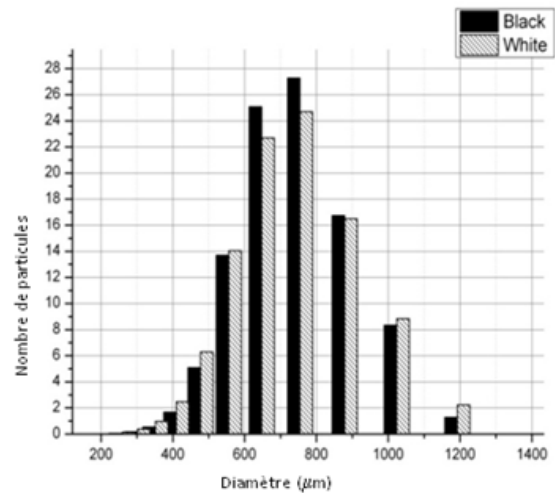


Figure 3: Histogramme de répartition des diamètres des particules

Ces mesures ont été complétées par la mesure du facteur de compacité ( $\alpha$ ). Un nombre connu de particules a été déposé dans un cylindre gradué, le volume de l'empilement est obtenu et l'équation (1) donne la valeur du facteur de compacité. Cette expérience a été réalisée dans l'air et dans l'alcool. Le facteur de compacité a été calculé et est égal à  $0,5 \pm 0,03$ . Le facteur de compacité pour un empilement aléatoire de sphères est au maximum de 0,64 et au minimum de 0,55 [19].

$$\alpha = (1 - \varepsilon) = \frac{m_s}{\rho_s \cdot V_{\text{tot}}} \quad (1)$$

Le contrôle du volume de particules injectées et la connaissance du volume total de la boucle permet de déterminer grâce à l'équation (2) la concentration volumique en solide (C), au sein de la boucle d'essais.

$$C = \frac{V_s}{V_{\text{tot}}} \quad (2)$$

La concentration volumique en solide maximale étudiée lors des essais a été de 25 % en volume. Au-delà de cette concentration, des bouchons apparaissent pour les faibles débits.

### 2.3. Moyens pour caractériser l'écoulement

La régulation en débit est obtenue par l'utilisation d'une pompe centrifuge multi-étagée (*Grundfos CHV2-50*) pilotée par un variateur de vitesse (*Leroy Somer UMV 4301 2.5T*). Pour éviter tout changement de section au sein de la boucle d'essais, qui pourrait engendrer une accumulation de particules, la variation en débit de l'écoulement est uniquement obtenue par la variation de la vitesse de la pompe. Aucune vanne ou by-pass n'est utilisé. Un débitmètre de type Coriolis (*Endress & Hausser TI83*), avec une section de passage de 6 mm de diamètre est utilisé pour mesurer le débit massique du mélange. Cet appareil permet notamment la

mesure en continu de la masse volumique du mélange. La perte de charges est mesurée à l'aide de deux capteurs de pression différentielle (*Endress & Hauser Deltabar PMD75 S 0-20 mbar and 0-1 bar*). Une caméra (*Point Grey Chameleon*) est utilisée pour enregistrer les différentes configurations d'écoulement en fonction des différents paramètres d'étude. Les différentes mesures ont été réalisées après un temps de stabilisation qui peut atteindre plus de 30 mn dans le cas de certaines configurations d'écoulement.

### 3. Présentation des résultats

#### 3.1 Concentrations obtenues

La concentration volumique en solide (C) ne nous permet pas de savoir quelle quantité de phase solide est transportée par la phase liquide. Il est donc nécessaire de définir un rapport, nommé *concentration délivrée* et noté  $\varphi$ , entre le débit de la phase solide sur le débit total de mélange.

$$\varphi = \frac{\dot{V}_s}{\dot{V}_m} \quad (3)$$

A partir des mesures de la masse volumique du mélange et en faisant l'hypothèse que la suspension est homogène dans le tube de mesure du débitmètre, et qu'il n'y a pas de glissement entre les deux phases (ce qui est justifié par la petite section du débitmètre), la conservation de la masse donne :

$$\rho_m = \rho_s \cdot \frac{\dot{V}_s}{\dot{V}_m} + \rho_l \cdot \left(1 - \frac{\dot{V}_s}{\dot{V}_m}\right) \quad (4)$$

L'équation (3) devient :

$$\varphi = \frac{\rho_l - \rho_m}{\rho_l - \rho_s} \quad (5)$$

#### 3.2 Présentation des différentes configurations d'écoulement

Les différences de masse volumique entre les deux phases engendrent une stratification de la phase solide en haut du tube. A contrario, l'écoulement de la phase liquide génère des forces hydrodynamiques qui dispersent les particules dans la phase liquide. En fonction des différents paramètres du problème (viscosité, masse volumique, diamètre, débit massique), l'un ou l'autre des phénomènes est dominant ce qui conduit à différentes configurations de l'écoulement. Trois "modes de transport" des particules ont été identifiés [20-21] : roulement, saltation et suspension. Ces "modes de transport" se combinent en fonction des caractéristiques de la phase solide, de la phase liquide et de l'écoulement pour former quatre configurations d'écoulement principales [20-21]. Bien que des déclinaisons existent au sein de ces configurations d'écoulement, la figure 4 décrit les configurations d'écoulement observées lors de nos essais. Une des configurations est très particulière puisque des instabilités hydrodynamiques tendent à déformer l'interface du lit de particules, qui présente alors une surface ridée/ondulée, s'apparentant à des dunes. Ce phénomène a été observé et étudié par [22-23] avec des particules plus lourdes que la phase liquide dans une boucle ouverte.

#### 3.3. Pertes de charge

L'évolution des pertes de charges en fonction du débit massique est présentée sur la figure 5. Pour de l'eau pure, ( $C = 0 \text{ \%}_{\text{vol}}$ ), les résultats correspondent à ceux de la corrélation classique de Churchill [24] qualifiant ainsi notre montage.

Configuration de l'écoulement		Observations	Profil de		
Désignation	Description		vitesse	C	$\phi$
<b>Pas d'écoulement solide</b>	Lit plat à particules fixes, pas d'écoulement de solide				
	<b>Écoulement à lit ondulé</b>	Lit ondulé à particules "fixes" + couche de lit mobile + légère saltation			
<b>Écoulement à lit plat</b>	Lit plat à particules fixes + couche de lit mobile + forte saltation				
	Lit plat à particules fixes + couche de lit mobile + suspension				
<b>Écoulement en suspension</b>	Suspension hétérogène				
	Suspension homogène				

Figure 4: Différentes configurations d'écoulement pour  $C = 15\%_{vol}$

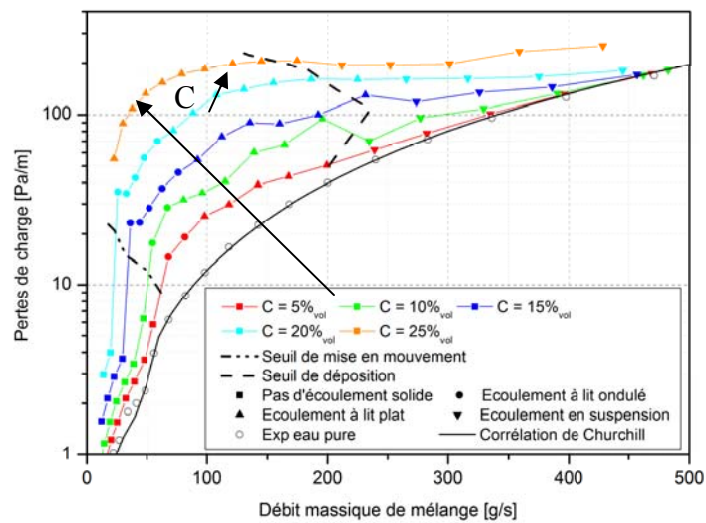


Figure 5 : Pertes de charge en fonction du débit massique de mélange.

L'augmentation brutale de la perte de charges est due au passage du régime laminaire au régime turbulent. Dans le cas des écoulements avec des particules, l'augmentation est plus conséquente dans le début de changement de régime. Deux phénomènes apparaissent presque simultanément : la transition à la turbulence et le seuil de mise en mouvement des particules. Il est difficile de connaître la contribution de chaque phénomène à cette augmentation de perte de charges. La mise en mouvement des particules dans un tube a été étudiée par [22] mais avec des particules plus lourdes. Pour les plus hautes concentrations en volume ( $10 \%_{vol} \leq C \leq 25 \%_{vol}$ ) après une très forte augmentation de la perte de charges, cette dernière se stabilise jusqu'à rejoindre la courbe dans le cas de l'eau pure. Il est intéressant dans cette zone de noter que l'ajout de particules ne conduit pas une augmentation des pertes de charges.

### 3.4. Concentration délivrée

Grâce à la mesure de la masse volumique par le débitmètre de type Coriolis, il est possible de déterminer la concentration délivrée. Les résultats sont présentés sur la figure 6. La concentration délivrée commence à 0 et augmente avec le débit de l'écoulement, par la présence des dunes. Elle atteint un maximum à  $\phi = C$  lorsque l'écoulement de particules est complètement suspendu.

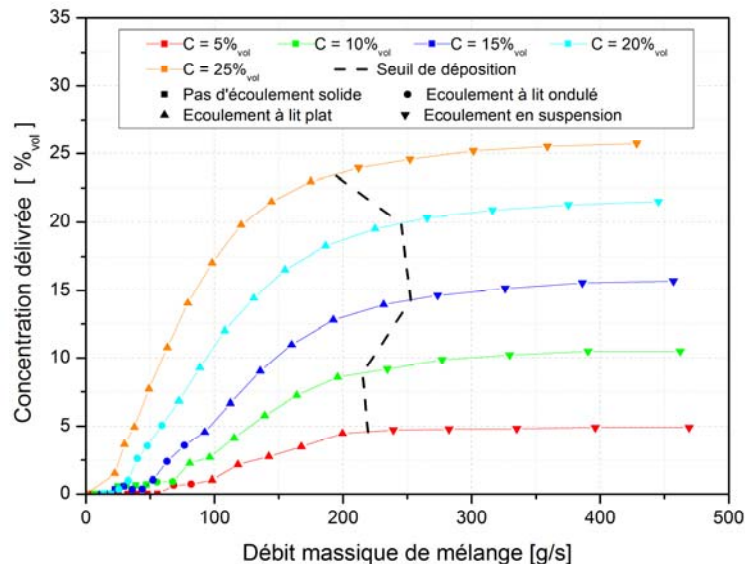


Figure 6 : Concentration délivrée en fonction du débit massique de mélange

### 3.5. Efficacité dans le transport

Grâce aux résultats précédents (pertes de charges, et concentration délivrée), il est possible de quantifier l'efficacité du transport dans le mélange. Dans le cas des applications avec du coulis de glace, l'objectif est de transporter le maximum de solide (la glace) car l'énergie est contenue dans le solide. La puissance mécanique utilisée (et donc perdue) pour transporter le mélange est calculée à partir de l'équation (6). Dans une installation réelle, il faut tenir compte de l'efficacité de la pompe, qui peut varier avec la concentration en solide [25].

$$P_{perdue} = \dot{V} \cdot \Delta P = \frac{\Delta P \cdot \dot{m}_m}{\rho_m} \quad (6)$$

La puissance transportée maximale peut être estimée par l'équation (7), où  $L_v$  est la chaleur latente de fusion ( $L_v = 334 \text{ kJ/kg}$ ). On ne considère ici que la chaleur latente apportée par la totalité des cristaux de glace et on néglige la chaleur sensible de la phase liquide,

$$P_{\text{transportée}} = \dot{V} \cdot \rho_s \cdot L_v = \dot{m}_m \cdot \phi \cdot \frac{\rho_s}{\rho_m} \cdot L_v \quad (7)$$

L'efficacité de transport est obtenue par l'équation (8):

$$\text{Efficacité} = \frac{P_{\text{transportée}}}{P_{\text{perdue}}} = \frac{\phi \cdot \rho_s \cdot L_v}{\Delta P} \quad (8)$$

L'efficacité du transport est représentée sur la figure 7. Le maximum des courbes est proche de la transition entre un écoulement présentant un lit et un écoulement complètement suspendu. Ce résultat semble être indépendant de la concentration. Mais la concentration a un impact sur la forme de la courbe. Par exemple pour des faibles concentrations, ( $\phi = 5\%_{\text{vol}}$ ) lorsque le maximum est atteint, l'efficacité décroît très rapidement. Cette décroissance est moins rapide pour les concentrations plus élevées. La meilleure concentration de travail semble être  $C = 20\%_{\text{vol}}$ .

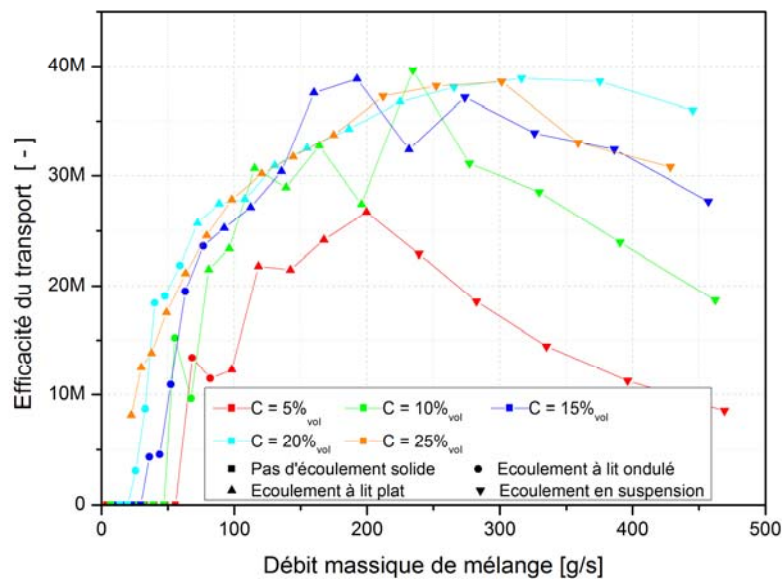


Figure 7: Efficacité du transport en fonction du débit.

#### 4. Conclusion et Perspectives

Le coulis de glace a été modélisé par une poudre de polypropylène de masse volumique égale à  $907 \text{ kg/m}^3$  et de taille comprise entre  $400$  à  $910 \text{ }\mu\text{m}$ . Les essais ont été réalisés pour différentes vitesses de rotation de la pompe (débit de mélange), différentes tailles et concentrations en particules de polypropylène. A partir de la mesure des pertes de charges et de la quantification du débit de solide en écoulement, il a été possible de calculer un coefficient de performance énergétique. L'étape suivante sera de tester les performances des échangeurs lors du passage d'un véritable coulis de glace, avec comme difficulté supplémentaire le changement d'état.

#### Remerciements :

Ce travail a été financé dans le cadre du projet régional, Pays de Loire, PERLE 2.

#### Références

- [1] M. Kauffeld, M. Kawaji, and P. Egolf, "Handbook on Ice Slurries", IIR, 2005.
- [2] J. Meewisse and C. Infante Ferreira, "Fluidised bed ice slurry generator: operating range", 5th Workshop on ice slurries of the IIR, 2002.

- [3] E. Stamatiou, J. Meewisse, and M. Kawaji, "Ice slurry generation involving moving parts", *Int. J. of Refrigeration*, vol. 28, no. 1, pp. 60-72, 2005.
- [4] J.-P. Bédécarrats, T. David, and J. Castaing-Lasvignottes, "Ice slurry production using supercooling phenomenon", *Int. J. of Refrigeration*, vol. 33, no. 1, pp. 196-204, 2010.
- [5] H. Kumano, T. Hirata, M. Shirakawa, R. Shouji, and Y. Hagiwara, "Flow characteristics of ice slurry in narrow tubes", *Int. J. of Refrigeration*, vol. 33, no. 8, pp. 1513-1522, 2010.
- [6] M. Grozdek, R. Khodabandeh and P. Lundqvist, "Experimental investigation of ice slurry flow pressure drop in horizontal tubes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol.33, no. 2, 357–370, 2009.
- [7] L. Mika, "Energy losses of ice slurry in pipe sudden contractions", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 35, no. 6, pp. 939-947, 2011.
- [8] V. Fester, B. Mbiya, and P. Slatter, "Energy losses of non-Newtonian fluids in sudden pipe contractions", *Chemical Engineering Journal*, vol. 145, no. 1, pp. 57-63, 2008.
- [9] A.Kitanovski, D. Vuarnoz, D. Ata-Caesar, P. Egolf, T. Hansen and C. Doetsch, "The fluid dynamics of ice slurry", *Int. J. of Refrigeration*, vol. 28, no. 1, pp. 37–50, 2005.
- [10] T. Kousksou, A. Jamil, T. El Rhafiki, and Y. Zeraouli, "Prediction of the heat transfer coefficient for ice slurry flows in a horizontal pipe", *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 6, pp. 1311-1318, 2010.
- [11] H. Kumano, T. Hirata, R. Shouji, and M. Shirakawa, "Experimental study on heat transfer characteristics of ice slurry", *Int. J. of Refrigeration*, vol. 33, no. 8, pp. 1540-1549, 2010.
- [12] I. Abbassi, J. Castaing-Lasvignottes, J.-P. Bédécarrats, J.-P. Dumas, and A. Mimet, "Energetic performances of a refrigerating loop using ice slurry", *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 8–9, pp. 962-969, 2010.
- [13] V. Ayel, O. Lottin and H. Peerhossaini, "Rheology, flow behaviour and heat transfer of ice slurries a review of the state of the art", *Int. J. of Refrigeration*, vol. 26, no. 1, pp. 95–107, 2003.
- [14] A. Monteiro and P. Bansal, "Pressure drop characteristics and rheological modeling of ice slurry flow in pipes", *Int. J. of Refrigeration*, vol. 33, no. 8, pp. 1523-1532, 2010.
- [15] J. Guilpart, E. Stamatiou, and L. Fournaison, "The control of ice slurry systems: an overview", *Int. J. of Refrigeration*, vol. 28, no. 1, pp. 98-107, 2005.
- [16] P. Reghem, I.Petit, B. Stutz, and Y. Le Guer, "Experimental Study of a Buoyant Particle Dispersion in Pipe Flow", *ICHEME*, 81(Part A), 1136–1143, 2003).
- [17] B. Stutz, P. Reghem and O. Martinez, "Friction losses for flow of concentrated slurries", *Second workshop on ice slurries of IIF/IIR, Paris*, 2000.
- [18] B. Stutz, P. Reghem and O. Martinez, "Flow of slurries of particle with density close to that of water", *4th int. conference on multiphase flow*, pp. 1–12, 2001.
- [19] G. D. Scott and D. M. Kilgour, "The density of random close packing of spheres", *British Journal of Applied Physics* (2) pp.863-864, 1969.
- [20] R. Turian and T. Yuan, "Flow of slurries in pipelines", *AIChE Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 232-243, 1977.
- [21] P. Doron and D. Barnea, "Flow pattern maps for solid-liquid flow in pipes", *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 22, no. 2, pp. 273-283, 1996.
- [22] M. Ouriemi, J. Chauchat, P. Aussillous, M. Medale, and E. Guazzelli, "Sediment transport and dunes in pipe flow", *7th int. conf. on multiphase flow*, 2010.
- [23] J. Dreano, C. Cassar, A. Valance and D. Lague, "Experimental study of deposit morphology and sediment transport in a flume", *Proceedings marine and river dune dynamics*, pp. 97-102, 2008.
- [24] Churchill, S.W., "Friction factor equations spans all fluid-flow ranges", *Chem. Eng.*, 91, 1977.
- [25] E. Norgaard, T. Sorensen, T. Hansen and M. Kauffeld, "Performance of components of ice slurry systems: pumps, plate heat exchangers, and fittings", *Int. J. of Refrigeration*, vol. 28, no. 1, pp. 83–91, 2005.