



HAL
open science

Caractérisation d'écoulements diphasiques eau-air par IRM

Didier Stemmelen, Sebastien Leclerc, Arthur V S Oliveira, Muriel Lelong,
Antoine Archer

► **To cite this version:**

Didier Stemmelen, Sebastien Leclerc, Arthur V S Oliveira, Muriel Lelong, Antoine Archer. Caractérisation d'écoulements diphasiques eau-air par IRM. Congrès Français de Mécanique 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-03815090

HAL Id: hal-03815090

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03815090v1>

Submitted on 14 Oct 2022

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.

Caractérisation d'écoulements diphasiques eau-air par IRM

D. STEMMELEN^a, S. LECLERC^a, A. OLIVEIRA^a, M. LELONG^b,
A. ARCHER^b

a. LEMTA, UMR 7563 CNRS, Université de Lorraine, F-54000 Nancy
didier.stemmelen@univ-lorraine.fr

b. EDF R&D, MFEE, 6 Quai Watier, 78400 Chatou
antoine.archer@edf.fr

Résumé :

On s'intéresse à la possibilité d'utiliser les techniques de RMN et d'IRM pour caractériser des écoulements à bulles. On considère d'abord le cas du mouvement ascendant de bulles d'air dans un liquide stagnant. On examine ensuite la faisabilité de mesures lorsqu'on met en mouvement le liquide. Pour ce faire, une boucle diphasique eau-air (ROMANE) traversant un spectromètre RMN a été assemblée. Nous donnons les tout premiers résultats obtenus à l'aide de cette boucle.

Abstract :

We are interested in the possibility of using NMR and MRI techniques to characterize bubbly flows. We first consider the case of the upward movement of air bubbles in stagnant water. The feasibility of measurements when the liquid is set in motion is then examined. To do this, a water-air loop (ROMANE) passing through an NMR spectrometer was assembled. We give the very first results obtained using this experimental device.

Mots clefs : colonne à bulles ; diphasique ; liquide-gaz ; RMN ; IRM.

1 Introduction

La caractérisation d'écoulements diphasiques liquide-gaz dans des géométries complexes (échangeurs, réacteurs, mélangeurs, pompes, bouilleurs, séparateurs...) se heurte aujourd'hui encore au manque de techniques non intrusives efficaces. La résonance magnétique nucléaire (RMN) est sensible à la présence des noyaux d'hydrogène et notamment ceux portés par les molécules d'eau. Elle devrait permettre de faire des mesures de concentration (taux de vide) et de vitesse dans des écoulements eau-air sans que la complexité de la géométrie ne soit un handicap. Notre objectif est d'examiner si les techniques de RMN, et notamment l'imagerie par résonance magnétique (IRM), peuvent être utilisées pour étudier des écoulements diphasiques eau-air. Car les travaux utilisant l'imagerie RMN pour étudier les écoulements diphasiques sont peu nombreux. Et s'il est possible d'en trouver pour les écoulements

liquide-liquide [1-4], cela est beaucoup plus rare pour les écoulements liquide-gaz. En effet, la technique de RMN ne voit que le liquide (eau) et ne fournit aucun signal mesurable pour les phases gazeuses et solides, ce qui rend plus difficile la caractérisation de l'écoulement. C'est pourquoi une grande partie des travaux portent sur des écoulements à bulles dans des colonnes de fluide stagnant [5-6]. A notre connaissance, très peu de travaux utilisant les techniques de RMN ou d'IRM s'intéressent aux écoulements liquide-gaz avec le liquide en mouvement [7-8]. La difficulté majeure de la problématique provient des délais très courts de passage des bulles dans la zone de détection par RMN.

2 Equipement RMN / IRM

Toutes les expériences ont été faites sur un spectromètre RMN à haut champ (Avance III 600 MHz WB Bruker). Il est équipé d'un dispositif de micro-imagerie (MicWB57 Bruker) fournissant des gradients de champ jusqu'à 45 G/cm et d'une sonde volumique (Mini0.5 Bruker). Cette sonde permet d'exciter les noyaux d'hydrogène et de récupérer le signal de résonance dans un cylindre de 38 mm de diamètre et d'une longueur équivalente, ce qui définit la zone de détection. Notre but était donc, en utilisant des techniques de RMN et d'IRM, d'étudier le mouvement de bulles d'air dispersées dans un écoulement d'eau vertical ascendant.

Le champ magnétique délivré par l'aimant du spectromètre RMN, mais aussi les gradients de champ magnétique produits par le système de gradient doivent être les plus homogènes possible au sein des fluides considérés pour réaliser des mesures précises. Si pour un écoulement monophasique liquide cette condition est en général vérifiée, elle est beaucoup plus difficile à assurer dans le cas d'écoulements liquide-gaz. La présence de nombreuses interfaces et aussi la différence de susceptibilité magnétique entre le liquide et le gaz en sont les raisons principales. Soulignons enfin que les méthodes classiques d'IRM sont le plus souvent trop lentes pour acquérir une image 2D donnant le contour précis de bulles se déplaçant à des vitesses supérieures à 0,2 m/s. C'est pourquoi nous avons dû privilégier des mesures moyennées en temps et des profils 1D plus rapides à acquérir que des images 2D.

3 Résultats expérimentaux

3.1 Injection de bulles dans une colonne de liquide stagnant

En suivant un ordre croissant de difficulté, nous avons d'abord étudié la situation d'un train de bulles d'air injectées dans une colonne d'eau stagnante. Le diamètre de la colonne (26 mm) a été choisi pour pouvoir s'insérer à l'intérieur de la sonde d'IRM. L'injection de gaz a été faite par l'intermédiaire d'un tube capillaire en verre de diamètre intérieur 0,2 mm et à l'aide d'un pousse-seringue. Ce cas de figure, avec des bulles isolées, a permis de mettre au point différentes techniques de RMN et d'IRM.

3.1.a Mesure globale du taux de vide moyen $\bar{\alpha}$ par RMN

La mesure globale du taux de vide moyen $\bar{\alpha}$ par RMN est simple et consiste à mesurer l'intégralité du signal RMN résultant de l'excitation des protons ^1H dans la zone de détection de la sonde d'IRM. L'intégrale du spectre RMN (obtenu après transformée de Fourier) est en principe proportionnelle à la quantité de protons détectés (Fig. 1). On récupère le spectre RMN d'abord sans bullage qui donne le signal de référence S_{ref} . La mesure RMN est faite ensuite en condition de bullage et donne S . Le taux de vide moyen $\bar{\alpha}$ se calcule aisément à partir de ces deux mesures :

$$\bar{\alpha} = \frac{S_{ref} - S}{S_{ref}}$$

Afin d'améliorer la précision des mesures, nous accumulons 1024 spectres. L'acquisition de ces spectres dure entre 7 et 9 minutes. Le taux de vide obtenu par cette méthode correspond donc à une moyenne à la fois en espace (sur la zone de détection de la sonde occupée par le fluide) et en temps (sur la durée de l'acquisition). Les mesures faites par cette technique peuvent être utilisées pour relier les taux de vide moyens mesurés dans la colonne, aux débits d'air injectés.

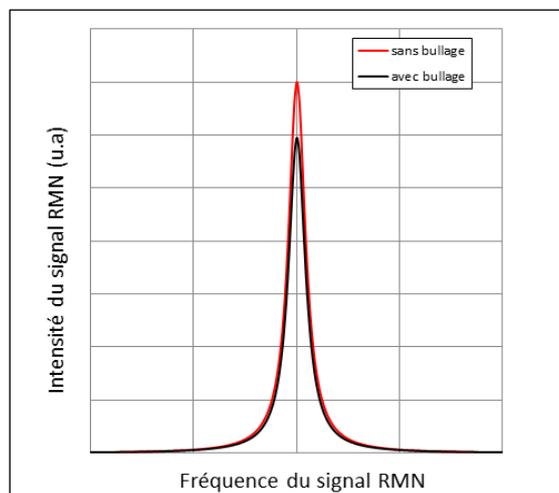


Figure 1 : Spectres RMN relatifs au volume d'eau détecté par la sonde (en rouge : colonne remplie d'eau ; en noir : avec présence de bulles).

3.1.b Profils 1D verticaux de taux de vide $\alpha(z)$ / Carte temporelle $\alpha(z,t)$

Profils verticaux de taux de vide : $\alpha(z)$

Les mesures de l'intensité du signal RMN (proportionnelle à la quantité d'eau) sont faites par une séquence d'écho de spin rapide. La localisation du signal RMN, pour l'obtention de profils, est obtenue en imposant un gradient de champ magnétique suivant la verticale (sans sélection de tranche). Les valeurs locales du signal correspondent à une valeur moyenne dans une tranche cylindrique (Fig. 2). Les mesures peuvent être cadencées avec un temps de répétition relativement court (TR=25 ms).

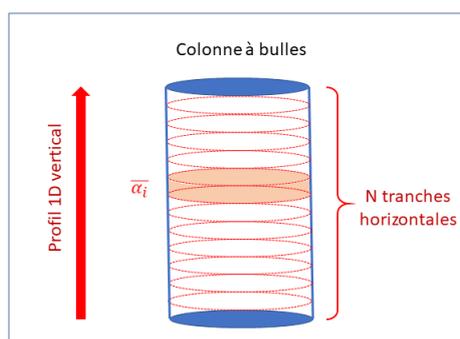


Figure 2 : Définition des profils 1D verticaux.

On mesure au préalable un profil vertical avec le dispositif rempli d'eau (sans bullage). L'acquisition de ce profil est répétée de nombreuses fois (2000 fois) de façon à augmenter le rapport signal sur bruit de ce profil de référence. Le profil vertical de taux de vide $\alpha(z)$ est alors obtenu comme précédemment à partir du profil vertical instantané (1 seul scan avec bullage) et du profil de référence (sans bullage). La figure 3 donne un exemple de la modification du signal de référence (sans bulles) lors du passage d'une bulle (profil instantané en bleu).

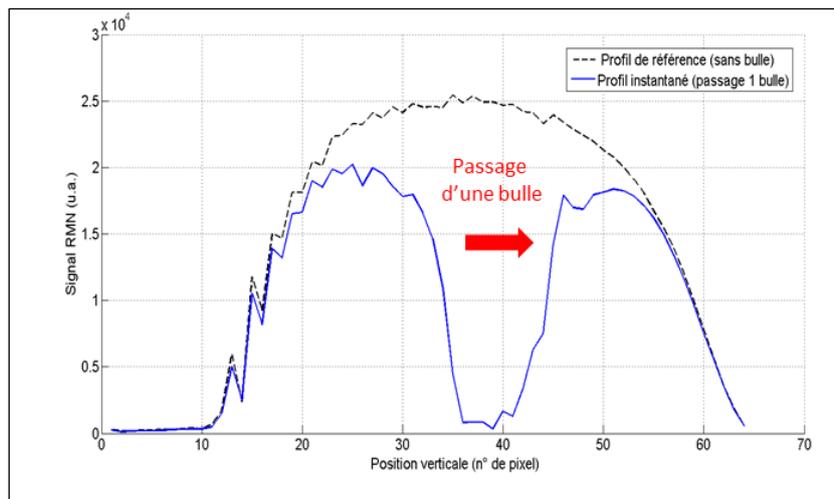


Figure 3 : Profils RMN-1D pour la mesure de profils verticaux de taux de vide

Cartes de taux de vide : $\alpha(z,t)$

Les profils de signal d'écho RMN sont acquis avec une période $TR=25$ ms durant environ 50 s. En juxtaposant tous les profils, on enregistre une carte d'évolution temporelle correspondant à 2000 profils. Cette carte est ensuite convertie en termes de taux de vide en normalisant toujours de la même façon les profils de signaux RMN par le profil moyen de référence. Nous obtenons (Fig. 4) une carte du taux de vide à une position verticale z dans la colonne de fluide et en fonction du temps t : $\alpha(z,t)$. Cette carte fait apparaître des stries presque verticales, à taux de vide plus élevé, qui correspondent au passage de bulles.

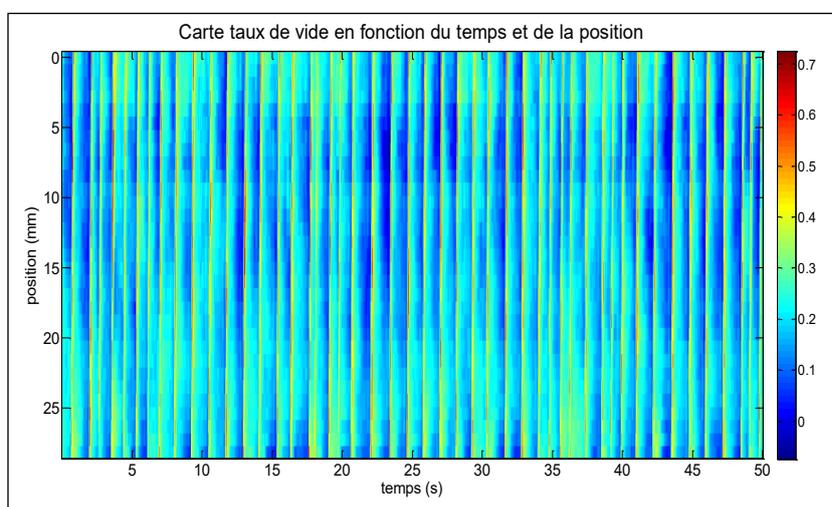


Figure 4 : Carte de taux de vide $\alpha(z,t)$

En les zoomant suivant le temps, ces cartes de taux de vide permettent de récupérer des informations importantes concernant le mouvement des bulles à savoir, leur fréquence de passage, leur dimension verticale et leur vitesse ascensionnelle. Une validation partielle de ces mesures a pu être faite en observant par caméra rapide le mouvement des bulles dans les mêmes conditions mais en dehors du spectromètre RMN. Nous donnons dans le tableau 1 une comparaison des mesures faites par IRM et par caméra rapide dans le cas de l'utilisation de l'injecteur capillaire (train de bulles isolées).

| Nom du fichier IRM | Débit gaz imposé (ml/min) | MESURES PAR IRM | | | MESURES PAR CAMERA RAPIDE | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------|----------------|--------------------------------|---------------------------|----------------|--------------------------------|
| | | f (Hz) | Vitesse (cm/s) | $d_{\text{équiv. bulle}}$ (mm) | f (Hz) | Vitesse (cm/s) | $d_{\text{équiv. bulle}}$ (mm) |
| LS1-24 | 1 | 1,82 | 29 | 2,60 | 2,8 | 32,3 | 2,6 |
| LS1-26 | 2 | 3,60 | 29 | 2,61 | 3,6 | 32,3 | 2,7 |
| LS1-28 | 5 | 8,60 | 29 | 2,65 | 7,5 | 30,9 | 2,8 |
| LS1-30 | 10 | 17,0 | 29 | 2,66 | 14,4 | 31,7 | 2,9 |
| LS1-32 | 20 | 13,0 | 29 | 3,66 | 13,0 | 30,8 | 3,0 |

Tableau 1 : Comparaison des mesures faites par IRM et par caméra rapide

Malgré quelques écarts entre les mesures par IRM et celles par caméra rapide, la comparaison est globalement bonne. Les écarts observés sont dus à la difficulté de reproduire exactement les mêmes conditions d'écoulement à l'intérieur et hors de l'aimant. Le bon indicateur est la fréquence de passage des bulles qui peut être mesurée avec une bonne précision dans les deux cas. Lorsque les fréquences coïncident (2 ml/min et 20 ml/min) la comparaison est excellente.

3.1.c Profils 1D horizontaux de taux de vide $\alpha(x)$ / Carte temporelle $\alpha(x,t)$

Profils horizontaux de taux de vide : $\alpha(x)$

Nous mesurons par une séquence d'écho de spin rapide les profils d'intensité du signal RMN suivant une direction horizontale de la colonne. Une double sélection de tranche permet de délimiter un petit volume parallélépipédique allongé (allumette) positionné de préférence suivant un diamètre de la colonne (Fig. 5). Généralement nous utilisons une sélection de tranche de 5 mm, suivant à la fois la verticale et la direction horizontale perpendiculaire à la direction radiale souhaitée. Dans la direction radiale, le volume de mesure de longueur 40 mm (FOV) est découpé en 64 voxels. Finalement les dimensions des voxels de mesure sont de $5 \times 5 \times 0,625 \text{ mm}^3$.

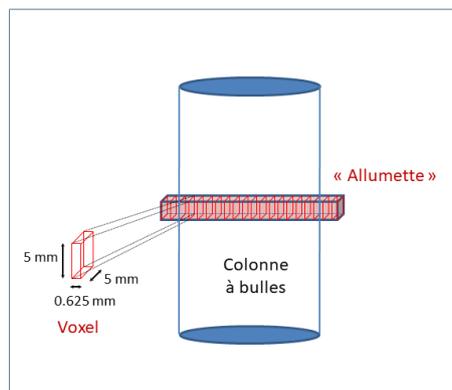


Figure 5 : Définition des profils 1D horizontaux « en allumette »

On utilise, comme précédemment, une localisation horizontale du signal RMN en imposant un gradient de champ magnétique (gradient de lecture), suivant la direction radiale horizontale cette fois-ci. Cette discrétisation radiale est donc faite sans sélection de tranche et sans avoir besoin d'incrémenter le gradient de lecture, ce qui permet d'acquérir plus rapidement les profils. Pour nos expériences, les profils de signal d'écho RMN peuvent être obtenus avec un temps d'acquisition de 12 ms par profil. Les profils de taux de vide sont calculés, comme précédemment, à partir d'une mesure de référence obtenue dans les mêmes conditions sans passage de bulles.

Cartes de taux de vide : $\alpha(x, t)$

Comme pour les profils verticaux, il est possible de répéter l'acquisition des profils en allumette au cours du temps à une cadence de TR=25 ms pour obtenir des cartes de taux de vide dans la direction radiale.

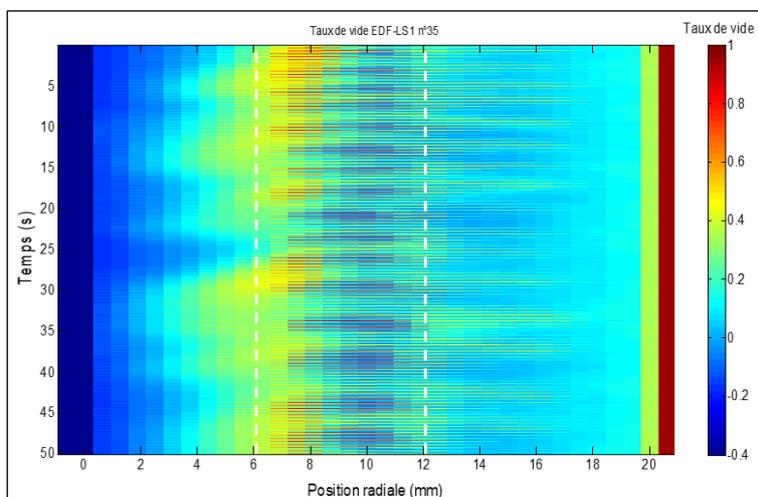


Figure 6 : Exemple de carte de taux de vide $\alpha(x,t)$ dans une colonne à bulles de diamètre intérieur 22 mm. Les pointillés en blanc délimitent la zone principale de passage des bulles.

Ces cartes temporelles de taux de vide (Fig. 6) permettent de recueillir des informations importantes concernant le mouvement des bulles : leur fréquence de passage, leur dimension horizontale et leur vitesse ascensionnelle.

3.1.d Profils 1D horizontaux de vitesse $V_z(x)$ / Carte temporelle $V_z(x,t)$ Profils horizontaux de vitesse axiale $V_z(x)$

On ajoute à la séquence RMN précédente (profil en allumette), deux impulsions de gradient encadrant l'impulsion radiofréquence à π (Fig. 7). Ceci permet d'effectuer un encodage de la phase du signal RMN, et par voie de conséquence de la vitesse du liquide suivant la direction du gradient d'encodage. Le déphasage $\Delta\varphi$ du signal RMN résultant d'un mouvement du liquide à la vitesse V dans la direction du gradient d'encodage s'écrit :

$$\Delta\varphi = (\gamma g \delta \Delta) V$$

avec :

- $\Delta\varphi$ le déphasage du signal RMN
- γ le rapport gyromagnétique du proton ($2,675 \cdot 10^8 \text{ rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
- g l'intensité des impulsions de gradient d'encodage de phase
- δ la durée des impulsions de gradient d'encodage de phase
- Δ l'écart de temps entre les deux impulsions de gradient d'encodage de phase
- V la vitesse du liquide dans la direction des gradients d'encodage de phase.

La direction des gradients d'encodage est importante car c'est elle qui donne la composante de la vitesse mesurée. Nous privilégions ici la composante V_z suivant la direction verticale, mais il est tout à fait possible de récupérer V_x et V_y en modifiant l'orientation des gradients d'encodage dans la séquence RMN. Le déphasage $\Delta\varphi$ peut être obtenu de diverses façons par différence de deux mesures : l'une avec un gradient g donné, l'autre avec un gradient nul $g=0$, ou bien en choisissant deux gradients différents g_1 et g_2 et en prenant $g = g_1 - g_2$, ou encore en faisant une mesure avec un gradient g pour le liquide se déplaçant à la vitesse V et en faisant la même mesure avec le gradient g , mais cette fois-ci avec le liquide immobile ($V=0$).

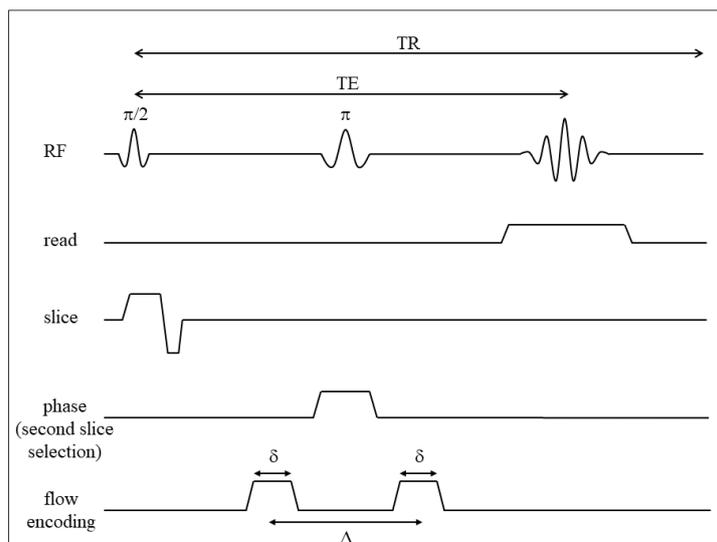


Figure 7 : Séquence d'écho de spin rapide avec double sélection de tranche (en allumette). Les 2 impulsions de gradient ('flow encoding') permettent de réaliser l'encodage de phase.

Cartes de vitesse axiale $V_z(x,t)$

Comme pour les cartes précédentes, nous faisons l'acquisition des profils radiaux de la vitesse axiale (le gradient g est imposé dans le sens vertical) répétée au cours du temps toutes les 25 ms durant 50 s. Cette carte est ensuite convertie en termes de vitesse à l'aide d'un programme Matlab (post-traitement) en effectuant notamment les différences de phase à partir d'un profil de référence.

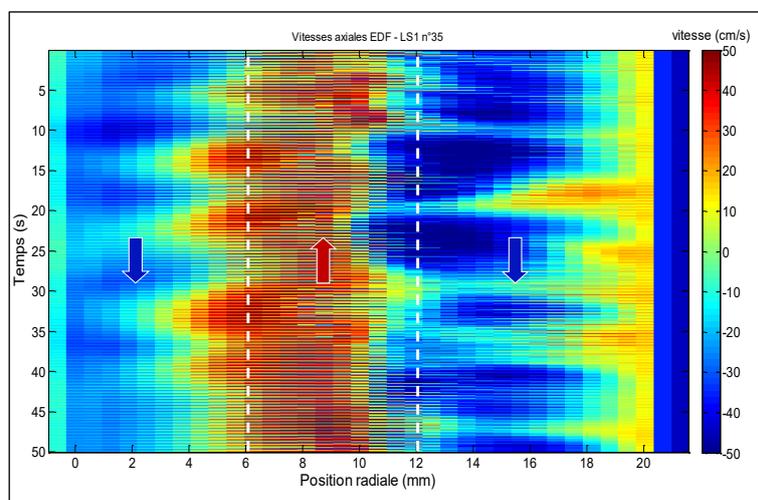


Figure 8 : Carte de vitesse axiale $V_z(x,t)$ de l'eau dans une colonne à bulles de diamètre intérieur 22 mm. Les pointillés en blanc délimitent la zone de passage des bulles conformément à la figure 6. Les flèches en rouge et en bleu indiquent respectivement le mouvement moyen ascendant de l'eau au voisinage des bulles et descendant sur les bords de la colonne.

Nous donnons (Fig. 8) un exemple d'une carte de vitesse axiale $V_z(x,t)$. L'obtention d'une carte en densité (taux de vide) ou en vitesse, est obtenue en appliquant ou non le gradient d'encodage de phase. Nous avons reporté sur la figure 8 (pointillés blancs) la zone de passage des bulles identifiée à partir de la carte de taux de vide $\alpha(x,t)$ correspondante (Fig. 6). Ces cartes temporelles de vitesse axiale ont permis de faire ressortir le mouvement ascendant du liquide au voisinage des bulles durant leur déplacement, mais aussi le mouvement de retour du liquide vers le bas, le long des bords de la colonne à bulles.

3.2 Boucle diphasique ROMANE (RésOnance MAgnétique Nucléaire d'Écoulements diphasiques)

3.2.a Description de la boucle

Nous avons ensuite examiné l'écoulement eau-air co-courant ascendant dans une colonne verticale. Pour ce faire, nous avons réalisé une boucle diphasique traversant l'aimant du spectromètre RMN (Fig. 9 et 10). La pompe utilisée est à vis excentrée de type Moineau (PCM 16C6F) permettant de fournir un débit jusqu'à 300 L/min. L'avantage de ce type de pompe est de produire un débit constant non-pulsatoire. Le réglage du débit s'effectue en modifiant la vitesse de rotation de la vis à l'aide d'un variateur de fréquence. L'injection d'air s'effectue en bas de colonne à l'aide d'un injecteur pariétal cylindrique percé de 40 trous de diamètre 0,6 mm. Cette boucle permet d'effectuer des écoulements diphasiques eau-air (multi-bulles polydispersées) dans un tube vertical de diamètre intérieur 24 mm avec des débits d'eau pouvant atteindre 100 L/min et des débits d'air jusqu'à 10 NL/min (conditions normales : 0°C ; pression atmosphérique).

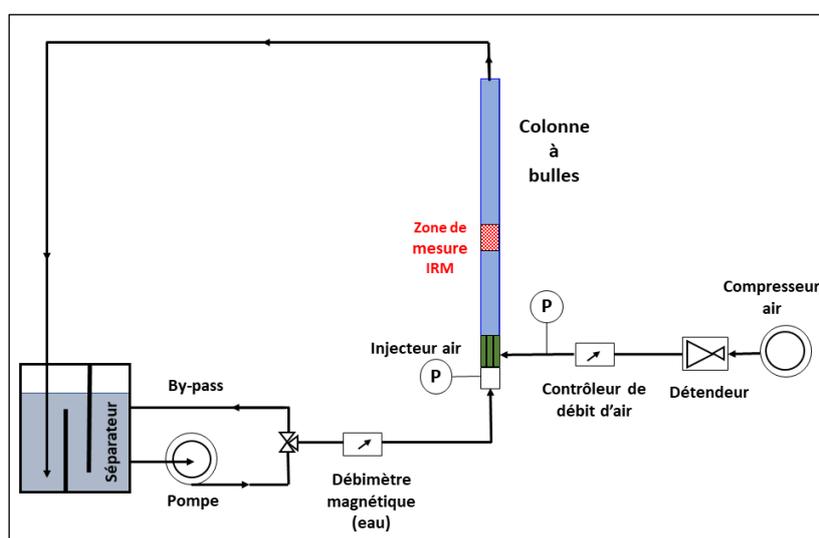


Figure 9 : Schéma de la boucle ROMANE.



Figure 10 : Photo de la boucle ROMANE traversant le spectromètre RMN.

3.2.b Mesures IRM sur la boucle ROMANE

La mise en mouvement du liquide à des vitesses supérieures à 1 m/s soulève de nombreux problèmes dans l'utilisation des méthodes RMN/IRM et nécessite de réduire les durées d'acquisition des séquences à seulement quelques millisecondes. D'emblée nous avons proscrit l'utilisation d'agents de contraste bien qu'ils permettent de réduire fortement les durées d'acquisition. En effet ces agents de contraste sont composés d'ions paramagnétiques (de charge 2^+ , voire 3^+) susceptibles de corroder les éléments métalliques constitutifs de la boucle fluide. Mais aussi ils perturbent les mesures faites par les capteurs de la boucle. Par ailleurs, la nécessité d'utiliser des séquences ultra-rapides a mis en défaut la plupart des séquences 1D utilisées précédemment. C'est notamment le cas des séquences de profils 1D en allumette (Fig. 5) qui utilisent une double sélection de tranche, d'une durée trop longue pour faire une détection correcte des spins du liquide en mouvement. Quant aux profils verticaux de taux de vide (Fig. 2), ils présentent peu d'intérêt dans le cas d'un écoulement multi-bulles polydispersées. En effet, l'information contenue dans chaque point du profil 1D correspond à un taux de vide moyen sur une tranche horizontale. En régime stationnaire, on doit obtenir un profil relativement plat avec un taux de vide proche de la valeur théorique calculée à partir des débits imposés de liquide et de gaz.

Dans la pratique, les profils que nous avons pu acquérir avec les précédentes techniques sont fortement perturbés à la fois par les artefacts créés par le passage des bulles, mais aussi par les effets de turbulence dans le liquide. Contrairement aux résultats que nous avons pu obtenir avec des trains de bulles en fluide stagnant, il n'est pas possible de faire un suivi temporel des bulles et d'en déduire des informations dimensionnelles sur les bulles ou leur mouvement.

Nous avons toutefois mis au point une séquence rapide permettant d'obtenir des profils horizontaux du taux de vide et de la vitesse axiale du liquide. La méthode consiste à ne faire qu'une seule sélection de tranche verticale, de préférence suivant un diamètre de la colonne à bulle (Fig. 11). Sur la tranche sélectionnée, on récupère un profil 1D, typiquement en 64 points. Le signal RMN collecté est une moyenne sur le volume de chaque voxel. Ces derniers sont très allongés dans la direction verticale puisqu'ils s'étendent sur toute la hauteur de la zone de détection de la sonde, c'est-à-dire environ 40 mm.

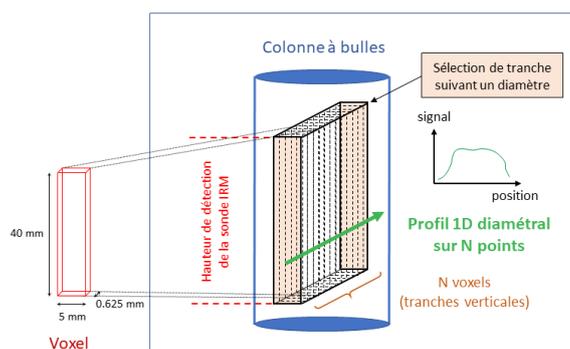


Figure 11 : Définition des profils 1D horizontaux en écho de gradient.

Cette technique peut être utilisée pour collecter un profil-1D horizontal de taux de vide $\alpha(x)$ mais aussi un profil-1D horizontal de vitesse $V(x)$. Dans ce cas, il est nécessaire d'appliquer une technique d'écho associée à des impulsions de gradient pour encoder la vitesse. La technique que nous privilégions est l'écho de gradient qui donne des réponses plus rapides que l'écho de spin. La séquence a été optimisée afin de réduire au maximum la durée du temps d'écho ($TE=4$ ms). Il est également nécessaire de faire un encodage de phase en appliquant les impulsions de gradient g_x , g_y ou g_z suivant la direction choisie. Par exemple, appliquer le gradient g_z permet de récupérer la composante verticale de la vitesse $V_z(x)$.

Le signal RMN que l'on acquiert est une grandeur complexe (au sens mathématique). Nous utilisons la phase du signal pour mesurer la vitesse, comme indiqué au §3.1.d. L'intensité du signal permet de mesurer le taux de vide de façon simultanée. Le caractère concomitant des deux mesures est évidemment un avantage. Cependant les mesures de taux de vide que nous avons obtenues de cette façon sont très éloignées de la réalité. Seule l'allure générale du profil horizontal de ce taux de vide semble avoir un intérêt car il indique des variations possibles et compréhensibles suivant la direction radiale de l'écoulement. Nous avons obtenu, par exemple, des profils de taux de vide traduisant une dissymétrie de l'écoulement des bulles de gaz dans la section du tube. Cette dissymétrie a pu être observée visuellement et provenait d'un défaut d'alimentation du gaz au niveau de l'injecteur. Il est toutefois possible de récupérer uniquement les taux de vide par une séquence plus rapide en supprimant l'encodage de phase dans la séquence, ce qui permet de réduire un peu plus le temps d'écho TE. Cela pourra être envisagé par la suite.

Nous donnons (Fig. 12) un exemple de profil horizontal de vitesse $V_z(x)$ pour un écoulement diphasique avec un débit liquide $Q_L \approx 13$ L/min et un débit gazeux $Q_G = 0,3$ NL/min. La mesure est moyennée suivant le temps puisque 500 acquisitions sont répétées durant un intervalle de temps d'environ 4 minutes. Le taux de vide moyen fixé est de 2,2%. La vitesse moyenne axiale mesurée par RMN ($\overline{V_z} = 0,417$ m/s) est du même ordre de grandeur que la vitesse moyenne calculée pour cet écoulement : $\overline{V_{zTh}} = 0,49$ m/s. Nous donnons à titre comparatif le profil radial de vitesse en écoulement monophasique (eau) obtenu dans des conditions similaires ($Q_L \approx 12$ L/min) et donc typique d'un écoulement turbulent ($Re \approx 10\ 500$). Il est à noter que ce profil de vitesse n'a pas été moyenné suivant le temps (une seule acquisition au lieu de 500, dans un intervalle de temps d'environ 1 s), ce qui explique son allure fluctuante. Le profil de vitesse obtenu pour l'écoulement diphasique présente une forte asymétrie pour les raisons mentionnées précédemment (dissymétrie de l'injection d'air). Compte tenu des profils de taux de vide obtenus simultanément, on montre aussi que la vitesse du liquide est plus grande dans les zones de contact avec les bulles où les taux de vide sont plus élevés.

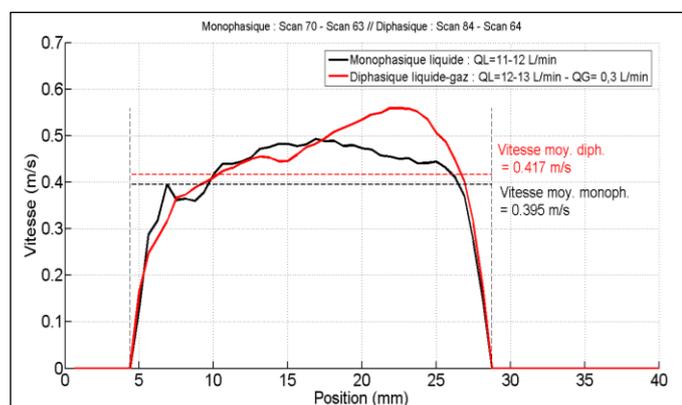


Figure 12 : Profils-1D horizontaux de vitesse $V_z(x)$ obtenus par IRM. En noir : monophasique - Débit liquide $Q_L \approx 12$ L/min. En rouge : diphasique - Débit liquide $Q_L \approx 13$ L/min. Débit gaz $Q_G = 0,3$ NL/min. Les lignes pointillées verticales matérialisent les bords du tube. Les traits pointillés horizontaux donnent les vitesses moyennes calculées à partir de ces profils.

Ces résultats correspondent aux tout premiers essais de la boucle ROMANE et de la nouvelle séquence IRM de profil-1D horizontal (taux de vide et vitesse axiale). Ils ne sont pas satisfaisants pour les taux de vide mais assez cohérents pour les vitesses axiales. Une fois validée pour l'écoulement eau-air dans un tube vertical, cette séquence sera utilisée pour étudier l'écoulement diphasique dans une géométrie complexe telle qu'un faisceau de tubes d'une partie d'un échangeur ou d'un assemblage combustible dans un réacteur nucléaire [9].

4 Conclusion

Au cours de ce travail, nous avons mis en œuvre une boucle d'écoulement diphasique liquide-gaz (ROMANE) dont la colonne à bulles traverse un équipement d'IRM. A notre connaissance, c'est la première fois qu'une installation de cette ampleur est réalisée avec la mise en mouvement du liquide à des vitesses dépassant le m/s.

Nous avons montré que les techniques d'IRM qui avaient été développées dans le cas d'écoulements à bulles en liquide stagnant ne fonctionnaient plus dès lors que le liquide était mis en mouvement. A la fois les effets de turbulence dans le liquide et les artéfacts créés par le passage d'un grand nombre de bulles nous obligent à proposer des séquences IRM ultra-rapides travaillant avec des temps d'écho très courts. Les techniques utilisant l'écho de spin, réputées plus propres, sont à proscrire car elles conduisent à des temps d'écho trop longs. Il est alors nécessaire d'utiliser des techniques d'écho de gradient. Pour les mêmes raisons, l'imagerie 2D ne peut être utilisée. Finalement il n'est possible de faire que des mesures globales sur tout le volume de la sonde, ou bien des profils 1D qui ne nécessitent pas d'incrémenter des gradients de champ pour coder la position des points de l'espace.

En tenant compte de ces diverses contraintes, nous avons pu mettre au point et programmer une nouvelle séquence de profil-1D horizontal en écho de gradient permettant de mesurer simultanément les taux de vide et une composante du vecteur vitesse. Les trois composantes du vecteur vitesse sont accessibles mais pas simultanément. Cette technique de profil-1D horizontal mérite d'être améliorée car les résultats qu'elle donne pour le moment sont relativement médiocres, surtout en ce qui concerne les taux de vide. Une fois améliorée et validée, elle pourra être mise à profit dans le cas d'écoulements diphasiques en géométries complexes.

Références

- [1] A. Amar, B. Blumich and F. Casanova, Rapid multiphase flow dynamics mapped by single-shot MRI velocimetry, *Chemphyschem*, Vol.11 (12), 2630-2638 (2010).
- [2] S. Lakshmanan, W.A. Maru, D. J. Holland, M.D. Mantle and A. J. Sederman, Measurement of an oil-water flow using magnetic resonance imaging, *Flow Measurement and Instrumentation*, 53, 161-171 (2017).
- [3] J. Hogendoorn, A. Boer, M.Appel, H. de Jong and R. de Leeuw, Magnetic Resonance Technology A New Concept for Multiphase Flow Measurement, 31st International North Sea Flow Measurement Workshop, 22-25 oct. 2013, Tønsberg, Norway.
- [4] J. Fannir, I. Panfilova, S. Leclerc and D. Stemmelen, Studying of parameters of two-phase displacement in porous media with MRI technique, *Mechanics & Industry*, 21, 5, (2020).
- [5] N.E. Daidzic, E. Schmidt, M.M. Hasan and S. Altobelli, Gas-liquid phase distribution and void fraction measurements using MRI, *Nuclear Engineering and Design* 235, 1163-1178 (2005).
- [6] A. Tayler, Experimental characterisation of bubbly flow using MRI, PhD thesis, University of Cambridge (2011).
- [7] J. Leblond, S. Javelot, D. Lebrun, L. Lebon, Two-phase flow characterization by nuclear magnetic resonance, *Nuclear Engineering and Design*, 184, 229-237 (1998).
- [8] M. Sankey, Z. Yang, L. Gladden, M.L Johns, D. Lister and B. Newling, SPRITE MRI of bubbly flow in a horizontal pipe, *J. Magnetic Resonance*, 199, 126-135 (2009).
- [9] A. Oliveira, D. Stemmelen, S. Leclerc, T. Glantz, A. Labergue, G. Repetto and M. Gradeck, Velocity field and flow redistribution in a ballooned 7x7 fuel bundle measured by magnetic resonance velocimetry, *Nuclear Engineering and Design*, 369, pp.110828 (2020).