

T H E S E

présentée à

L'UNIVERSITE DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR

Ecole Doctorale Des Sciences Exactes et de leurs Applications

par

Patrick REGHEM

pour obtenir le grade de

D O C T E U R

Spécialité : PHYSIQUE

**Etude hydrodynamique
de fluides diphasiques solide-liquide
en conduite circulaire:
Application au coulis de glace**

Soutenue le 17 Décembre 2002

Devant la commission d'Examen formée de :

A. LALLEMAND	Professeur à l'INSA de Lyon	<i>Rapporteur</i>
O. SARI	Professeur à l'Ecole d'Ingénieur du canton de Vaud (CH)	<i>Rapporteur</i>
M. MORY	Professeur à l'ENSGTI, Université de Pau et des Pays de l'Adour	<i>Président du jury</i>
J.P. DUMAS	Professeur à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour	
P. MERCIER	Ingénieur au CEA / DTEN / GRETh , Grenoble	
B. STUTZ	Maître de conférence à l'INSA de Lyon	

INTRODUCTION

L'accroissement de l'effet de serre et la diminution de la couche d'ozone ont marqué ces dix dernières années. Les gaz frigorigènes classiques tels que les CFC (chlorofluorocarbones), HCFC (hydrochlorofluorocarbones) et HFC (hydrofluorocarbones) participent respectivement à la destruction de la couche d'ozone et à l'effet de serre. Les secteurs du froid et de la climatisation sont des domaines en pleine expansion non seulement dans les pays industrialisés mais aussi dans les pays en voie de développement. Il est évident que dans l'état actuel de la technologie de fabrication du froid, la planète ne pourra absorber la quantité de rejets actuels multipliée par un facteur 3 ou 4, c'est à dire pour plus de 5 milliards d'individus.

La communauté scientifique est unanime sur le fait que la situation actuelle est préoccupante car les conséquences sont déjà visibles : réchauffement planétaire, modifications climatiques, désertification,... Par sa dimension planétaire, ses enjeux environnementaux majeurs et ses implications au plan des relations internationales, la résolution de ce problème est devenue une priorité pour le développement à long terme.

En 1992, la convention de Rio a établi l'objectif de stabiliser les émissions de gaz à effet de serre à un niveau qui empêche toute perturbation climatique.

En 1997, le protocole de Kyoto et les accords au sein de l'Union Européenne se traduisent pour la France par l'obligation de ne pas dépasser, en moyenne sur les cinq années 2008-2012, les niveaux d'émissions de gaz à effet de serre de 1990.

Les CFC , HFC et HCFC seront définitivement interdits de production en 2030. Une solution de remplacement de ces fluides est l'utilisation de fluides tels que le propane, le butane, l'isobutane ou encore l'ammoniac, mais ces fluides présentent des risques en terme de sécurité et d'environnement.

Le respect de ces engagements sera difficile et justifie pleinement la dynamisation des politiques d'efficacité énergétique, dynamisation qui passe à la fois par la définition de politiques publiques et par des efforts importants en matière de recherche et développement.

Les fluides frigorigènes de substitution imposent une nouvelle conception des installations et des équipements associés. Ils obligent à repenser la gestion de l'énergie, les modes de production, les besoins et les modes de consommation.

La prise en compte de tous ces paramètres impose une profonde mutation technologique qui est déjà en cours.

Un axe de recherche prometteur consiste à limiter la quantité de fluide frigorigène utilisé dans les installations en les cantonnant à leur rôle de production de froid. Le transport et l'utilisation sont assurés par un fluide frigoporteur inoffensif pour l'homme et pour l'environnement. L'utilisation d'un réservoir de stockage de fluide frigoporteur est d'autant plus intéressante qu'elle permet une meilleure gestion énergétique et une limitation des puissances frigorifiques installées. De plus la production frigorifique peut être programmée durant des périodes où l'énergie nécessaire (électrique, thermique,...) à produire le froid est abondante et bon marché ... Dans certains cas, il est possible de réduire d'environ 75% la quantité de fluide frigorigène classique.

Les frigoporteurs classiques sont constitués d'un fluide monophasique et ne stockent l'énergie frigorifique que par chaleur sensible. L'originalité de l'axe de recherche de cette étude consiste à utiliser un fluide frigoporteur comportant un matériau à changement de phase (MCP). Les transferts thermiques ne sont plus basés uniquement sur la chaleur sensible mais également sur la chaleur latente du changement de phase de l'un des composés. Cette énergie de transformation de phase est beaucoup plus intéressante car la densité énergétique des fluides diphasiques est très supérieure à celle des fluides monophasiques. Par exemple, si on veut élever la température de -1°C à $+1^{\circ}\text{C}$ d'1 kg de glace, il faut apporter une énergie de 341kJ, cette même énergie peut élever l'eau (liquide) de 0°C à $81,5^{\circ}\text{C}$.

Cette étude se place dans le cadre général du froid industriel et semi-industriel. Les mélanges liquide-solide présentent un réel potentiel de développement dans le domaine du froid, compte tenu de leur impact sur l'environnement (diminution des volumes de réfrigérants classiques) et de leurs caractéristiques énergétiques (forte capacité calorifique). De plus, ces fluides peuvent être utilisés non seulement comme frigoporteurs, mais aussi comme « frigostockeurs ».

On distingue différents types de matériaux à changement de phase MCP liquides-solides

-Les MCP encapsulés dans des récipients étanches. Ce procédé est utilisé avec succès dans le domaine du stockage du froid. Cependant, son utilisation semble difficilement envisageable dans le cadre des fluides frigoporteurs, dans des installations industriels classiques compte tenu des problèmes d'usure des enveloppes et de surfusions importantes.

-Les microémulsions (microémulsions de paraffines dispersées dans de l'eau et stabilisées par des surfactants anioniques ou ioniques, ...). Les problèmes de stabilité à long terme et de surfusion restent à résoudre.

-Les billes de gel d'un diamètre de l'ordre de 1mm sont constituées d'une matrice polymère contenant 90% d'eau dispersées dans un liquide organique (ce procédé en cours de développement a des domaines d'applications restreints du fait des matériaux employés).

-Le "coulis de glace", mélange diphasique de liquide aqueux et de glace. Ce procédé apporte de nombreux avantages: il est inoffensif pour l'environnement comme pour l'homme et du fait de la chaleur latente de fusion de la glace, il a un pouvoir énergétique important : un coulis eau – glace comportant 30% de glace a un pouvoir frigorifique 25 fois plus important que celui de l'eau.

Peu d'installations industrielles utilisent des frigoporteurs diphasiques liquide-solide parce que d'une part la fabrication de ces frigoporteurs est énergétiquement discutable et d'autre part la mécanique des fluides et le comportement hydrodynamique de ces composés sont encore très mal connus. Il reste en effet de nombreux problèmes à résoudre : ségrégation du mélange liquide-solide, accumulation ou blocage de la partie solide dans les singularités tels que des rétrécissements, vannes, ... Le dimensionnement des canalisations, des pompes, des réservoirs de stockage nécessite une bonne connaissance des pertes de charge, des régimes d'écoulement, de la viscosité,...

L'objectif de cette étude est de répondre à ces problèmes.

Dans le domaine des écoulements de suspensions liquide-solide où la phase solide est plus dense que la phase liquide, on trouve de nombreuses études qui proviennent en grande partie des recherches sur le transport de pétrole (et de ses sédiments) et de produits miniers tels que des mélanges eau-minerai ,... Par contre, dans le cas où la densité de la phase solide est voisine de celle de la phase liquide, on trouve relativement peu de données. C'est pourquoi, l'objectif à court terme de cette étude est avant tout de réaliser des dispositifs expérimentaux permettant d'acquérir suffisamment de données pour pouvoir analyser et modéliser le comportement hydrodynamique de ce type de suspensions liquide-solide.

On apporte une contribution à la connaissance de l'hydrodynamique des fluides diphasiques liquide-solide. On détermine dans cette étude, la vitesse et la concentration potentielle maximale de solide à transporter ainsi que le type de régime d'écoulement et le calcul des pertes de charge.

Le calcul et le contrôle de la fraction de solide sont déterminants dans la gestion et l'optimisation des installations utilisant des fluides diphasiques. Or, nous verrons dans cette étude, que ces fluides ne sont pas toujours homogènes et qu'il faut tenir compte de beaucoup de paramètres importants tels que la vitesse de glissement entre les phases liquide et solide, les profils de vitesse et de température à travers une même section, la structure de l'écoulement,...

Cette étude est principalement basée sur une approche expérimentale. La mécanique des fluides de l'écoulement du coulis de glace a été considérée dans un premier temps de façon globale comme un écoulement diphasique liquide-solide classique, c'est à dire avec une phase solide stable. On a simulé à température ambiante l'écoulement liquide-glace par un écoulement eau-billes de polypropylène dont la densité est proche de celle de la glace. L'étude du mélange eau-billes permet de nous libérer de la contrainte de production de la glace.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique des connaissances actuelles de la mécanique des fluides diphasiques liquide-solide. On expose également les théories relatives à la compréhension et à l'analyse des résultats expérimentaux.

Le second chapitre décrit les deux bancs de test réalisés au laboratoire dans le but d'étudier d'une part les écoulements liquide-solide, à température ambiante, avec une densité de la phase solide inférieure à celle du liquide et d'autre part, un deuxième banc de test spécialement conçu pour l'étude du coulis de glace. On y décrit l'instrumentation utilisée et les procédures expérimentales. Ce chapitre met l'accent sur la méthode et l'importance de la détermination du titre de solide.

Le troisième chapitre traite des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre d'un écoulement eau + billes de polypropylène. On analyse les pertes de charge et on développe un modèle performant de calcul des pertes de charge. Différentes singularités telles que des coudes, des rétrécissements, des élargissements,... sont analysées. On étudie également dans cette partie les écoulements ascendants et descendants.

Le quatrième chapitre traite des résultats expérimentaux obtenus pour le coulis de glace. Les corrélations développées dans le chapitre I et déjà appliquées dans le chapitre III aux mélanges eau-billes sont analysées et adaptées au cas de l'écoulement liquide-glace.

En conclusion, on analyse et on compare les résultats entre les écoulements eau/billes et liquide/glace.

Cette étude est réalisée en collaboration financière avec l'ANVAR (Agence Nationale de la Valorisation de la Recherche).

CONCLUSION

L'objectif initial de cette recherche était de mettre au point une procédure expérimentale pour étudier des écoulements de fluides diphasiques liquide-solide. Deux bancs de test sont aujourd'hui opérationnels:

- le premier simule à température ambiante, un écoulement liquide-solide dont la densité de la phase du solide est inférieure à la phase du liquide.
- le deuxième permet d'étudier des coulis de glace fabriqués à partir d'un échangeur à surface raclée.

L'analyse technique du matériel devrait permettre une amélioration des systèmes utilisant des suspensions liquide-solide en général et des coulis de glace en particulier. Les pompes centrifuges que nous avons utilisées pour les deux bancs de test nous donnent entière satisfaction y compris pour le coulis de glace. Comparées aux pompes à vis, ces pompes sont peu onéreuses. Si leur puissance est limitée, elles peuvent toutefois équiper des systèmes de taille moyenne (semi-industriel). Quelque soit le type de pompe utilisée, il faut veiller à ce que le refroidissement du moteur ne se fasse pas au détriment du coulis de glace : la pompe ne doit pas être confinée dans un endroit insuffisamment aéré.

Dans un mélange liquide-solide, la mesure de la fraction de solide est un problème très complexe que beaucoup de chercheurs essayent actuellement de résoudre. La majorité des méthodes actuellement utilisées (température, masse volumique,...) considère le fluide dans son intégralité alors que notre étude tend à prouver que la répartition de la phase solide dans le fluide diphasique n'est pas uniforme au sein d'une même section : il y a non seulement un gradient de concentration, mais en plus, un gradient de vitesse (y compris en régime homogène).

Actuellement, la mesure du titre de glace la plus fiable est basée sur la mesure de la masse volumique, or on a démontré dans le chapitre II-2-2 pour le mélange eau-billes qu'il y a une différence entre la fraction de solide et le titre de solide qui est fonction de la vitesse de glissement entre la phase liquide et la phase solide. Dans le cas des billes, la vitesse de glissement est encore importante pour des régimes hétérogènes (en moyenne 10%), c'est à dire pour des régimes d'utilisation potentiels. Les inclusions de polypropylène sont stables et rigides, c'est pourquoi, il est possible de comparer en circuit fermé la fraction de billes (par pesée) et le titre de billes (déterminé à partir du débitmètre à effet Coriolis). Par contre, les cristaux de glace ne sont pas stables, la comparaison est plus délicate. Nous n'avons pas démontré l'existence d'une vitesse de glissement entre la phase liquide et la glace. Il est impératif de connaître avec précision la répartition de la glace, les profils de température et de vitesse,... la connaissance et l'utilisation de ces paramètres complémentaires permettront de confirmer s'il y a une dérive de la mesure de la fraction de glace par rapport au titre de glace.

Différentes méthodes basées sur l'utilisation d'ondes (ultrasonores, infrarouges, ...) traversant le fluide sur le diamètre sont actuellement à l'étude.

Une analyse dimensionnelle des cristaux de glace est nécessaire à la fois pour l'hydrodynamique du coulis et également sur l'étude des échanges thermiques. Un dispositif de visualisation par

microscope optique et lumière polarisée permettra une analyse dimensionnelle des cristaux (en cours de réalisation).

Seul le mélange eau + 10% d'éthanol a été utilisé pour fabriquer le coulis. Des mélanges tels que l'eau salée ou l'eau faiblement ammoniaquée (inférieur à 5%) présentent de très nombreux avantages et sont, à ce titre, largement utilisés dans l'industrie. Les caractéristiques hydrodynamiques de ces coulis sont pourtant encore mal connues. L'étude de ces coulis permettrait d'optimiser les installations.

Une importante base de données sur les pertes de charge a été constituée pour les mélanges eau/billes et eau-éthanol/glace. On a démontré que les pertes de charge de la glace sont très importantes pour le coulis de glace (voir figures IV-9 et IV-10).

Pour des concentrations de solide supérieures à 20%, les pertes de charge sont très importantes et la fluidité du mélange n'est assurée qu'au delà d'un régime d'écoulement minimal. Les risques d'obstruction sont également trop importants. La technologie et la consommation énergétique nécessaire au transport d'un coulis comportant 30% de glace risquent de ne pas être économiquement rentables.

Le mélange eau-billes a été étudié initialement pour simuler le coulis de glace. Si les cartographies d'écoulement et les pertes de charge sont relativement assez éloignées, il est possible d'établir une correspondance entre les 2 types d'écoulements : en effet on a démontré que, dans les 2 cas, lorsque la phase solide est en suspension dans la phase liquide, les pertes de charge du mélange sont très proches de celles de la phase liquide pure. A l'inverse, quelque soit le mélange, si l'écoulement est stratifié (présence d'un lit mobile ou immobile), les pertes de charge augmentent très fortement. Il est donc préférable de ne pas utiliser le mélange diphasique en régime stratifié : il faut trouver le meilleur compromis entre la vitesse débitante et les pertes de charge.

On peut considérer que la vitesse optimale d'utilisation des fluides diphasiques est la vitesse où le régime est hétérogène. Pour le mélange eau-billes, cette vitesse est de 0,9m/s tandis que pour le coulis de glace une vitesse débitante de 0,4m/s est suffisante car le régime est déjà homogène à cette vitesse.

En ce qui concerne les modèles de calculs des pertes de charge, plusieurs méthodes d'estimation des pertes de charge régulières ont été développées. Les méthodes basées sur des considérations semi-empiriques donnent de bons résultats à la fois pour les billes et pour la glace. La corrélation (D-2) que nous proposons dans le chapitre IV-3-2 pour la détermination des pertes de charge du coulis de glace présente une incertitude de 11 % pour le mélange liquide-glace en considérant les résultats expérimentaux obtenus pour les diamètres D25 et D50. Les coefficients semi-empiriques de cette corrélation peuvent être améliorés en augmentant la base de données, notamment pour d'autres diamètres car l'extrapolation d'une corrélation semi-empirique se révèle généralement hasardeuse.

Le modèle de calcul des pertes de charge en présence d'écoulements ascendants ou descendants est en accord par rapport aux mesures expérimentales. L'analyse physique des bilans de masse et de quantité permet une bonne approche des écoulements verticaux ascendants et descendants. On a déterminé les pertes de charge singulières pour différentes configurations (coudes, élargissements et rétrécissements) dans le cas des écoulements eau-billes. Les théories existantes ne sont valables uniquement dans le cas de fractions de solide inférieures à 10%. Reste à étudier ces configurations dans le cas du coulis de glace.

L'hydrodynamique des fluides du coulis de glace est aujourd'hui suffisamment maîtrisée pour continuer d'une part l'étude sur les échanges thermiques liés au coulis de glace, d'autre part la fabrication du coulis de glace à partir d'eau surfondue.

Etude hydrodynamique de fluides diphasiques solide-liquide en conduite circulaire : Application au coulis de glace

L'objectif de ce travail est d'étudier la mécanique des fluides du mélange diphasique liquide-solide dans le cas général et dans le cas du coulis de glace en particulier.

On étudie d'abord un mélange d'eau et de billes de polypropylène (diamètre 3.6mm, densité 889 kg/m³) puis un mélange eau-éthanol et glace (0.1mm, 916 kg/m³). Les fractions solides varient de 0 à 0.4, les vitesses débitantes de 0.1 à 4m/s (turbulent) pour des diamètres hydrauliques de 21.5 , 27 et 44,6mm. .

L'étude expérimentale est principalement basée sur des mesures de pertes de charge, des profils de vitesse et des visualisations d'écoulements horizontaux et verticaux dans des conduites droites, des coudes, des rétrécissements et des élargissements.

Les différents régimes d'écoulement sont représentés sur des cartographies. Les résultats expérimentaux permettent de corrélérer le coefficient de perte de charge pour les conduites droites circulaires horizontales et dans le cas des écoulements ascendant et descendant.

Study of two phase flow liquid-solid through circular pipes : application to ice slurries

The purpose of this work is to study the hydraulic mechanic of two-phase flow in general and ice slurry in particular.

We study first a mixture of water and polypropylene marbles with (3.6mm diameter, density 889 kg/m³) and then a mixture of ethanol-water and ice (0.1mm, 916 kg/m³). Solid fraction varies from 0 to 40%, flow velocity from 0.1 to 4m/s (turbulent) inside pipes of 21.5 , 27 and 44,6mm diameter.

The experimental study is mainly based on frictions losses, velocities profiles and vizualisations of horizontal and vertical flow through any straight pipes, bends, contractions and elargements. Different regims are performed on flow pattern diagrams. The experimental results may to correlate the frictions losses coefficient for straight circular pipes and also in case of upward and downward flow.

Discipline: Physique

Mots-clefs: écoulement solide-liquide; suspension; perte de charge; régime d'écoulement; vitesse de phase; coulis de glace; échangeur à surface raclée

Laboratoire de Thermique Energétique et Procédés (LaTEP)

Université de Pau et des Pays de l'Adour

UFR Sciences, BP 1155

64013 PAU Cédex