

Caractérisation de frigoporteurs diphasiques par une méthode ultrasonore : application au coulis de glace

V. Langlois¹, W. Gautherin², J. Laurent¹, X. Jia¹, L. Royon^{3,4}, L. Fournaison², A. Delahaye²,

¹Université Paris Est, Laboratoire LPMDI, CNRS UMR 8108, 77454 Marne-la-Vallée,

²Unité de Recherche du Génie des Procédés Frigorifiques GPAN, Cemagref,

³Université Paris Diderot, Laboratoire MSC CNRS UMR 7057 75013 Paris.

⁴ Université Paris Est, IUT de Marne la Vallée, 77454 Marne-la-Vallée.

* (auteur correspondant : laurent.royon@univ-mlv.fr)

Résumé - L'objectif de ce travail est de développer un capteur ultrasonore permettant de caractériser avec une bonne précision la fraction solide d'un fluide diphasique comme le coulis de glace. Ce travail présente des résultats expérimentaux obtenus sur des suspensions modèles composées de billes de PMMA à différentes concentrations dans du polyéthylène glycol (PEG300) et ceux obtenus sur un coulis de glace produit à partir d'un mélange d'eau et de polypropylène-glycol (PPG). La mise en évidence de relations bijectives entre fraction solide et vitesse du son est un résultat prometteur dans la mise au point d'un capteur ultrasonore.

Nomenclature

V vitesse du son, m/s
 T température, $^{\circ}C$
 t temps, s

ϕ fraction volumique
Indices et exposants
Liq PEG pur

1. Introduction

Dans le domaine du transport de froid, les fluides frigoporteurs diphasiques comme le coulis de glace, constituent une solution technologique innovante et respectueuse de l'environnement. L'utilisation de ces nouveaux fluides s'accompagne néanmoins de nouvelles problématiques comme notamment le contrôle de la teneur en particules de glace, qui conditionne l'énergie latente transportée. Actuellement, plusieurs techniques, comme la densimétrie, la calorimétrie sont installées industriellement pour mesurer la teneur en glace mais la précision est loin d'être satisfaisante (de 5 à 10%).

Ce travail présente une investigation sur le développement d'un capteur basé sur la propagation d'ondes ultrasonores pour la mesure de la teneur en glace. La première partie présente une description du dispositif expérimental et une détermination de la relation entre fraction solide et vitesse du son dans une suspension modèle en situation isotherme. La seconde partie est consacrée à une présentation des premiers résultats obtenus sur un coulis de glace d'eau et polypropylène-glycol. Il s'agit en particulier de montrer si la méthode envisagée peut s'appliquer facilement dans le cadre d'un coulis de glace et de mettre en évidence les facteurs (température, vitesse d'écoulement) susceptibles d'avoir un effet sur la vitesse de propagation du son.

2. Matériels et Méthode

2.1 Dispositif expérimental

Les mesures acoustiques sont réalisées en transmission. Une impulsion brève est générée par un transducteur ultrasonore à immersion de fréquence de 2MHz à travers l'échantillon de fluide disposé dans une cellule parallélépipédique en PMMA (Ffig.1a). Le signal transmis est détecté par un autre transducteur placé sur la paroi opposée. Une cellule en PMMA est utilisée pour étudier le fluide en condition isotherme (fig. 1b) et une cellule composée de 2 parois en laiton est utilisée pour étudier le fluide en condition non isotherme (fig. 1c). La vitesse du son V est déterminée à partir de la mesure du temps de vol. Il s'agit maintenant de savoir si la vitesse du son dans le fluide est une donnée permettant d'évaluer le taux de particules.

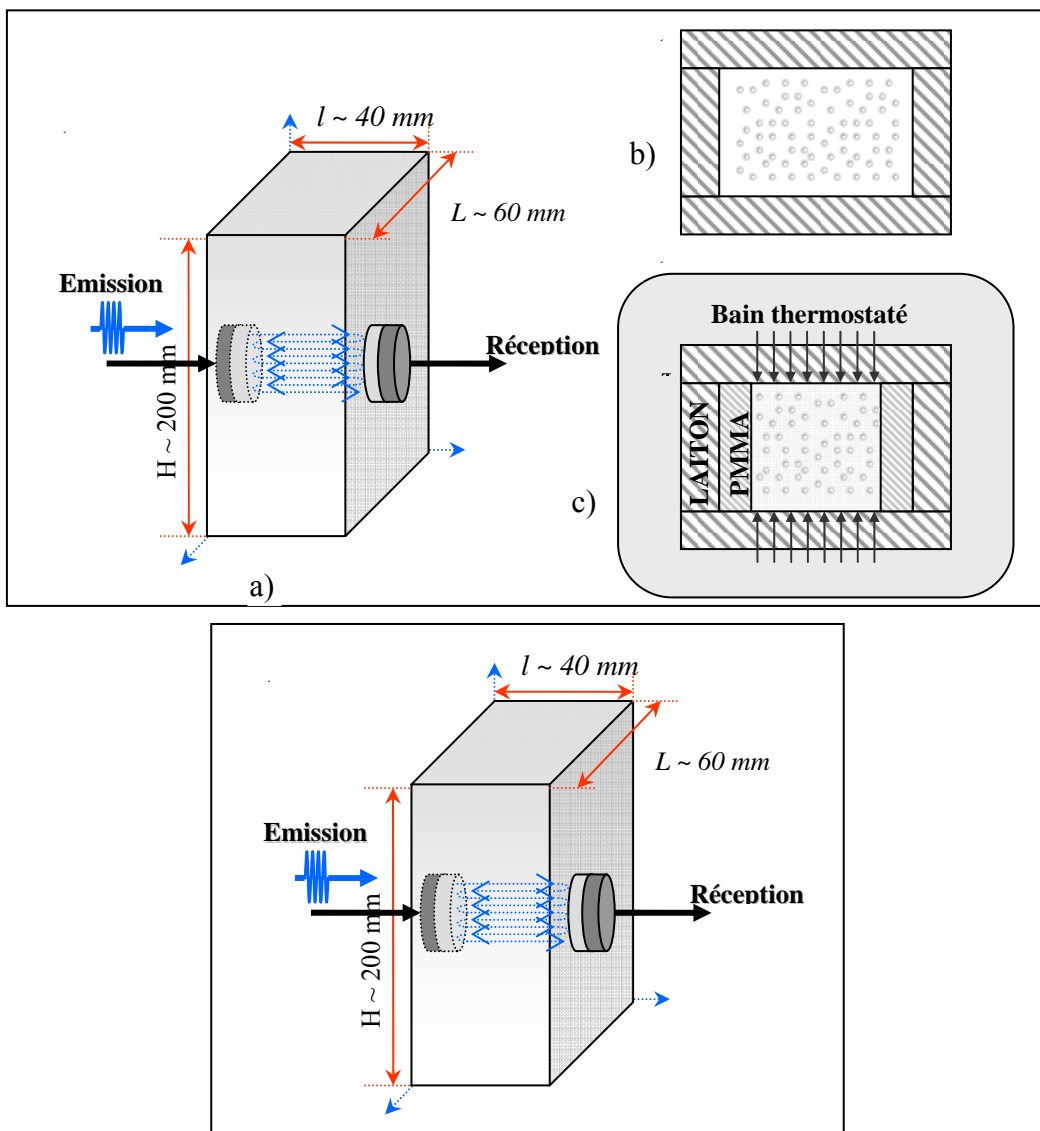


Figure 1 – Principe de la mesure, cellules utilisées : mesure de la relation entre fraction solide et vitesse du son..

Figure 1 – (a) Principe de la mesure, cellules utilisées : mesure de la relation entre fraction solide et vitesse du son (b), mesure de la vitesse en fonction de la température (c).

2.2 Mesures d’ondes ultrasonores sur une suspension modèle

Des suspensions modèles ont été réalisées à partir de billes de PMMA de diamètre moyen $d \approx 0,4 \text{ mm}$. Le liquide utilisé est le polyéthylène glycol 300 (PEG) de densité $1,13 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ comparable à celle du PMMA $1,19 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, ce qui permet une sédimentation des billes suffisamment lente. Différentes fractions massiques de 5.3%, 9.2%, 20.1%, 29.6%, 40% sont étudiées. Les mesures acoustiques sont réalisées à 20°C pendant l'intégralité de la sédimentation. La hauteur de chute maximale des particules par rapport à l'axe des transducteurs est de 3 cm.

La figure 2 présente la variation relative de la vitesse du son $\Delta V/V_{Liq}$ en fonction du temps obtenue pour les différentes suspensions. V_{Liq} est la vitesse du son dans le PEG pur. Les courbes obtenues pour chaque concentration montrent des allures similaires : aux temps courts, la concentration en particules s'homogénéise au sein de la cellule ce qui se traduit par une vitesse du son quasi - constante puis on observe ensuite la chute progressive de la vitesse de propagation en fonction du temps, traduisant une diminution de la fraction en particules liée au phénomène de sédimentation. On remarque en outre que la vitesse du son est d'autant plus élevée que la concentration en particules est élevée.

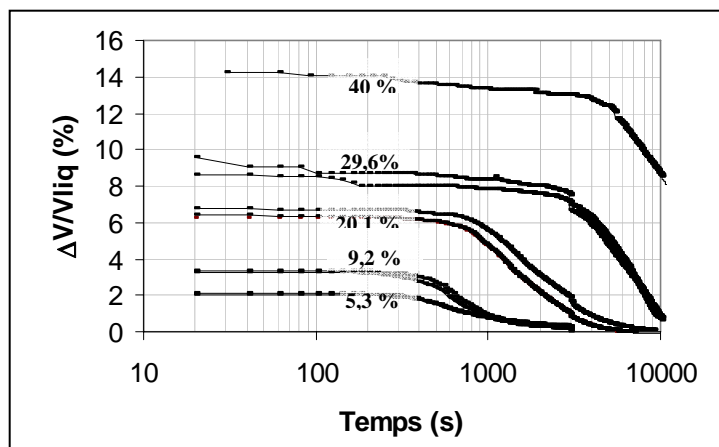


Figure 2 Variation relative de la vitesse du son $\Delta V/V_{Liq}$ en fonction du temps obtenue pour cinq concentrations massiques de billes de PMMA. concentrations massiques

La figure 3 présente la vitesse du son en fonction de la fraction volumique ϕ . La vitesse de propagation du son considérée ici est celle obtenue aux temps courts lors de l'expérience de sédimentation. On remarque que la vitesse est une fonction croissante de la fraction massique en particules. Ce résultat est en accord avec les modèles principaux de milieu effectif utilisés pour décrire la propagation des ondes dans les suspensions. A titre de comparaison, un modèle de milieu effectif en régime inertiel (théorie de Biot modifié [1]) est indiqué sur la figure 3. On peut observer le bon accord entre la théorie et l'expérience, malgré le fait que

l'hypothèse du modèle de grande longueur d'onde ne soit pas parfaitement vérifiée expérimentalement.

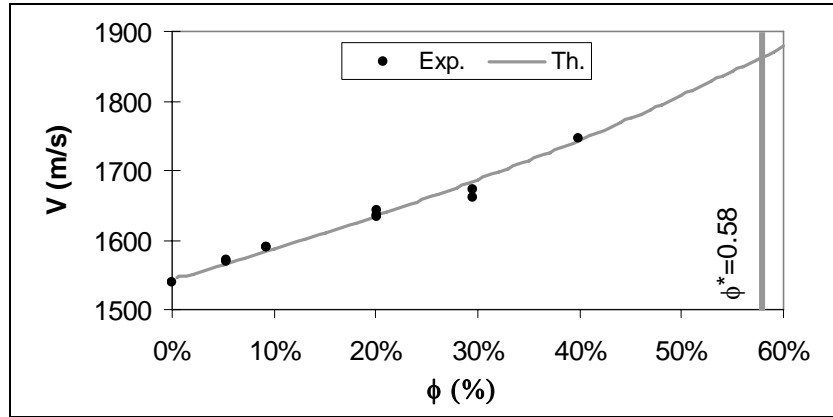


Figure 3 Vitesse du son en fonction de la fraction solide volumique ϕ .

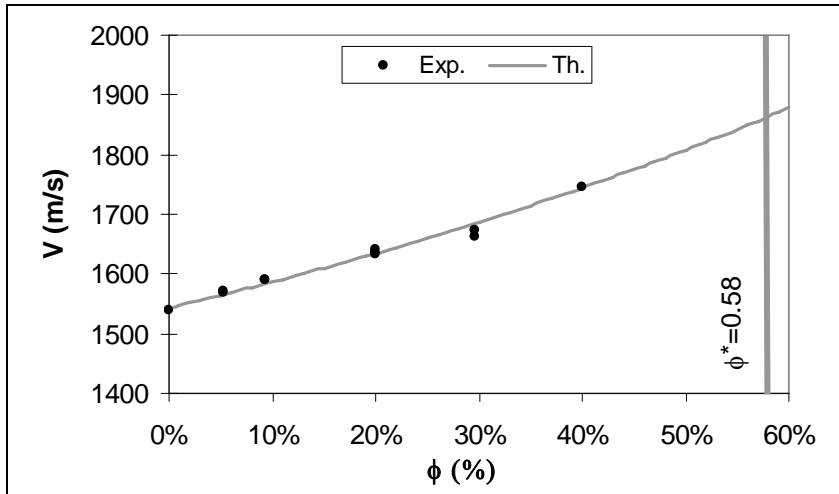


Figure 3 Vitesse du son en fonction de la fraction solide volumique ϕ .

Ces résultats peuvent être comparés aux modèles de milieu effectif utilisés pour décrire la propagation des ondes dans les suspensions. Dans ces théories [1,2] valables lorsque la longueur d'onde λ est plus grande que la taille des particules d , la vitesse est caractérisée par la racine carrée du rapport d'une compressibilité effective K_{eff} sur une masse volumique effective ρ_{eff} . La compressibilité effective est donnée par une relation du type "loi des mélanges" :

$$K_{eff}^{-1} = (1 - \phi) \cdot K_{fl}^{-1} + \phi \cdot K_p^{-1} \quad (1)$$

où ϕ est la fraction volumique des particules, K_{fl} et K_p sont respectivement les compressibilités de fluide et particules. La masse volumique effective dépend quant à elle des forces d'interactions visqueuses entre le fluide et les particules. Quand la couche limite visqueuse entourant les particules est grande vis-à-vis des particules (régime visqueux), il n'y a pas de mouvements relatifs entre le fluide et les particules, et les dissipations visqueuses sont négligeables. L'expression de la masse volumique effective prend alors une forme simple :

$$\rho_{\text{eff}} = (1 - \phi) \cdot \rho_{\text{fl}} + \phi \cdot \rho_p \quad (2)$$

où ρ_{fl} et ρ_p sont les masses volumique de fluide et de particules.

Lorsque la couche limite est peu épaisse (régime inertiel), les mouvements relatifs entre particules et fluides deviennent significatifs conduisant à une force d'interaction visqueuse. La prise en compte de cette force peut se faire en modifiant l'expression de la masse volumique effective [2]:

$$\rho_{\text{eff}} = \rho_{\text{fl}} \frac{\{(2 - \phi) \cdot \rho_p + (1 - \phi) \cdot \rho_{\text{fl}}\}}{2 \cdot (1 - \phi)^2 \cdot \rho_p + [1 + 2\phi(1 - \phi)] \cdot \rho_{\text{fl}}} \quad (3)$$

Enfin, il est à noter que les deux expressions des masses volumiques (eqs 2 et 3) précédentes sont équivalentes lorsque les masses volumiques des particules et du fluide sont proches.

La figure 3 montre un bon accord entre les résultats expérimentaux et les prédictions des modèles, alors même que l'hypothèse du modèle de grande longueur d'onde n'était pas parfaitement vérifiée expérimentalement ($\lambda \sim 2d$).

Le résultat obtenu sur la suspension modèle permet de valider la méthode proposée en situation isotherme. A une valeur de la vitesse de propagation du son dans le milieu, on peut associer la fraction en particules. La relation entre fraction solide et vitesse du son dépend des caractéristiques mécaniques et physiques des éléments constituant la suspension ainsi que de la fréquence utilisée. Comme les modèles prévoient une relation bijective dans un régime inertiel de grande longueur d'onde, il sera nécessaire de se placer dans des conditions favorisant ce régime. Il sera ensuite nécessaire pour chaque système de déterminer la relation entre la vitesse du son et la fraction solide. D'autres paramètres dont la température du milieu suspendant peuvent avoir un effet sur la vitesse de propagation du son.

3 Expérimentations sur le coulis de glace

3.1 Matériels et méthodes

Une solution aqueuse composée à 14% en masse de polypropylène-glycol (PPG) est élaborée au moyen d'un générateur à coulis à surface raclée. Les particules de glace ont un diamètre moyen de 100 μm . Le mélange est mis en écoulement sur une boucle expérimentale (Ffig. 4) et la température du fluide est progressivement amenée vers -5°C. Les débits imposés correspondent à un régime laminaire. Les expériences consistent à mesurer la vitesse du son lors de la génération du coulis.

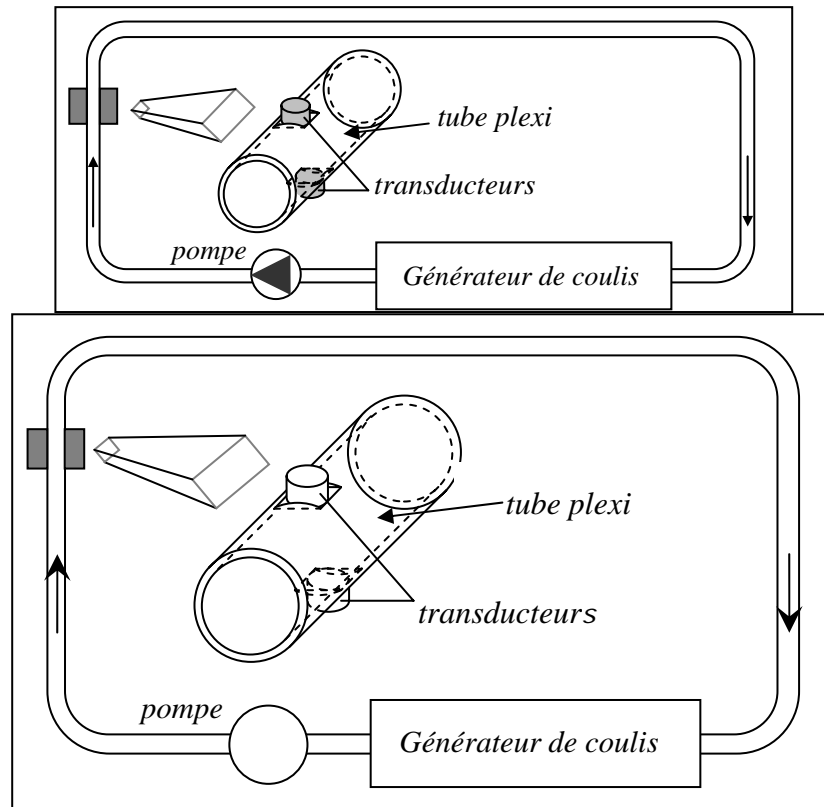


Figure 4 Représentation schématique du dispositif expérimental.

3.2 Mesures d'ondes ultrasonores sur le coulits de glace

La figure 5a présente la vitesse de propagation du son du mélange en fonction de la température et pour deux débits différents. Tant que la température reste supérieure à $-4,8^{\circ}\text{C}$, le fluide reste monophasique et on constate une diminution progressive de la vitesse du son avec la baisse de température. Ce résultat est en très bon accord avec les travaux précédents de Zafarani – Moattar et al. [32]. De $-4,8^{\circ}\text{C}$ à -6°C , on observe une forte augmentation de la vitesse du son ce qui correspond à la phase de formation des particules de glace.

Cette étude préliminaire sur le coulits de glace met en évidence deux points importants :

- La mesure de la vitesse du son permet de distinguer clairement un coulits avec particules d'un fluide monophasique.
- La vitesse d'écoulement a un effet négligeable sur la vitesse de propagation du son.

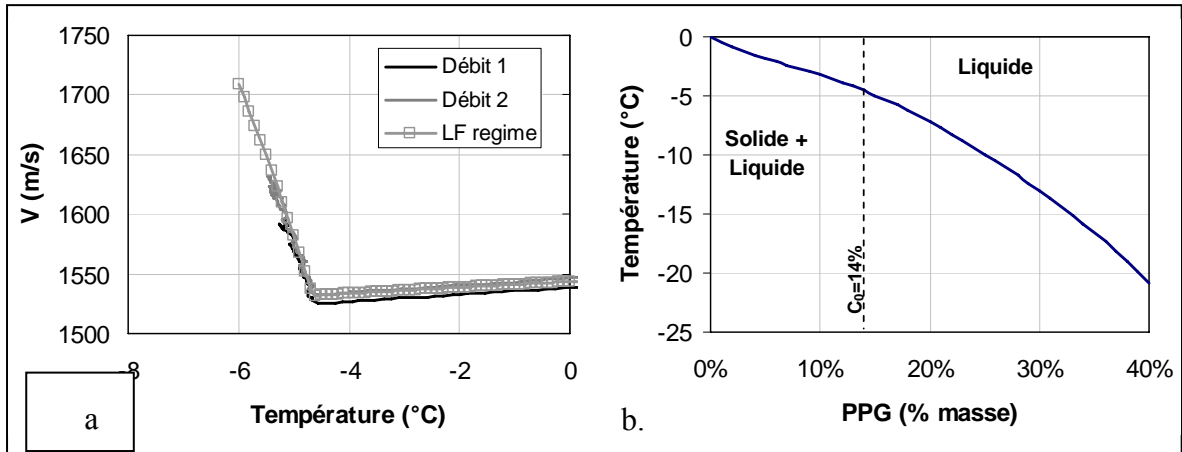


Figure 5 a. Vitesse du son en fonction de température pour un coulis de glace. b. diagramme des phases eau/PPG.

Il s'agit maintenant d'établir la relation entre la vitesse du son et la concentration massique. Nous proposons pour se faire de caler les résultats des modèles acoustiques sur les résultats expérimentaux. Ce calage nécessite de connaître la fraction solide de glace ainsi que l'évolution en fonction de la température des compressibilités et des masses volumiques des constituants du milieu. A partir du diagramme thermodynamique du mélange eau-polypropylène-glycol (PPG) (Ffig. 5b), il est possible de déterminer pour une température donnée, en admettant que l'équilibre thermodynamique est atteint, la fraction massique en glace. De plus, ce diagramme permet d'évaluer l'évolution de la composition du liquide au cours de la formation des cristaux de glace. En outre, les compressibilités et les masses volumiques des constituants ont été mesurées par Zafarani-Moattar et al. sur des mélanges eau/PPG dans des gammes de température de 10 à 40°C [3]. Les tendances observées par ces auteurs ont été extrapolées dans nos gammes de température. Grâce à ces hypothèses, il a été possible de caler un modèle de milieu effectif en régime visqueux [1, 2] [3] (courbe "LF régime" de Fig. de la figure 5a) sur les données expérimentales. Il est alors possible de représenter la fraction massique en particules en fonction de la vitesse du son dans le coulis (Fig. figure 6). Cette relation apparaît dès la formation des premiers cristaux comme bijective et tend à montrer la faisabilité d'une détermination de la concentration en particules à partir d'une mesure de la vitesse du son.

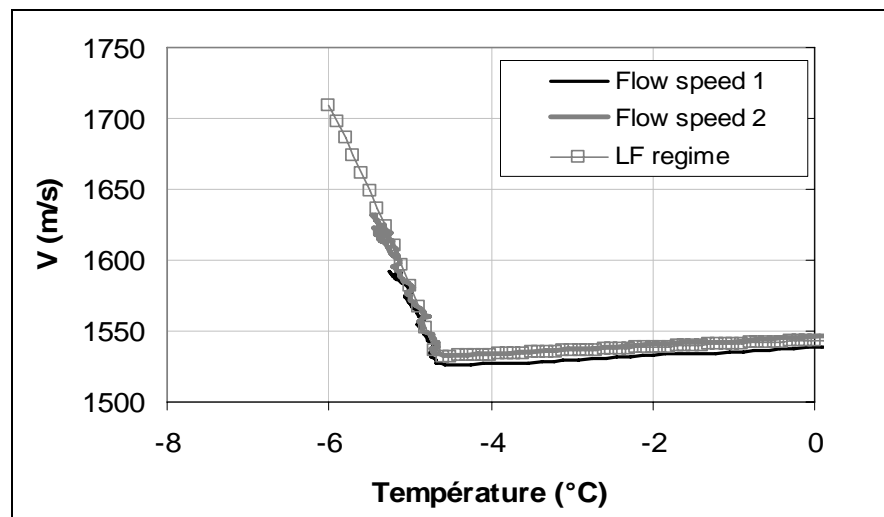


Figure 5 Vitesse du son en fonction de température pour un coulis de glace en cours de réchauffement.

Il s'agit maintenant d'établir la relation entre la vitesse du son et la concentration massique. A partir du diagramme thermodynamique du mélange eau-polypropylène-glycol (PPG), il est possible de déterminer pour une température donnée, en admettant que l'équilibre est atteint, la fraction massique en glace. Avec cette hypothèse, il devient possible de caler un modèle de milieu effectif en régime visqueux [3] (courbe "LF régime" de la figure 5) sur les données expérimentales. Il est alors possible à partir du modèle et de l'hypothèse d'équilibre thermodynamique, de représenter la fraction massique en particules en fonction de la vitesse du son dans le coulis (figure 6). Cette relation apparaît dès la formation des premiers cristaux comme bijective et tend à montrer la faisabilité d'une détermination de la concentration en particules à partir d'une mesure de la vitesse du son.

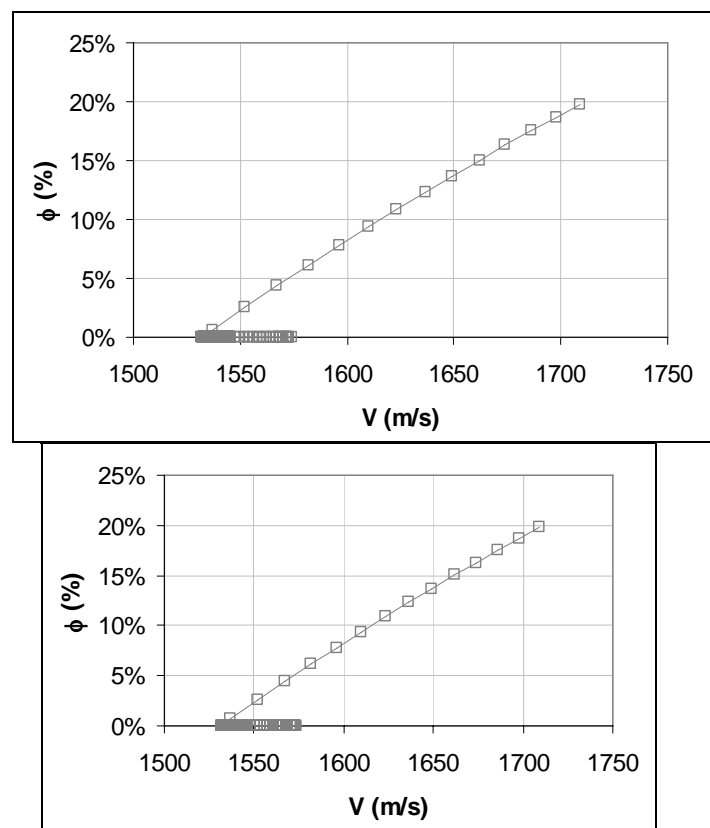


Figure 6 Concentration massique en glace en fonction de la vitesse du son.

4. Conclusion

Cette recherche a permis de valider la possibilité d'une détermination de la fraction solide par mesure de la vitesse du son dans une suspension modèle billes de PMMA/polyéthylène glycol, ainsi que la faisabilité d'une mesure de vitesse du son sur un coulis de glace en cours de changement de phase. Ces premiers travaux sur le coulis de glace ont permis de proposer finalement une courbe permettant de relier la mesure de la vitesse du son dans les suspensions à la fraction solide. L'analyse des amplitudes des signaux transmis et

l'utilisation de modélisations seront peut-être à envisager dans les prochaines phases de ce projet notamment dans le cas où la seule mesure de la vitesse du son ne serait pas suffisante pour remonter à la fraction solide. Les prochaines étapes porteront sur l'étude de nouvelles suspensions comme les coulis stabilisés [4-5] ou des coulis d'hydrates [56]. Des mesures acoustiques plus sophistiquées de diffusion d'ondes pourront être envisagées.

Références

- [1] C.M. Atkinson, H. K. Kytömaa, Acoustic wave speed and attenuation in suspensions, *Int. J. Multiphase Flow* 18 (1992), 577-592
- [2] M. Hoyos, J. C. Bacri, J. Martin, D. Salin, A study of the sedimentation of noncolloidal bidisperse, concentrated suspensions by an acoustic technique, *Phys. Fluids* 6, 3809 (1994), 3809-3817
- [3] M.T. Zafarani-Moattar., F. Samadi, R. Sadeghi, Volumetric and ultrasonic studies of the system (water+polypropylene glycol 400) at temperatures from (283.15 to 313.15) K, *J. Chem. Thermodynamics* 36 (2004) 871–875
- [4]L. Royon, Physical properties of stabilized ice slurry for transport of cold thermal energy, *Int. Sci. J. for Alt. Energy & Ecology*, 6, 62, 183 – 186, 2008
- [5][4] L. Royon, G. Guiffant, Heat transfer properties and phenomenological description for latent heat storage on stabilized slurry of paraffin, *Energy Conv. Management*, soumis Oct. 2008.
- [6][5] M.C. Martínez, D. Dalmazzone, W. Fürst, A. Delahaye, L. Fournaison, Thermodynamic properties of THF + CO₂ hydrates in relation with refrigeration applications, *AIChE J.* 54, 4, (2008), 1088-1095.