UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES ÉCOULEMENTS EAU-AIR À HAUT TAUX DE VIDE DANS LES FAISCEAUX DE TUBES

FRANÇOIS DE KERRET
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
MARS 2016

© François de Kerret, 2016.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES ÉCOULEMENTS EAU-AIR À HAUT TAUX DE VIDE DANS LES FAISCEAUX DE TUBES

présenté par : DE KERRET François
en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. VÉTEL Jérôme, Doctorat, président
M. ÉTIENNE Stéphane, Doctorat, membre et directeur de recherche
M. PETTIGREW Michel, M. Sc., membre

DÉDICACE

À Noémie,
et sa famille ...

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont accompagné dans cette maîtrise recherche au sein de la Chaire industrielle de recherche BWC/EACL/CRSNG en Interaction Fluide-Structure de l'École Polytechnique de Montréal.

Je remercie tout particulièrement mon directeur de recherche Stéphane Etienne pour son écoute, ses conseils, et ses encouragements chaleureux tout au long du projet. J'ai été très heureux de travailler au sein de son équipe.

Cédric Béguin a été aussi d'une immense aide pour mon travail quotidien. Je ne peux pas compter tout le temps qu'il a passé à m'orienter et me guider au cours de ma maîtrise. Merci beaucoup !

Je voudrais aussi remercier Benedict Besner, pour son soutien face aux nombreux problèmes techniques auxquels j'ai dû faire face.

Un grand merci aussi aux plombiers, aux menuisiers, et tout particulièrement au technicien Guy Gironne pour leur aide lors de la fabrication du collecteur isocinétique.

Je remercie les étudiants de la chaire que j'ai eus beaucoup de plaisir à côtoyer au laboratoire comme Inès, Bastien, Hao, Arnaud, Léa, Stephen ou Constant. Merci aussi à ma famille et aux copains de Montréal comme Tristan, Sophie, Poum, Pib, Yass, Anaïs, Bastien, Lauriane, Burel, Gab, ELisabeth, Quentin, Léo, et Raf entre d'autres !

Je remercie le programme de la chaire BWC/EACL/CRSNG pour son soutien financier au long de ce projet.

RÉSUMÉ

Les écoulements diphasiques sont très présents dans l'industrie, que ce soit dans le secteur industriel pétrolier ou dans les générateurs de vapeur des centrales nucléaires. Nous nous intéressons particulièrement à ce dernier secteur, et notamment aux écoulements diphasiques à haut taux de vide se présentant dans la partie supérieure du générateur de vapeur, où un écoulement transverse aux tubes a lieu.

Dans cette région, les fluides exercent d'importants efforts sur les tubes, ce que nous voulons analyser. Pour cela il faut être capable dans un premier temps de déterminer le régime de l'écoulement diphasique, qui peut être à bulles, intermittent, ou encore annulaire. Il faut pour cela que nous caractérisions ces divers régimes. Pour déterminer la nature des écoulements, de nombreuses études ont été réalisées, mais la plupart d'entre elles étaient effectuées pour des écoulements internes dans des tubes cylindriques et non pour des écoulements externes transverses représentant la géométrie d'un générateur de vapeur.

Nous avons alors entrepris une campagne de mesures pour un écoulement transverse à un faisceau de tubes représentatif de la partie haute d'un générateur de vapeur. Nous nous sommes intéressés aux écoulements à haut débit de gaz qui sont particulièrement méconnus alors qu'ils sont potentiellement responsables de dégradations. À l'aide de mesures de pression et de taux de vide, nous avons caractérisé les divers régimes d'écoulements, et défini les débits de fluides pour lesquels chacun était visible. Nous avons obtenu des cartes d'écoulement plus complètes que celles présentées dans la littérature, grâce à une nouvelle méthodologie.

Nous nous sommes ensuite concentrés sur le régime d'écoulement pour lequel d'importantes fluctuations de pression sont visibles, car il s'agit du régime pour lequel les dégradations seront les plus importantes sur les tubes du générateur de vapeur. Nous avons alors mis en évidence deux types de fluctuations de pression à des fréquences différentes. Nous avons caractérisé les dépendances de ces fluctuations aux vitesses des fluides, à l'altitude dans la section, à la pression moyenne dans la section, ainsi qu'à la géométrie de la sortie.

Ainsi cette étude a permis, à l'aide d'une nouvelle méthodologie, d'apporter une nouvelle compréhension sur les comportements responsables de forces destructrices dans les générateurs de vapeur des centrales nucléaires.

ABSTRACT

Two-phase flows are very frequent in the industry, especially in the petroleum industry and in the nuclear industry. In steam generators of nuclear plants, water is heated so that at the top of the generator an important fraction of the water flows as gas. In this upper part a two phase flow transverse to the tube bundle takes place.

Fluids exert significant forces on the tubes in this area, and that is why we want to study this specific geometry. For this we must gather information on the flow conditions associated to the different two-phase flow patterns, which can be bubbly, intermittent, or annular. This requires that we characterize first those flow patterns. Many studies have been done to determine the nature of the flows, but most of them were carried out for internal flows in cylindrical tubes and not for transverse external flows typical of flow inside a steam generator.

We undertook an experimental campaign for a transverse flow in a tube bundle representative of the flow in a steam generator. We were particularly interested with flow patterns that contain high gas fraction. This kind of flow are particularly not well known and they are potentially responsible for damages. Using pressure and void fraction measurements, we characterized the flow patterns and their corresponding flow rates. We obtained a more complete flow pattern map than those presented in the literature, thanks to a new methodology.

We then focused on the flow pattern for which significant pressure fluctuations are noticeable. For this pattern, important damages are expected on the tubes of the steam generator. We showed that two types of pressure fluctuations occur at different frequencies. We characterized dependencies of these fluctuations in term of fluid velocities, location in the experimental setup, mean pressure, as well the geometry of the exit.

Thanks to a new methodology, this study brought a new understanding on causes of destructive forces in the steam generators of nuclear power plants.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vi

TABLE DES MATIÈRES vii

LISTE DES TABLEAUX x

LISTE DES FIGURES xi

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xv

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1
- 1.1 Phénomène étudié et contexte 1
- 1.2 Objectifs de recherche 2
- 1.3 Plan du mémoire 3

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 5
- 2.1 Analyse dimensionnelle du phénomène physique 5
- 2.2 Les configurations d'écoulements diphasiques 8
  - 2.2.1 Les configurations d'écoulements diphasiques en tube cylindrique . . 8
  - 2.2.2 Les configurations d'écoulements diphasiques en faisceau 9
- 2.3 Cartes d'écoulements 10
  - 2.3.1 Cartes d'écoulements en cylindre 10
  - 2.3.2 Cartes d'écoulements en faisceaux 12
- 2.4 Description des écoulements de type agité 16
  - 2.4.1 Méthode expérimentale pour étudier les écoulements agités 17
  - 2.4.2 Description des écoulements agités en tube cylindrique 17
  - 2.4.3 Description des écoulements agités en faisceau 17
- 2.5 Description des écoulements annulaires 24
  - 2.5.1 Méthodes expérimentales pour étudier les écoulements annulaires . . 24
  - 2.5.2 Description des écoulements annulaires en cylindre 26

2.5.3 Description des écoulements annulaires en faisceau de tubes 32

CHAPITRE 3 CONSIDÉRATIONS EXPÉRIMENTALES 33
3.1 Section d'essai 33
3.2 Boucle d'essai 34
3.2.1 Injection dans la section d'essai 35
3.2.2 Sortie de section d'essai 37
3.3 Appareils de mesure utilisés 37
3.3.1 Sondes optiques 37
3.3.2 Sondes de pression 39
3.3.3 Collecteur isocinétique 39
3.4 Conditions expérimentales étudiées 40

CHAPITRE 4 CARACTÉRISATION DES ÉCOULEMENTS 41
4.1 Post-traitement des données 41
4.1.1 Transformées de Fourier des signaux de pression 41
4.1.2 Fonctions de densité de probabilité de taux de vide 42
4.1.3 Post-traitement réalisé par Noghrehkar *et al.* (1999) 42
4.2 Caractéristiques des régimes d'écoulements 45
4.2.1 Écoulement à bulles 45
4.2.2 Écoulement à bouchons 46
4.2.3 Écoulement agité 47
4.2.4 Écoulement annulaire 49
4.3 Cartes d'écoulement 49
4.3.1 Frontières obtenues par l'analyse des signaux de pression 49
4.3.2 Frontières obtenues à l'aide de l'analyse des PDF 50
4.3.3 Comparaison de notre carte avec les cartes existantes 51
4.4 Conclusion 51

CHAPITRE 5 ANALYSE DES FLUCTUATIONS DE PRESSION 53
5.1 Influence de la vitesse et de β sur les fréquences et amplitudes des fluctuations de pression 54
5.1.1 Les deux pics à basse fréquence 54
5.1.2 Les pics à basse fréquence dans la littérature 54
5.1.3 Le pic à haute fréquence 55
5.1.4 Le pic à haute fréquence dans la littérature 56
5.1.5 Comparaison à la littérature en terme d'amplitude 57

5.2 Influence de la position dans la colonne sur les fluctuations de pression . . . 57
5.3 Dépendances à la position sur les trois pics 58
5.3.1 Changements de carte d'écoulement dûs à la position 58
5.3.2 Influence de la position dans la littérature 59
5.4 Corrélation des signaux des diverses positions 59
5.4.1 Les pics à basse fréquence. (premier et deuxième pics) 59
5.4.2 Le pic à haute fréquence. (troisième pic) 60
5.4.3 Cas particulier : la cohérence entre les positions 1 et 2 61
5.4.4 Corrélations des divers signaux dans la littérature 62
5.4.5 Hypothèses de l'origine des forces quasi-périodiques 63
5.5 Mesures de pression avec une nouvelle sortie 63
5.5.1 Influence de la sortie sur les positions 1 et 2 64
5.5.2 Influence de la sortie sur les positions 3 et 4 64
5.5.3 Changements de carte d'écoulement dûs à la position 66
5.5.4 Corrélation des signaux des diverses positions avec la nouvelle sortie . 67
5.5.5 Hypothèse de surpression due à la nouvelle sortie 68
5.5.6 Changement de carte d'écoulement dû à la nouvelle sortie 70
5.5.7 Interprétation de l'effet de la sortie 71
5.6 Discussion 72
5.6.1 Les fluctuations à basses fréquences 72
5.6.2 Les fluctuations à hautes fréquences 73
5.7 Conclusion 74

CHAPITRE 6 CONCLUSION 75
6.1 Synthèse des travaux 75
6.2 Limitations de la solution proposée 75
6.3 Travaux futurs 76

RÉFÉRENCES 77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Constantes et variables du modèle analytique 6
Tableau 3.1 Éléments numérotés de la boucle d'essai. 36
Tableau 3.2 Récapitulatif des caractéristiques des pompes et du circuit d'air . . . 36
Tableau 3.3 Récapitulatif des débitmètres utilisés. 36
Tableau 5.1 Récapitulatif des amplitudes des fluctuations de pression 58
Tableau 5.2 Récapitulatif des amplitudes des fluctuations de pression avec la sortie B 66
Tableau 5.3 Récapitulatif des configurations d'écoulement majoritairement observées au en fonction des positions et des sorties 71
Tableau 5.4 Récapitulatif des amplitudes des fluctuations de pression avec les deux sorties 73

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Représentation schématique du générateur de vapeur. 2
Figure 1.2 À droite section expérimentale utilisée pour représenter un faisceau de tubes schématisé à gauche. 3
Figure 2.1 Types de configurations en écoulement vertical ascendant dans un tube cylindrique d'après le cours de thermohydraulique de Altan Tapucu (2009). 9
Figure 2.2 Carte des écoulements de Taitel *et al.* (1980) en tube cylindrique de 30 mm diamètre. 11
Figure 2.3 Carte des écoulements de Kaichiro et Ishii (1984). 11
Figure 2.4 Schéma représentant les configurations triangulaires normale et tournée. 12
Figure 2.5 Schéma représentant les configurations carrée normale et carrée tournée. 13
Figure 2.6 Section expérimentale utilisée par Grant et Murray (1972). 13
Figure 2.7 Carte de type d'écoulements réalisé par Grant et Murray (1972). . . 14
Figure 2.8 Schéma expérimental de la section expérimentale de Ulbrich et Mewes (1994). 15
Figure 2.9 Oscillations de pression observées par Ulbrich et Mewes (1994). . . . 15
Figure 2.10 Carte d'écoulements réalisée par Noghrehkar *et al.* (1999) avec en traits pointillés les frontières obtenues par Ulbrich et Mewes (1994). 16
Figure 2.11 Montage expérimental utilisé par Pettigrew *et al.* (1989) 18
Figure 2.12 Faisceau utilisé par Pettigrew *et al.* (2005). 19
Figure 2.13 Spectre des forces de traînée (à gauche) et portance (à droite) en fonction de la vitesse homogène pour $\beta = 80\%$ d'après Pettigrew *et al.* (2005). 19
Figure 2.14 Section expérimentale utilisée par Zhang *et al.* (2007). (En noir les tubes équipés de capteurs) 20
Figure 2.15 Comparaison des forces de portance en fonction de la position des tubes dans le faisceau pour $\beta = 80\%$ avec a) U = 5m/s et b) U = 10m/s d'après Zhang *et al.* (2007). 21
Figure 2.16 Sections expérimentales utilisées par Zhang *et al.* (2009). 22
Figure 2.17 Position des mesures de force de Senez *et al.* (2010). 23

Figure 2.18 Fréquence typique des forces de traînée et de portance en fonction de la vitesse homogène à $\beta = 80\%$ pour Senez *et al.* (2010). 24
Figure 2.19 Section expérimentale utilisée par Perrot *et al.* (2011). 25
Figure 2.20 Fréquence du premier pic de force en a) pour la traînée et b) pour la portance observées par Perrot *et al.* (2011). 25
Figure 2.21 Schéma expérimental du collecteur, d'après Barbosa *et al.* (2002). . . 26
Figure 2.22 Quantité entraînée en fonction du nombre de Weber modifié et du nombre de Reynolds d'après Sawant *et al.* (2008). 29
Figure 2.23 Comparaison de la corrélation proposée aux données expérimentales obtenues par Sawant *et al.* (2008). 29
Figure 2.24 Schéma de la section du cylindre expliquant l'utilisation de variables de cœur. Cioncolini et Thome (2010) 31
Figure 2.25 Comparaison des données expérimentales à la corrélation de Cioncolini et Thome (2010). 31
Figure 3.1 À droite, section expérimentale utilisée pour représenter un faisceau de tubes lui même représenté à gauche. 33
Figure 3.2 Schéma représentant la section d'essai et les positions des points de mesure. 34
Figure 3.3 Schéma de la boucle expérimentale. 35
Figure 3.4 Photo de l'injection prévue initialement. 37
Figure 3.5 Photos de l'injection permettant un meilleur mélange. 38
Figure 3.6 Schéma explicatif du fonctionnement d'une sonde optique d'après Pettigrew *et al.* (2005). 38
Figure 3.7 Dimensions de la sonde optique utilisée. 39
Figure 3.8 Dessin technique du collecteur fabriqué pour étudier les écoulements annulaires sur la tour. 40
Figure 3.9 Conditions expérimentales accessibles. 40
Figure 4.1 Exemple de PDF et de Transformée de Fourier 43
Figure 4.2 Mise en évidence du défaut de méthodologie de Noghrehkar *et al.* (1999) 44
Figure 4.3 Dépendance de la PDF au choix de résolution sur ε. 45
Figure 4.4 PDF et transformée de Fourier caractéristiques pour un écoulement à bulles 46
Figure 4.5 PDF caractéristiques avec des longueurs d'échantillonnages différentes. 47
Figure 4.6 Exemples typiques de transformées de Fourier pour les écoulements agité-1 et agité-2. 48

Figure 4.7 Exemples typiques de PDF de taux de vide pour les écoulements agité-1 et agité-2. 48
Figure 4.8 Transformée de Fourier typique d'un écoulement annulaire avec β=98% et U=14.4 m/s. 49
Figure 4.9 Notre carte d'écoulements 50
Figure 4.10 Comparaison des résultats que nous obtenons avec ceux de la littérature 52
Figure 5.1 Tracés de la transformée de Fourier pour différentes vitesses homogènes U et $\beta = 97\%$ 53
Figure 5.2 Dépendances de la fréquence et de l'amplitude des pics à basse fréquence à la vitesse homogène pour $\beta = 96\%$ à la position 2 55
Figure 5.3 Dépendances de la fréquence et de l'amplitude à la vitesse homogène du troisième pic pour $\beta = 96\%$ à la position 3 56
Figure 5.4 Nombre de Strouhal calculé en fonction de la qualité volumétrique . . 57
Figure 5.5 Images des positions de mesure de pression 1 et 4 59
Figure 5.6 Tracés des transformées de Fourier en fonction des positions dans la section pour $\beta = 95\%$ 60
Figure 5.7 Cartes d'écoulement basées sur une seule position de mesure de pression 61
Figure 5.8 Corrélation fréquentielle entre les signaux obtenus aux positions 2 et 3, avec β=96% et U=6.3 m/s 62
Figure 5.9 Corrélation fréquentielle entre les signaux obtenus aux positions 2 et 3 63
Figure 5.10 Schéma de la sortie de la section d'essai utilisée pour les premières expériences 64
Figure 5.11 Comparaison des transformées de Fourier pour les positions 1 et 2 dans la section pour $\beta = 95\%$ avec les deux sorties 65
Figure 5.12 Dépendances de la fréquence et de l'amplitude des pics à basse fréquence à la vitesse homogène en position 2 pour $\beta = 96\%$ selon la sortie 66
Figure 5.13 Comparaison des transformées de Fourier pour les positions 3 et 4 dans la section pour $\beta = 95\%$ avec les deux sorties 67
Figure 5.14 Comparaison des cartes d'écoulement basées sur une seule position avec les deux sorties 68
Figure 5.15 Corrélation fréquentielle entre les signaux obtenus aux positions 3 et 4 avec la sortie B 69
Figure 5.16 Étude de l'effet de la pressurisation sur les fluctuations de pression . . 70
Figure 5.17 Comparaison des cartes d'écoulement que nous obtenons selon la sortie 71

Figure 5.18 Comparaison des cartes d'écoulement en changeant la sortie et en se basant sur des positions différentes 72

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Sigles :

PDF	Fonction de Densité de Probabilité
EACL	Énergie Atomique du Canada Limitée
CRNSG	Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada
BWC	Babcock and Wilcox Canada

Nombres dimensionnels :

- t le temps
- (x, y, z) la position
- P le pas, distance entre deux centres de tubes
- D le diamètre des tubes
- L la profondeur des tubes
- ρ_g la masse volumique du gaz
- ρ_l la masse volumique du liquide
- γ la tension superficielle gaz-liquide
- p_0 la pression de référence prise au milieu de la section
- ν_g la viscosité cinématique du gaz
- ν_l la viscosité cinématique du liquide
- g la gravité
- j_g la vitesse surfacique du gaz définie par $j_g = \dfrac{Q_g}{(P-D)L}$ avec Q_g le débit volumique de gaz
- j_l la vitesse surfacique du liquide définie par $j_l = \dfrac{Q_l}{(P-D)L}$ avec Q_l le débit volumique de liquide
- $U = j_l + j_g$ la vitesse homogène

Nombres adimensionnels :

- $\bar{t} = \dfrac{(j_g + j_l)t}{D} = \dfrac{Ut}{D}$ le temps adimensionnel
- $(\bar{x} = \dfrac{x}{D}, \bar{y} = \dfrac{y}{D}, \bar{z} = \dfrac{z}{D})$ la position adimensionnelle.

- $\beta = \dfrac{j_g}{j_g + j_l} = \dfrac{Q_g}{Q_g + Q_l}$ la qualité volumétrique
- $\dfrac{P}{D}$ le rapport du pas sur diamètre
- $\dfrac{L}{D}$ la profondeur adimensionnelle
- $\bar{\rho} = \dfrac{\rho_g}{\rho_l}$ le rapport de masse
- $\bar{\nu} = \dfrac{\nu_g}{\nu_l}$ le rapport de viscosité cinématique
- $We = \dfrac{\rho_g D j_g^2}{\sigma}$ le nombre de Weber qui représente le ratio entre inertie dans le gaz et tension de surface
- $Re_l = \dfrac{j_l D}{\nu_l}$ le nombre de Reynolds liquide
- $Fr = \dfrac{U}{\sqrt{Dg}}$ le nombre de Froude
- $\bar{p_0} = \dfrac{p_0}{\rho_g j_g^2 + \rho_l j_l^2}$ la pression adimensionnelle
- $\chi = \dfrac{1-\beta}{\beta\sqrt{\bar{\rho}}}$ le nombre de Lockhart–Martinelli.
- $\varepsilon = \dfrac{A_g}{A_g + A_l}$ le taux de vide avec A_g la surface occupée par le gaz et A_l la surface occupée par le liquide.
- $Mo = \dfrac{We^3}{Fr\,Re^4}$ le nombre de Morton
- $S = \dfrac{v_g}{v_l}$ le taux de glissement
- $E = \dfrac{Q_{le}}{Q_{le} + Q_{lf}}$ l'entraînement liquide en écoulement annulaire, avec Q_{le} le débit sous forme de gouttes entraînées dans le cœur, et Q_{lf} le débit d'eau sous forme de film.
- $\gamma = \dfrac{A_{le}}{A_{le} + A_{lf}}$ le rapport surfacique d'entraînement en écoulement annulaire, avec A_{le} la surface occupée par les gouttes, et A_{lf} la surface occupée par le film liquide.

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les interactions entre les structures et les fluides les entourant doivent être correctement comprises pour que les dimensionnements de ces dites structures soient adaptées. On cite entre autres exemples les effets de ballotement dans les cuves des méthaniers, ou le comportement d'un tuyau traversé d'eau. L'étude des interactions fluide-structure permet également de comprendre des phénomènes physiques, telle que la formation de tourbillons alternés de Von Karman (1931) derrière un objet cylindrique, ou encore l'effet du vent sur un champ de roseaux.

1.1 Phénomène étudié et contexte

Dans les générateurs de vapeur des centrales nucléaires, de l'eau est chauffée en s'écoulant à travers un faisceau de cylindres contenant de l'eau à 300 degrés Celsius, sous forme liquide cependant car pressurisée. Au cours de l'écoulement il y a ébullition du mélange externe aux tubes si bien qu'on a un écoulement diphasique liquide vapeur à travers ces cylindres. Cet écoulement induit alors des vibrations sur les tubes ce qui entraîne des dégradations qui ont été particulièrement destructrices pour la centrale de San Onofre, entraînant la fermeture de celle-ci en 2013 (John (2013)). Les vibrations les plus destructrices apparaissent dans la région des tubes en U, nommée couramment le chignon (voir Fig.1.1), et nous nous intéresserons précisément à celle-ci. Il faut noter que dans cette région l'écoulement est transverse aux tubes, comme cela est illustré sur la Fig. 1.2.

Pour être capable d'empêcher ces dégradations d'avoir lieu, il faut d'abord comprendre comment l'écoulement diphasique se comporte dans cette géométrie. Lorsqu'il y a peu de vapeur on observe un écoulement à bulles, puis au fur à mesure que le mélange diphasique est chauffé par les tubes, la quantité de vapeur dans l'écoulement augmente jusqu'à ce que l'on observe un écoulement de type "annulaire" pour les plus hauts débits de gaz. Le gaz occupe alors la majeure partie du volume, et l'eau est majoritairement transportée sous forme de gouttes portées par le gaz et un film liquide est chassé sur les paroi ce qui, dans le cas des écoulements internes, forme un anneau liquide d'où la dénomination écoulement annulaire. Ces écoulements annulaires, comme les autres écoulements visibles à haut taux de vide, ne sont pas encore bien décrits dans les faisceaux, ce qui empêche de prédire précisément les phénomènes vibratoires qu'ils induisent. Au delà de la question du nucléaire, un intérêt important est porté aux écoulements à haut taux de vide dans les tubes cylindriques, qui sont très présents notamment dans l'industrie pétrolière. En effet les colonnes montantes (risers) transportent

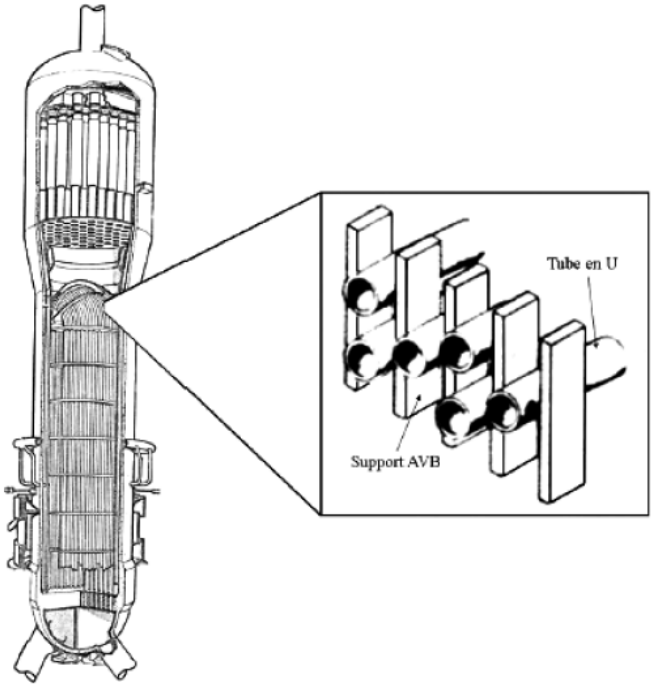


Figure 1.1 Représentation schématique du générateur de vapeur.

des mélanges à plusieurs phases dont on veut connaître le comportement pour prédire la perte de charge ainsi que les forces qu'ils peuvent exercer, notamment au niveau des coudes. Ces écoulements ne sont décrits que par des corrélations empiriques pour le moment et le fait de les étudier dans une nouvelle configuration pourrait permettre de mieux les comprendre.

1.2 Objectifs de recherche

Le "Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada", "Énergie Atomique du Canada Ltée" et "Babcock and Wilcox Canada" se sont associés pour fonder une chaire de recherche à l'École Polytechnique de Montréal pour étudier les interactions fluide-structure et surmonter des défis industriels complexes dans le domaine du nucléaire. Un des objectifs de cette chaire, la chaire EACL/BWC/CRSNG en Interaction Fluide-Structure de l'École Polytechnique de Montréal, est de prédire l'apparition des phénomènes vibratoires destructifs dans les générateurs de vapeur, et de proposer des critères pour les empêcher. Dans le cadre de cet objectif, nous voulons tout d'abord prédire la nature de l'écoulement dans le faisceau de tubes en fonction des débits de liquide et de gaz dans ce faisceau, lorsque les débits de gaz sont élevés. Aux débits que nous voulons étudier les écoulements typiques des générateurs de vapeur devraient être annulaires d'après notre compréhension de la littérature, mais il se

peut que des écoulements intermittents soient aussi observés. Ensuite nous voulons décrire le comportement de l'écoulement dans la section, notamment en terme de fluctuations de pression. Pour réaliser cela nous pourrons étudier l'écoulement transversal à travers un faisceau de tubes d'une section d'essai représentant une portion de faisceau comme cela est illustré sur la Fig. 1.2. Cette nouvelle compréhension ouvrira alors la voie à des simulations numériques pour prédire les forces exercées par l'écoulement sur les tubes.

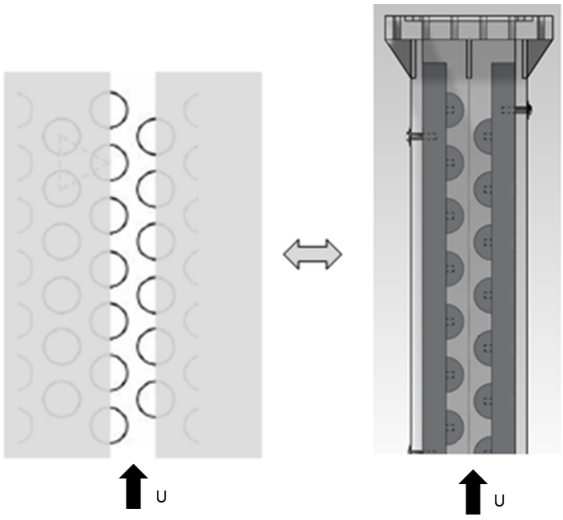


Figure 1.2 À droite section expérimentale utilisée pour représenter un faisceau de tubes schématisé à gauche.

1.3 Plan du mémoire

Dans un premier temps, nous présenterons une revue de littérature axée sur trois thèmes. Nous présenterons d'abord les écoulements diphasiques avec une analyse des cartes prédisant l'apparition des divers écoulements en fonction des débits des fluides, en tube cylindrique ou en faisceau. Cela nous permettra d'avoir une base de données à laquelle comparer nos résultats. Ensuite, nous continuerons avec une description des écoulements agités puis annulaires, en tube cylindrique et en faisceau de tubes. La partie concernant les travaux en faisceau comportera une grande part dévolue aux travaux expérimentaux effectués au sein de la chaire EACL/BWC/CRSNG en Interactions Fluide-Structure de l'École Polytechnique de Montréal. Le chapitre suivant la revue de littérature présentera en détail la section expérimentale utilisée tout au long de l'étude, ainsi que les difficultés rencontrées pour assurer son bon fonctionnement. Ensuite nous décrirons les résultats expérimentaux concernant la mise

en place des divers écoulements en faisceau de tube, réaliserons une carte d'écoulement, et la comparerons aux cartes de la littérature. Finalement, nous analyserons plus en détail les fluctuations de pression et caractéristiques des écoulements à haut taux de vide.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Après avoir réalisé une analyse dimensionnelle du problème, nous présenterons dans ce chapitre la littérature existante en la regroupant en différentes parties. Nous présenterons d'abord les différentes configurations d'écoulement existantes, les cartes d'écoulement pour prédire le régime d'écoulement en fonction des débits de fluide. Nous continuerons en décrivant précisément les écoulements à haut taux de vide, et les méthodes expérimentales pour les étudier. Nous présenterons à chaque fois les résultats obtenus en tubes cylindriques avant de présenter ceux en faisceau de tubes. Les tubes sont très utilisés dans l'industrie pour divers transports de mélanges diphasiques et il existe plus de données sur ces derniers que sur les faisceaux de tubes. Il est important de noter que les écoulements diphasiques désignent tous les écoulements comportant deux phases, mais que ce projet ne s'intéresse qu'aux écoulements liquide-gaz, et que toutes les expériences réalisées le seront avec de l'air et de l'eau.

2.1 Analyse dimensionnelle du phénomène physique

Un écoulement eau-air à travers un faisceau de tubes complètement rigide est décrit grâce aux paramètres dimensionnels :

- t le temps
- (x, y, z) la position
- P le pas, distance entre deux centres de tubes
- D le diamètre des tubes
- L la profondeur des tubes
- ρ_g la masse volumique du gaz
- ρ_l la masse volumique du liquide
- γ la tension superficielle gaz-liquide
- p_0 la pression de référence prise au milieu de la section
- ν_g la viscosité cinématique du gaz
- ν_l la viscosité cinématique du liquide
- g la gravité
- j_g la vitesse surfacique du gaz définie par $j_g = \dfrac{Q_g}{(P-D)L}$ avec Q_g le débit volumique de gaz
- j_l la vitesse surfacique du liquide définie par $j_l = \dfrac{Q_l}{(P-D)L}$ avec Q_l le débit volumique de liquide

j_g et j_l correspondent respectivement aux vitesses qu'auraient le gaz ou le liquide s'il occupait toute la section de passage. La section de passage n'est pas constante, et celle que nous considérons pour calculer les vitesses est basée sur la distance intertube (P-D). Il ne faut pas les confondre avec v_g et v_l qui sont les vitesses réelles des fluides dans leurs phases respectives. On définit également la vitesse homogène $U = j_g + j_l$. Nous pouvons récapituler dans le tableau 2.1 les différents paramètres ainsi que leurs unités pour être ensuite capable de créer les nombres adimensionels les plus adaptés.

Tableau 2.1 Constantes et variables du modèle analytique

Symbole	t	x	y	z	j_g	j_l	P	D	L	ρ_g	ρ_l	γ	p_0	ν_l	ν_g	g
Longueur	0	1	1	1	1	1	1	1	1	-3	-3	0	-1	2	2	1
Masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
Temps	1	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	-2	-2	-1	-1	-2

D'après le théorème de Vaschy-Buckingham décrit dans De Langre (2001), les variables dépendantes de l'écoulement comme la vitesse ou la pression en tout point peuvent s'écrire en fonction d'un certain nombre de paramètres adimensionels. On a $N = 16$ paramètres, ce qui fait que tout nouveau nombre adimensionnel pourra s'écrire uniquement à l'aide de 13 paramètres adimensionnels. On propose les 13 nombres adimensionnels suivants :

- $\bar{t} = \dfrac{(j_g + j_l)t}{D} = \dfrac{Ut}{D}$ le temps adimensionnel
- $(\bar{x} = \dfrac{x}{D}, \bar{y} = \dfrac{y}{D}, \bar{z} = \dfrac{z}{D})$ la position adimensionnelle.
- $\beta = \dfrac{j_g}{j_g + j_l} = \dfrac{Q_g}{Q_g + Q_l}$ la qualité volumétrique
- $\dfrac{P}{D}$ le rapport du pas sur diamètre
- $\dfrac{L}{D}$ la profondeur adimensionnelle
- $\bar{\rho} = \dfrac{\rho_g}{\rho_l}$ le rapport de masse
- $\bar{\nu} = \dfrac{\nu_g}{\nu_l}$ le rapport de viscosité cinématique
- $We = \dfrac{\rho_g D j_g^2}{\sigma}$ le nombre de Weber qui représente le ratio entre inertie dans le gaz et tension de surface
- $Re_l = \dfrac{j_l D}{\nu_l}$ le nombre de Reynolds liquide
- $Fr = \dfrac{U}{\sqrt{Dg}}$ le nombre de Froude
- $\bar{p_0} = \dfrac{p_0}{\rho_g j_g^2 + \rho_l j_l^2}$ la pression adimensionnelle

D'autres nombres adimensionnels sont parfois utilisés, mais d'après le théorème de Vaschy-Buckingham ils pourront tous s'écrire en fonction de ceux ci-dessus. Un des plus importants est le taux de vide ε qui représente la quantité de gaz dans la conduite. Le taux de vide peut être mesuré par une sonde localement, et dans ce cas il s'agit du rapport entre le temps passé par la sonde dans le gaz sur le temps de mesure. Le taux de vide peut-être aussi instantané. Il s'agit alors d'une moyenne spatiale calculée comme étant la fraction de volume occupée par le gaz sur celle du volume de contrôle. On peut aussi calculer ce taux de vide instantané sur une surface, il s'agit alors de la fraction de surface occupée par le gaz sur la surface considérée. Le taux de vide est le plus souvent différent de β car en général les deux fluides ont des vitesses différentes. Le nombre de Lockhart–Martinelli est lui aussi très utilisé, notamment dans la prédiction de la perte de charge. On retient aussi le nombre de Morton qui est utilisé pour analyser les tailles caractéristiques des gouttes et bulles. Enfin d'autres paramètres ont une importance pour décrire l'entraînement de gouttes dans les écoulements annulaires, notamment pour les travaux réalisés par Cioncolini et Thome (2010).

- $\chi = \dfrac{1-\beta}{\beta\sqrt{\bar{\rho}}}$ le nombre de Lockhart–Martinelli.
- $\varepsilon = \dfrac{A_g}{A_g + A_l}$ le taux de vide avec A_g la surface occupée par le gaz et A_l la surface occupée par le liquide (pour un cylindre).
- $Mo = \dfrac{We^3}{Fr\,Re^4}$ le nombre de Morton
- $S = \dfrac{v_g}{v_l}$ le taux de glissement
- $E = \dfrac{Q_{le}}{Q_{le} + Q_{lf}}$ l'entraînement liquide en écoulement annulaire, avec Q_{le} le débit sous forme de gouttes entraînées dans le cœur, et Q_{lf} le débit d'eau sous forme de film.
- $\gamma = \dfrac{A_{le}}{A_{le} + A_{lf}}$ le rapport surfacique d'entraînement en écoulement annulaire, avec A_{le} la surface occupée par les gouttes, et A_{lf} la surface occupée par le film liquide.

Les paramètres E et γ sont en général différents car les vitesses ne sont pas les mêmes dans le cœur gazeux et au bord de l'écoulement, de même que les paramètres β et ε le sont. Nous détaillons maintenant le lien entre β et ε :

$$\beta = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l}, \tag{2.1}$$

soit :

$$\beta = \frac{v_g A_g}{v_g A_g + v_l A_l}. \tag{2.2}$$

On obtient alors :

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{A_l}{A_g S}} = \frac{1}{1 + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon S}} \tag{2.3}$$

$$\varepsilon = \left(1 + S\left(\frac{1}{\beta} - 1\right)\right)^{-1} \tag{2.4}$$

De même on a le lien suivant entre E et γ :

$$E = \frac{1}{1 + \frac{(1-\gamma)u_{le}}{\gamma u_{lf}}} \tag{2.5}$$

Avec $u_{le} = \frac{EQ_l}{A_{le}}$ et $u_{lf} = \frac{(1-E)Q_l}{A_{lf}}$ les vitesses respectivement du liquide entraîné par le gaz et du liquide sous forme de film.

D'après le théorème de Vaschy-Buckingham toute nouvelle variable adimensionnelle comme S ou E pourra s'écrire en fonction des 13 paramètres présentés précédemment. Le but d'une corrélation ou d'un modèle sera d'établir cette dépendance. Ainsi nous avons par exemple avec le modèle de Feenstra *et al.* (2000) :

$$S \;=\; f\left(\frac{(1-\bar{\rho})(P-D)}{\bar{\rho} D Fr^2}, \frac{We}{Re_l}, \frac{\Delta p}{\rho U^2}, \frac{P}{D}\right) \tag{2.6}$$

La revue de littérature présentera alors des corrélations existantes décrivant les paramètres importants, notamment l'entraînement E.

2.2 Les configurations d'écoulements diphasiques

Les écoulements diphasiques liquide-gaz se comportent différemment selon les débits des deux fluides, leurs caractéristiques, et la géométrie de l'écoulement.

2.2.1 Les configurations d'écoulements diphasiques en tube cylindrique

En augmentant la quantité de gaz on passe progressivement des écoulements “bubbly” (à bulles) (a) aux écoulements intermittents, de type “slug” (à bouchons) (b) et “churn” (agités) (c), puis aux écoulements “annular” (annulaires) (d) et annulaires “wispy” (filamenteux) (e), ce que l'on voit sur la Fig.2.1.

(a) Les écoulements à bulles sont caractérisés par des bulles de gaz dans un flux continu d'eau.

(b) Les écoulements de type “slug” sont caractérisés par une alternance entre de très grandes bulles de gaz en forme de balle de fusil, et du liquide. Le gaz est transporté majoritairement sous la forme de ces grandes bulles, même si de petites bulles sont aussi présentes.

(c) On passe ensuite aux écoulements dits “churn” où le mouvement ascendant se fait de manière chaotique et oscillatoire, avec des phases ascendantes et descendantes. Le cœur de l’écoulement est majoritairement constitué de gaz.

(d) L’écoulement annulaire est constitué d’un film liquide le long de la paroi, et d’un cœur gazeux entraînant ou non des gouttes.

(e) L’écoulement devient “wispy” quand il y a des films d’eau entraînés dans le cœur gazeux et non seulement des gouttes. La distinction entre annulaire et annulaire “wispy” (filamenteux) est faite par certains auteurs.

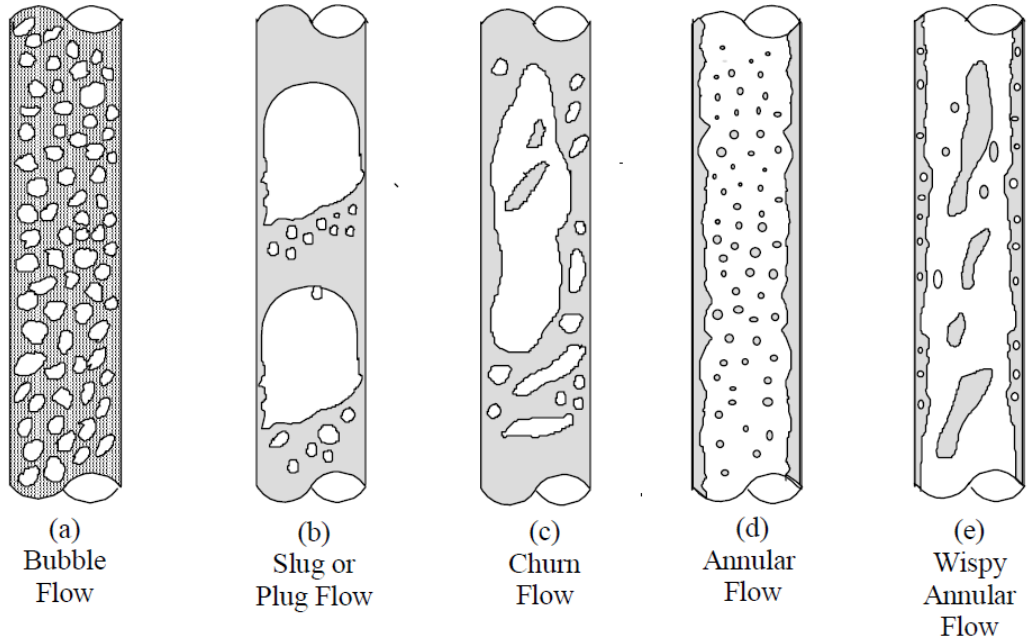


Figure 2.1 Types de configurations en écoulement vertical ascendant dans un tube cylindrique d’après le cours de thermohydraulique de Altan Tapucu (2009).

2.2.2 Les configurations d’écoulements diphasiques en faisceau

En faisceau les auteurs font généralement moins de distinction et ne considèrent que les écoulements à bulles, intermittents, et annulaires. Les écoulements à bouchons et agités sont

regroupés sous le nom intermittent car il est plus difficile de distinguer les écoulements en faisceau. L'écoulement intermittent est alors décrit comme une alternance irrégulière de grandes structures d'eau et d'air et Ulbrich et Mewes (1994) observent des fluctuations de pression importantes pour cet écoulement.

2.3 Cartes d'écoulements

De nombreux auteurs ont réalisé des cartes permettant de prédire la configuration en fonction des débits et autres paramètres, surtout en tube cylindrique.

2.3.1 Cartes d'écoulements en cylindre

Une des cartes les plus utilisées est celle de Taitel *et al.* (1980) présentée sur la Fig. 2.2, car elle a l'avantage d'associer des modèles physiques aux transitions d'écoulement. Ces modèles physiques permettent d'adapter la carte à des conditions expérimentales différentes de celles de l'étude. D'après Taitel *et al.* (1980) la transition des écoulements agités vers les écoulements annulaires se fait indépendamment du débit d'eau, avec le critère que le flux d'air doit pouvoir supporter une goutte d'eau, sachant que la taille des gouttes d'eau est donnée en fonction du débit d'air. Il est intéressant de noter que pour Taitel *et al.* (1980) l'écoulement agité n'est qu'une période transitoire très longue entre l'injection et l'écoulement à bouchons.

De nombreux autres groupes ont étudié ces cartes, cependant la carte de Taitel *et al.* (1980) reste très utilisée comme on peut le voir dans la revue récente de Berna *et al.* (2014). On peut ajouter à cette carte les transitions entre divers écoulements annulaires comme sur la carte de la Fig. 2.3 (Kaichiro et Ishii (1984)) où l'on peut voir la transition supplémentaire entre différents écoulements annulaires. L'écoulement "mist" (brumeux) est un écoulement annulaire dans lequel l'entraînement de gouttes est visible. Pour obtenir d'autres cartes le lecteur pourra se référer par exemple à McQuillan et Whalley (1985), Costigan et Whalley (1997), Ohnuki et Akimoto (2000) ou Kawahara *et al.* (2002).

Plus récemment des groupes ont entrepris de réaliser des cartes d'écoulements en utilisant des méthodes d'intelligence artificielle. Le principe de ces études est d'exercer des algorithmes à reconnaitre et à trier les écoulements à partir de données quantitatives sur ces derniers. Les étapes de travail sont toujours les mêmes, les auteurs doivent décider quelles données quantitatives sont les plus adaptées, effectuer un post-traitement, puis choisir la technique d'apprentissage automatique. Le défaut de ces études est que leur taux de succès est toujours déterminé par rapport à des évaluations à l'œil. On peut mettre en avant les travaux de Rosa *et al.* (2010) qui ont entraîné un réseau de neurones pour qu'il reconnaisse le type d'écoulement

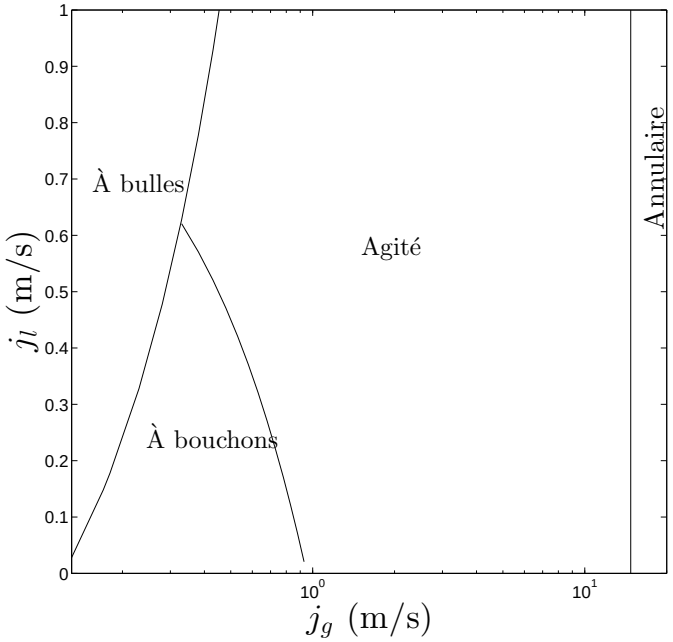


Figure 2.2 Carte des écoulements de Taitel *et al.* (1980) en tube cylindrique de 30 mm diamètre.

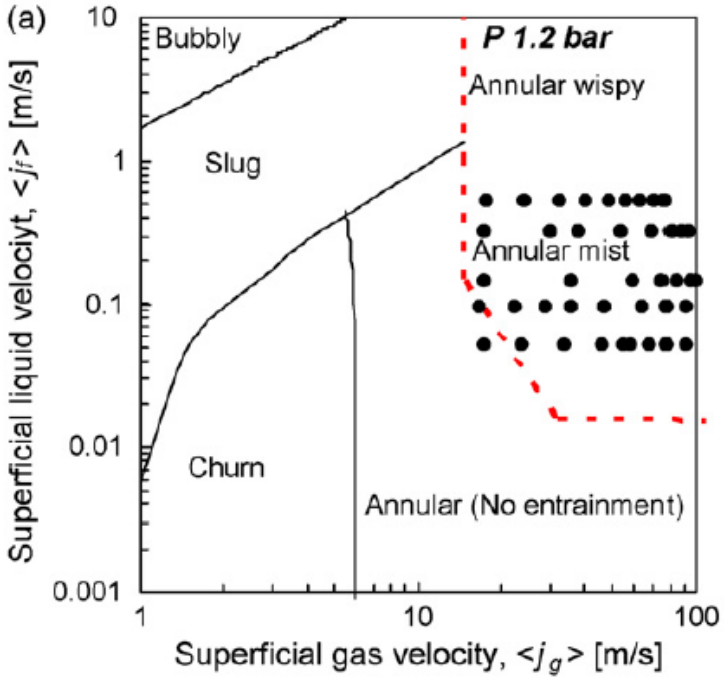


Figure 2.3 Carte des écoulements de Kaichiro et Ishii (1984).

à partir d'une mesure instantanée de taux de vide. On recense un certain nombre d'études se basant sur ces méthodes, comme celles de Mahvash et Ross (2008), Juliá *et al.* (2008), Canière *et al.* (2010), Tambouratzis et Pàzsit (2010), Ameel *et al.* (2012) ou encore Wang *et al.* (2012).

2.3.2 Cartes d'écoulements en faisceaux

Les écoulements à haute vitesse superficielle de gaz n'ont été que peu étudiés expérimentalement dans les faisceaux de tubes car il faut pour cela de très forts débits d'air ou de vapeur à travers de larges sections. Cependant des cartes d'écoulement ont été réalisées, et des études ont analysé le comportement du fluide dans ces faisceaux. Plusieurs études ont eu comme objectif de réaliser des cartes d'écoulement. Les plus importantes sont celles de Grant et Murray (1972), Ulbrich et Mewes (1994) et Noghrehkar *et al.* (1999), mais on peut aussi s'intéresser à celles de Xu *et al.* (1998), Ueno *et al.* (1995) ou encore McNeil *et al.* (2012).

Types de configurations de faisceau

Principalement quatre configurations de faisceau sont utilisées. Les configurations triangulaires tournée et normale sont schématisées sur la Fig. 2.4 et les configurations carrée normale et tournée sur la Fig. 2.5.

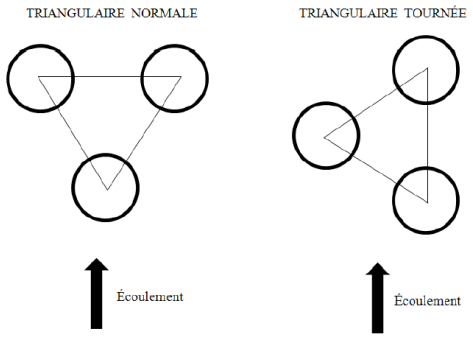


Figure 2.4 Schéma représentant les configurations triangulaires normale et tournée.

Carte d'écoulement de Grant et Murray (1972)

La première carte a été réalisée par Grant et Murray (1972) à l'aide d'observations. Ils ont utilisé des faisceaux de tubes avec une géométrie telle que représentée sur la Fig. 2.6. Un des avantages de leur montage expérimental est que la section de sortie ne s'accroit pas

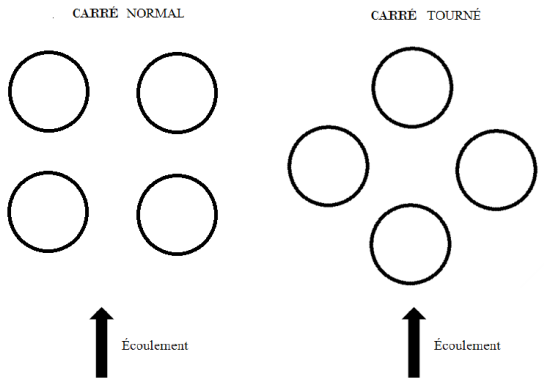


Figure 2.5 Schéma représentant les configurations carrée normale et carrée tournée.

brutalement, ce qui empêche des effets éventuels de jet en sortie. En effet lorsque la surface augmente brutalement en sortie d'un faisceau, les fluides peuvent être amenés à ralentir brutalement ce qui entraine des jets oscillants. Ces jets oscillants peuvent être responsables de fluctuations de pression, ce que Naudascher et Rockwell (2012) décrivent.

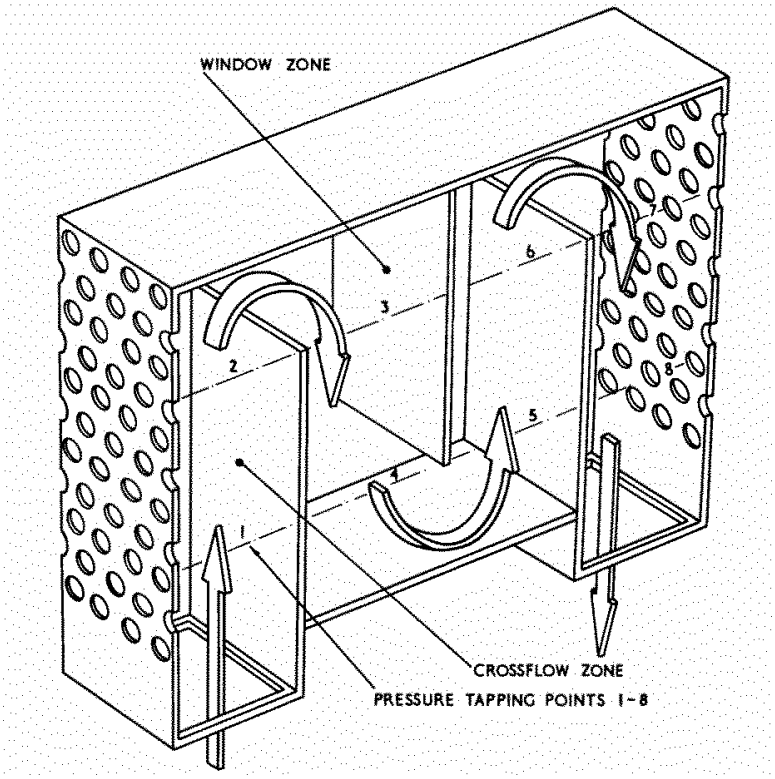


Figure 2.6 Section expérimentale utilisée par Grant et Murray (1972).

Les résultats obtenus par Grant et Murray (1972) sont présentés par Pettigrew et Taylor

(1994) sur la Fig. 2.7 en fonction des vitesses superficielles de gaz et d'eau. Les frontières d'écoulement en tube sont représentées également à titre indicatif, mais celles qui nous intéressent réellement sont en pointillé.

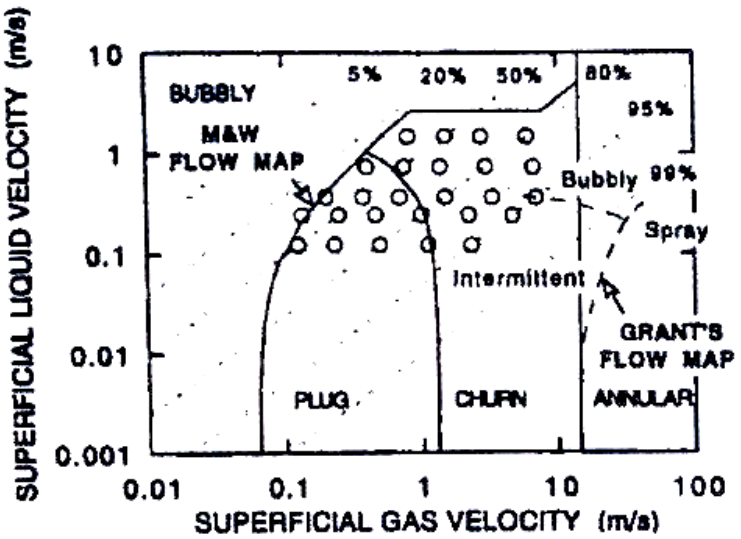


Figure 2.7 Carte de type d'écoulements réalisé par Grant et Murray (1972).

On note des frontières très différentes des frontières connues en tube cylindrique en ce qui concerne l'apparition de l'écoulement annulaire mais aussi entre le régime à bulles et celui intermittent. Cette carte est une référence pour l'industrie pour prédire la nature d'un écoulement en faisceau.

Carte d'écoulement pour Ulbrich et Mewes (1994)

Ulbrich et Mewes (1994) ont également réalisé une carte en faisceau en se basant sur des observations, dont le résultat est visibles sur la Fig. 2.10. Ils obtiennent des frontières différentes de celles de Grant et Murray (1972). Leur carte pourrait être plus précise car ils utilisent des vidéos et des mesures de pression pour classer les écoulements mais une des raisons de divergence peut aussi être la sortie de section, qui est très différente entre les deux. On peut observer le montage expérimental utilisé par Ulbrich et Mewes (1994) sur la Fig. 2.8 et noter que la surface de la section augmente après la fin du faisceau de tubes, induisant possiblement des effets dans la section. En effet Pettigrew *et al.* (1989) ont émis l'hypothèse qu'un plénum en sortie pouvait avoir un effet sur l'écoulement dans la section.

Les travaux de Ulbrich et Mewes (1994) laissent apparaître des oscillations de perte de charge comme on peut le voir sur la Fig. 2.9 dont la fluctuation en amplitude est de l'ordre de 30%

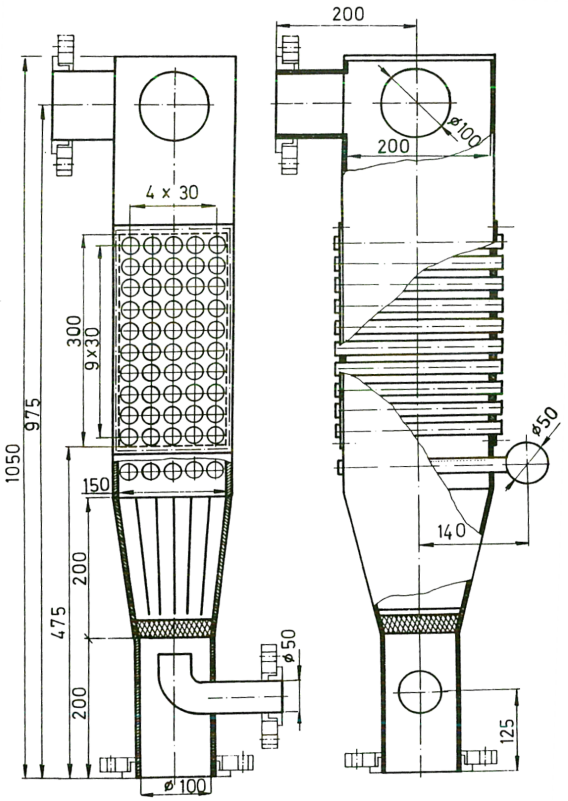


Figure 2.8 Schéma expérimental de la section expérimentale de Ulbrich et Mewes (1994).

de la valeur de perte de charge et la fréquence des oscillations est d'environ 2.5 Hz. Cette oscillation est le critère utilisé par Ulbrich et Mewes (1994) pour déterminer la frontière entre l'écoulement intermittent et l'écoulement annulaire. Il pourra être pertinent de s'intéresser aux fluctuations de pression pour déterminer le début de l'écoulement annulaire.

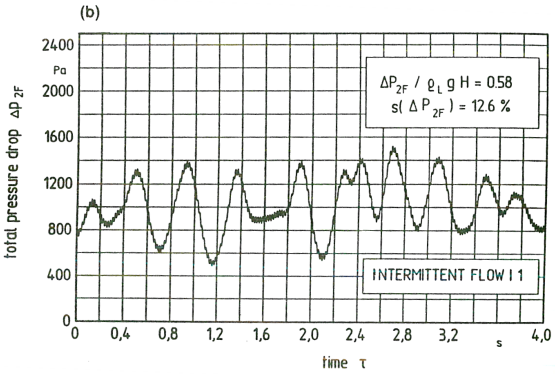


Figure 2.9 Oscillations de pression observées par Ulbrich et Mewes (1994).

Carte d'écoulement pour Noghrehkar *et al.* (1999)

Noghrehkar *et al.* (1999) identifient les différents régimes uniquement par le profil des fonctions de densité de probabilité de taux de vide (PDF). Les auteurs utilisent les différents profils de probabilité d'apparition des taux de vide pour classer les écoulements (cf Fig.2.10). Ils obtiennent une apparition de l'écoulement annulaire à des plus faibles débits que les auteurs précédents, et justifient cela par le fait que leurs mesures sont quantitatives et réalisées au centre du faisceau. En effet, Noghrehkar *et al.* (1999) prouvent que l'écoulement au cœur du faisceau est différent de celui au bord du faisceau. Par ces caractéristiques la carte de Noghrehkar *et al.* (1999) est *a priori* plus fiable que les cartes réalisées précédemment.

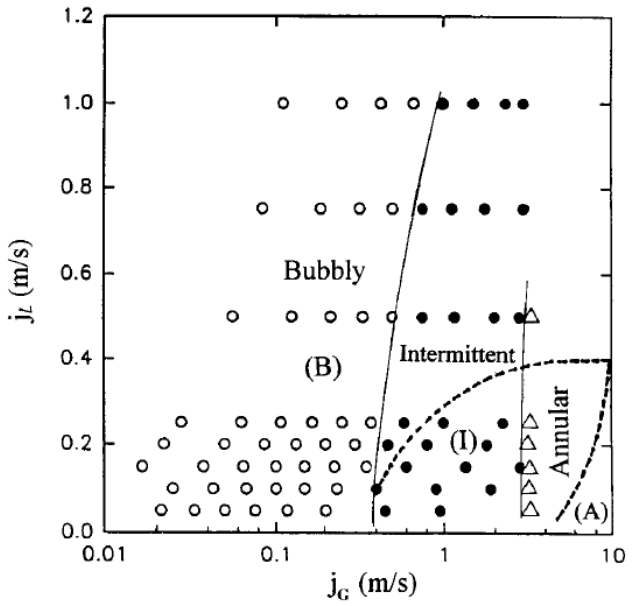


Figure 2.10 Carte d'écoulements réalisée par Noghrehkar *et al.* (1999) avec en traits pointillés les frontières obtenues par Ulbrich et Mewes (1994).

2.4 Description des écoulements de type agité

Avant que le débit de gaz soit tel que l'écoulement annulaire ne soit présent, les écoulements agités sont visibles. Ils sont définis par un mouvement oscillatoire, et sont souvent caractérisés en faisceau de tubes par les forces qu'ils exercent sur les tubes. Étant donné qu'il existe des données en quantité suffisante sur ces écoulements en faisceau, nous rappelons seulement rapidement les résultats obtenus sur ces écoulements en tube cylindrique.

2.4.1 Méthode expérimentale pour étudier les écoulements agités

Toutes les méthodes utilisées avec les écoulements annulaires donnent encore de bons résultats. Il est en plus possible d'utiliser une sonde optique avec ces écoulements. En effet les structures dans les écoulements annulaires sont en général trop petites pour les sondes optiques, ce qui n'est pas le cas pour les écoulements agités. Pour l'écoulement de type agité, les mesures de pression sont très importantes car les fluctuations de pression sont une caractéristique de l'écoulement d'après Ulbrich et Mewes (1994). En écoulement en faisceau, des capteurs de forces sont souvent installés. Leur but n'est pas directement d'étudier les écoulements agités, mais en général la présence de forces fluctuantes est considérée comme liée au régime agité.

2.4.2 Description des écoulements agités en tube cylindrique

Les écoulements agités sont définis par un mouvement oscillatoire et la présence de grandes vagues très visibles. La majorité du liquide est sous forme liquide le long de la paroi, où un mouvement alterné est visible, et l'air se situe majoritairement au centre (Azzopardi et Wren (2004)). Barbosa *et al.* (2002) caractérisent d'ailleurs cet écoulement en mesurant la quantité d'eau entraînée au cœur de l'écoulement. Le minimum d'entraînement marquera alors la transition avec l'écoulement annulaire. Barbosa *et al.* (2001) s'intéressent eux plus particulièrement aux vagues, dont les fréquences sont entre 5 et 20 Hz, et dépendent fortement des vitesses des fluides. Pour de plus amples informations le lecteur pourra se référer également à Watson et Hewitt (1999) et Sawai *et al.* (2004).

2.4.3 Description des écoulements agités en faisceau

De nombreux travaux, notamment à la chaire de recherche industrielle EACL/BWC/CRSNG en Interactions Fluide-Structure de Polytechnique Montréal, ont été réalisés pour comprendre le comportement des écoulements diphasiques en faisceau de tubes, et les efforts qu'ils exercent sur les faisceaux. Les débits n'ont jamais été suffisants pour permettre de bien observer des écoulements annulaires, mais la compréhension du comportement pour d'autres types d'écoulements, comme l'écoulement agité, reste intéressante.

a) Oscillations périodiques pour Pettigrew *et al.* (1989)

Pettigrew *et al.* (1989) ont été les premiers à réaliser des mesures de forces sur des faisceaux de tubes. Ils constatent des forces à très basse fréquence sur la traînée. L'hypothèse de la sortie de section est envisagée pour expliquer ces forces à basse fréquence mais un changement de la

sortie ne les supprime pas. Cependant la nouvelle sortie a encore une section bien supérieure à la section au niveau du faisceau. Leur montage expérimental est visible sur la Fig. 2.11. D'autres travaux ont essayé de prendre en compte le possible effet de l'agrandissement de la sortie, comme ceux effectués par Pietralik *et al.* (1998) qui ont ajouté une plaque poreuse à la sortie de leur faisceau pour stabiliser le comportement de l'écoulement proche de la sortie.

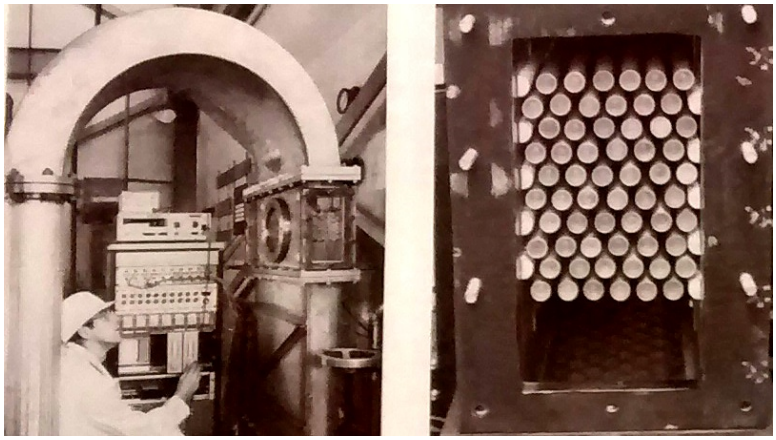


Figure 2.11 Montage expérimental utilisé par Pettigrew *et al.* (1989)

b) Oscillations observées par Pettigrew *et al.* (1989) lors du programme expérimental Clotaire réalisé par Villard (1999)

Villard (1999) effectue des tests dans un faisceau se rapprochant de la géométrie des générateurs de vapeur utilisés dans le nucléaire par sa taille importante : 14 m. Il affirme qu'une grille a été ajoutée pour stabiliser l'écoulement en sortie. Cette grille supprime des tourbillons en étant installée entre la sortie de section et la fin du faisceau, soit à 0.4 m du dernier tube.

c) Oscillations périodiques pour Pettigrew *et al.* (2005)

Pettigrew *et al.* (2005) observent à nouveau des forces pseudo-périodiques en traînée et en portance avec leur section expérimentale telle que représentée sur la Fig. 2.12. Ils réalisent des mesures de force dans un faisceau triangulaire tourné.

Les auteurs affirment que ces forces sont dues au type d'écoulement. Ils observent également un pic très étroit à 2 Hz qu'ils décrivent comme un effet d'oscillation de la boucle qui ne doit pas être pris en compte. Cette oscillation n'est présente que sur la traînée et a une intensité maximale à partir d'environ 5 m/s. En terme de portance, les fréquences des forces suivent une évolution selon un nombre de Strouhal entre 0.06 et 0.22. Les forces de traînée ont une

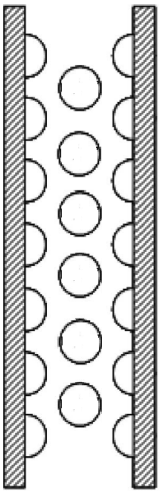


Figure 2.12 Faisceau utilisé par Pettigrew *et al.* (2005).

fréquence plus constante, autour de 3 Hz. Le détail de ces forces de traînée peut être observé sur la Fig. 2.13.

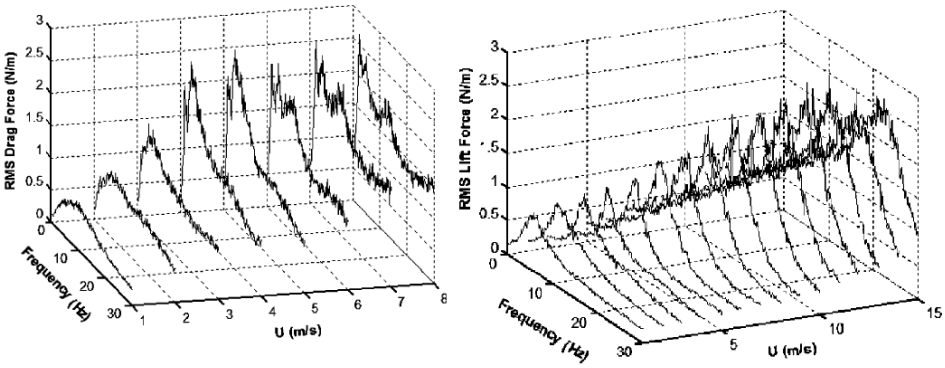


Figure 2.13 Spectre des forces de traînée (à gauche) et portance (à droite) en fonction de la vitesse homogène pour $\beta = 80\%$ d'après Pettigrew *et al.* (2005).

d) Oscillations périodiques pour Zhang *et al.* (2007)

Zhang *et al.* (2007) utilisent la même section que Pettigrew *et al.* (2005) mais cette fois ils sont capables de mesurer la force en trois endroits différents (voir Fig.2.14).

Les forces de portance et de traînée sont mesurées à l'entrée du faisceau, à l'intérieur et en sortie, et des forces quasi-périodiques sont encore observées, avec notamment des oscillations des forces de traînée entre 3 Hz et 5 Hz pour des vitesses homogènes entre 4 m/s et 8 m/s. Il est important de noter que des pics à basse fréquence sont également mesurés avec un capteur

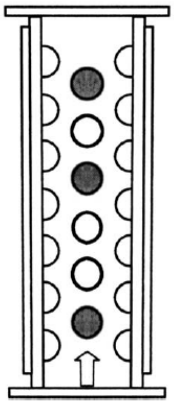


Figure 2.14 Section expérimentale utilisée par Zhang *et al.* (2007). (En noir les tubes équipés de capteurs)

de pression dans la section d'essai et également à la sortie de la pompe, mais qu'une analyse avec un accéléromètre a montré que ces oscillations ne sont pas dues à une vibration de la boucle expérimentale. La conclusion des auteurs est que ce signal très étroit ne devrait plus être considéré. Ils vérifient aussi que les forces sont bien corrélées à l'échelle de la longueur du cylindre.

Dépendance à la position dans le faisceau

La force de portance est beaucoup plus faible sur le faisceau en entrée, ce qui indique que les effets qui génèrent la portance doivent se développer le long du faisceau. Elles sont ensuite similaires entre le tube intérieur et le tube en sortie (voir Fig.2.15). En terme de traînée, la force tend à augmenter progressivement avec l'altitude. Le tube en entrée est cependant soumis à des forces beaucoup plus importantes, ce qui s'explique par le fait qu'il est directement face au flot d'entrée.

e) Oscillations périodiques pour Zhang *et al.* (2008)

La section que ces auteurs utilisent est la même que celle utilisée par Zhang *et al.* (2007). La nouveauté de cette étude est que les auteurs réalisent également des mesures par sonde optique à différentes positions de l'écoulement, dans l'objectif d'observer des corrélations entre les variations de l'écoulement eau-air et les caractéristiques des forces. Les mêmes types de forces que précédemment sont observées. Il est à noter que les forces de portance correspondent à un nombre de Strouhal variant entre 0.06 et 0.08. Le pic très étroit à 2 Hz est encore présent. Les auteurs observent que les forces quasi-périodiques sont bien corrélées

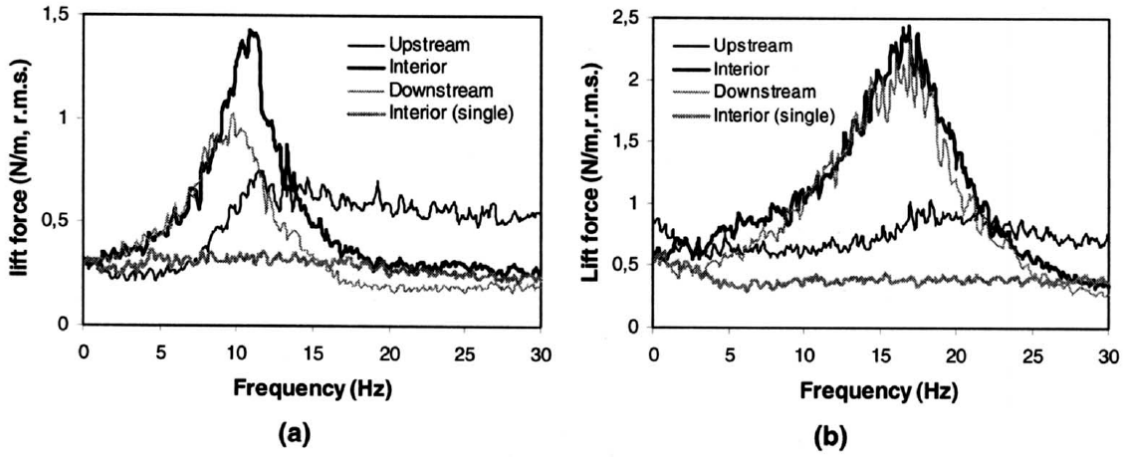


Figure 2.15 Comparaison des forces de portance en fonction de la position des tubes dans le faisceau pour $\beta = 80\%$ avec a) U = 5m/s et b) U = 10m/s d'après Zhang *et al.* (2007).

aux fluctuations de taux de vide mesurées par les sondes optiques. La traînée est liée à des fluctuations de quantité de moment dans le chemin d'écoulement principal. Ces fluctuations de moment sont dues à des fluctuations de taux de vide. La portance est bien corrélée avec les fluctuations de taux de vide dans le sillage des cylindres.

f) Oscillations périodiques pour Zhang *et al.* (2009)

Zhang *et al.* (2009) approfondissent l'étude réalisée précédemment. Ils sont désormais capables de mesurer les forces sur tous les tubes centraux du faisceau étroit. Ils utilisent de surcroît un grand faisceau où ils ont accès à des mesures à plusieurs endroits (voir Fig. 2.16).

Force de portance

Il est montré que la force de portance provient d'oscillations dans le sillage, ce qui a été prouvé par des expériences sur seulement deux tubes, en faisant varier leur distance l'un à l'autre. Cela permet aussi d'expliquer que le cylindre amont subit des forces de portance très faibles, car il n'est pas dans le sillage d'un autre. Zhang *et al.* (2009) notent que la portance est similaire pour tous les tubes en aval, et qu'elle ne devrait pas augmenter si le nombre de tubes augmentait. Les amplitudes en grand faisceau sont légèrement plus faibles et les fréquences des forces varient faiblement. Un couplage apparaît également, et des composantes de forces visibles habituellement en traînée sont présentes en portance.

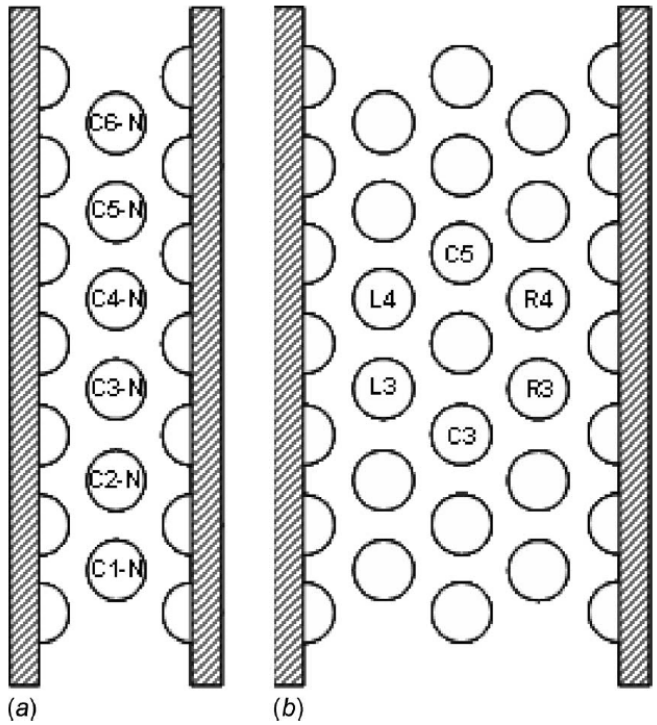


Fig. 1 Test section

Figure 2.16 Sections expérimentales utilisées par Zhang *et al.* (2009).

Force de traînée

Les spectres de force de traînée sont peu dépendants de la position, que ce soit pour le faisceau ou la section plus étroite, sauf pour le premier tube après l'injection qui lui subit une traînée plus importante. L'amplitude est cependant plus faible dans la section large. En augmentant la vitesse homogène un nouveau pic apparaît dans la section large qui est dû à un couplage avec la portance dans la grande section. Il est aussi à noter que le pic étroit disparait lorsqu'on utilise la section plus large.

Cohérence entre les forces dans la grande section

En terme de portance, la cohérence est surtout entre les tubes d'une même colonne alors qu'en terme de traînée il y a une meilleure cohérence sur le faisceau.

g) Oscillations périodiques pour Senez *et al.* (2010)

Senez *et al.* (2010) effectuent des mesures de portance et traînée sur un faisceau de tube de type triangulaire tournée de diamètre 17.5 mm avec un facteur de pas sur diamètre de 1.42. La sortie de section est similaire à celle utilisée par Perrot *et al.* (2011). Les auteurs, à nouveau, mesurent les forces à différents endroits du faisceau, avec une mesure au début du faisceau, une autre en fin de faisceau et 5 tubes au milieu afin d'établir des corrélations. Ces positions sont schématisées sur la Fig. 2.17

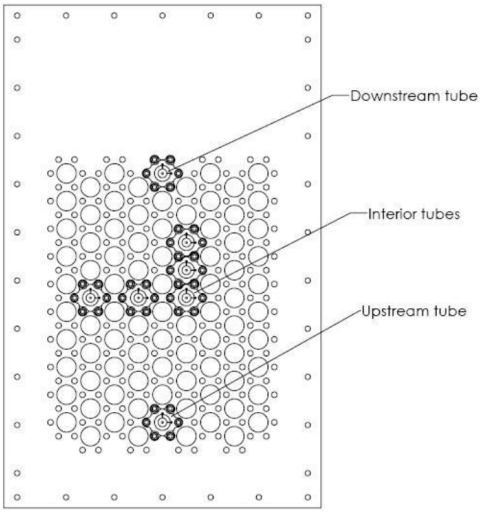


Figure 2.17 Position des mesures de force de Senez *et al.* (2010).

Les auteurs observent typiquement des oscillations autour de 3.5 Hz, à partir d'une vitesse homogène d'environ 3 m/s comme on peut le voir sur la Fig. 2.18. Cette fréquence reste assez stable et le pic associé est étroit. L'intensité de la force augmente linéairement avec le flux massique jusqu'à une certaine valeur où elle tend à se stabiliser.

Effet de la position des tubes

Le pic de traînée reste plutôt constant en fonction de la position dans le faisceau, même si il est plus intense pour le tube en entrée, et plus faible pour celui en sortie. En comparant les résultats des tubes centraux, les auteurs observent que la force de traînée à basse fréquence est très bien corrélée horizontalement comme verticalement. En terme de portance, la force est maximale à l'intérieur du faisceau et est beaucoup plus faible sur les tubes d'entrée et de sortie. La force est bien corrélée à l'échelle d'une colonne mais moins au niveau des rangées.

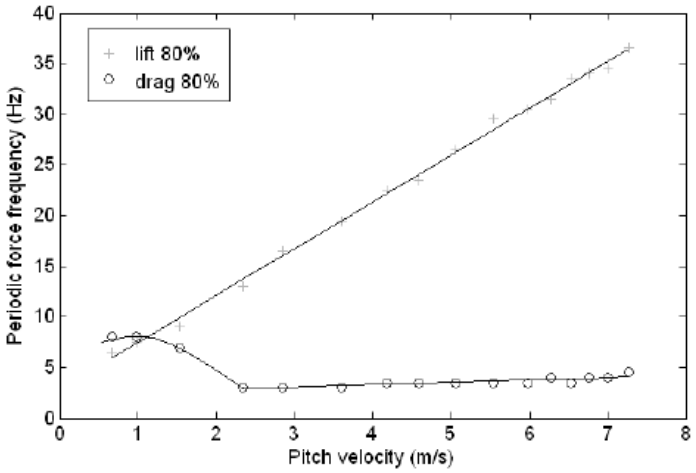


Figure 2.18 Fréquence typique des forces de traînée et de portance en fonction de la vitesse homogène à $\beta = 80\%$ pour Senez *et al.* (2010).

h) Oscillations périodiques pour Perrot *et al.* (2011)

De même Perrot *et al.* (2011) observent des fluctuations de force mais cette fois dans un faisceau de type triangulaire normal présenté sur la Fig. 2.19. Perrot *et al.* (2011) affirment que les forces sur la traînée sont liées à l'apparition de l'intermittence, et que celles sur la portance sont elles liées à un nombre de Strouhal dépendant du taux de vide. Ils comparent alors l'apparition des forces de traînée avec la frontière prédisant l'intermittence dans les cartes d'écoulement et concluent que cela peut être une explication.

2.5 Description des écoulements annulaires

Les écoulements à plus haut taux de vide sont les écoulements annulaires, que nous présentons maintenant.

2.5.1 Méthodes expérimentales pour étudier les écoulements annulaires

Pour obtenir des mesures quantitatives de la quantité d'eau sous forme de film liquide ou de gouttes, de nombreuses méthodes expérimentales sont utilisées, ce qu'Azzopardi (1997) décrit dans son article de synthèse. Une méthode très courante est la méthode utilisée par Sawant *et al.* (2008) où le film liquide est aspiré à travers la paroi et mesuré. Certains groupes ont aussi utilisé des sondes de conductance, qui permettent d'analyser l'écoulement en fonction de sa conductance locale. De nombreuses autres méthodes sont utilisées comme celle du "tracer" (marqueur) de Jagota *et al.* (1973) mais celle la plus adaptée aux écoulements annulaires est

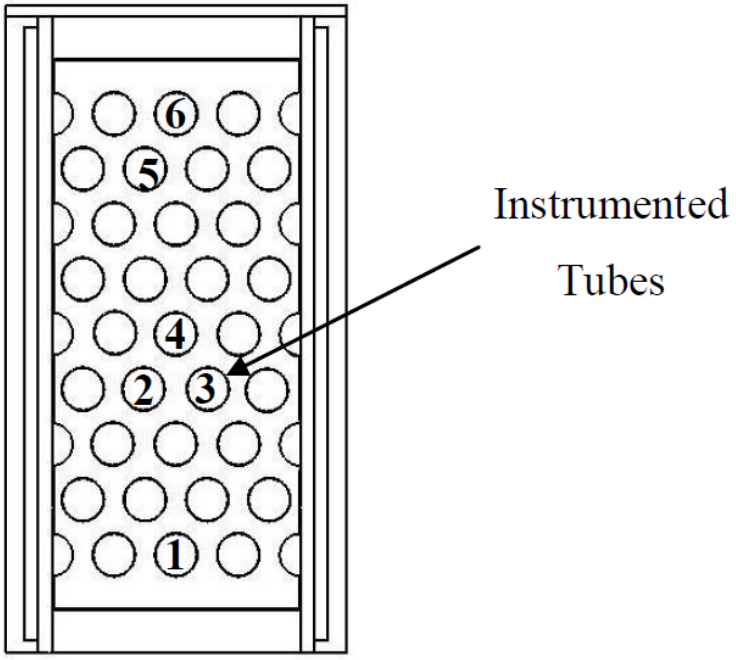


Figure 2.19 Section expérimentale utilisée par Perrot *et al.* (2011).

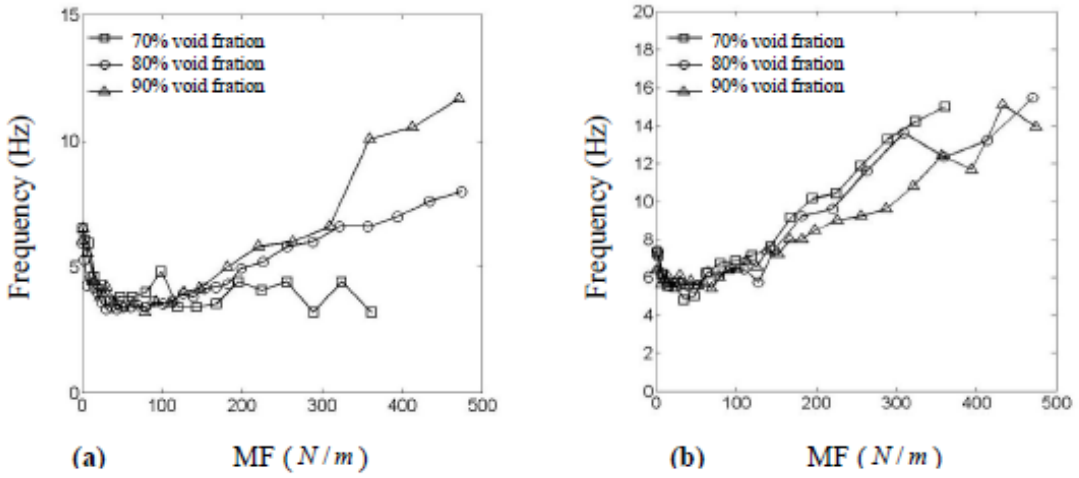


Figure 2.20 Fréquence du premier pic de force en a) pour la traînée et b) pour la portance observées par Perrot *et al.* (2011).

celle du collecteur, que Barbosa *et al.* (2002) utilisent, et que Khor *et al.* (1996) décrivent précisément. Le principe est qu'un tube va récupérer une fraction de l'écoulement dont la proportion en eau et gaz va être mesurée, comme on peut le voir sur la Fig. 2.21. Il faut alors

éviter une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du tube afin de s'assurer que le flux récupéré est bien représentatif de l'écoulement. En s'assurant que les deux pressions sont égales, on peut être certain d'opérer dans de bonnes conditions. On doit faire ces mesures de quantité de gouttes à différents emplacements afin de mesurer la quantité de gouttes totale. En effet l'hypothèse que la répartition des gouttes est uniforme sur la section n'est en général pas valide, d'après Gill *et al.* (1963).

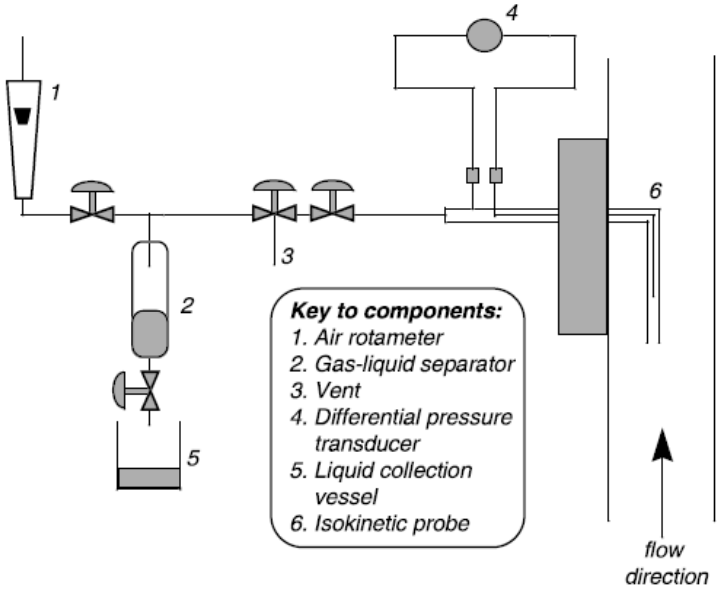


Figure 2.21 Schéma expérimental du collecteur, d'après Barbosa *et al.* (2002).

2.5.2 Description des écoulements annulaires en cylindre

Les écoulements annulaires dans les tubes cylindriques ont été le sujet de nombreux travaux. Ces études se proposent de décrire la quantité d'eau présente sous forme de gouttes et sous forme de film liquide. Les auteurs essaient aussi d'expliquer comment ont lieu les échanges entre le film liquide et les gouttes en étudiant les vagues se formant dans le film liquide. Taylor *et al.* (1963), Asali *et al.* (1985), Azzopardi (1986), Sekoguchi et Takeishi (1989), Zhao *et al.* (2013) ou encore Azzopardi (1997) et Berna *et al.* (2014) dans leurs articles de synthèse, ont étudié les vagues créées dans le film liquide et leur lien avec l'entraînement. D'autres auteurs se sont plutôt concentrés sur les gouttes dans les écoulements annulaires comme Jepson *et al.* (1989), Schadel *et al.* (1990), Ambrosini *et al.* (1991), Fore et Dukler (1995) ou Hay *et al.* (1996). Dans nos travaux nous nous intéressons à la quantité totale entraînée, car il s'agit du paramètre clé pour représenter l'écoulement. Ishii et Grolmes (1975) ont proposé en premier un mécanisme d'entraînement pour les gouttes, qui a été amélioré ensuite par Ishii et Mishima

(1989). Ces premières études ont permis d'identifier les paramètres régissant les écoulements annulaires, ouvrant la voie à de nombreux travaux théoriques et expérimentaux qu'Azzopardi (2006) résume bien dans son livre. Récemment Sawant *et al.* (2008), Cioncolini et Thome (2010) ou encore Pan et Hanratty (2002) et Al-Sarkhi *et al.* (2012) ont proposé des corrélations empiriques plus ou moins efficaces pour décrire la quantité d'eau entraînée sous forme de gouttes. Berna *et al.* (2014) comparent dans leur revue très récente les différentes corrélations existantes. Nous allons rapidement détailler les études théoriques faites en cylindre afin d'être en mesure ensuite de comprendre comment les écoulements annulaires peuvent se comporter en faisceau de cylindre.

a) Théorie de Ishii et Grolmes (1975)

Ishii et Grolmes (1975) effectuent une étude théorique pour prédire le début de l'entraînement pour un écoulement annulaire. La première hypothèse est que l'entraînement de gouttes à partir du film liquide le long de la paroi se fait lorsque la force exercée par le gaz sur une vague devient supérieure à la tension de surface qui retient l'eau de cette vague. Ces vagues se forment en raison de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz.

À partir d'une valeur du nombre de Reynolds fluide, le flot sera considéré totalement turbulent et on aura un critère ne dépendant plus de la viscosité et donc plus du nombre de Reynolds. En dessous d'un nombre de Reynolds critique plus aucun entraînement n'aura lieu car les amplitudes de vagues ne pénètrent plus hors de la couche limite du gaz. Ainsi cette première étude théorique des écoulements annulaires ne donne pas de corrélation mais ouvre la voie en discernant les paramètres clés du phénomène d'entraînement.

b) Théorie de Ishii et Mishima (1989)

Ishii et Mishima (1989) reprennent le modèle précédent de début d'entraînement et proposent une corrélation permettant de connaître la quantité entraînée sous forme de gouttes par l'écoulement annulaire. L'idée est que la quantité entraînée est celle permettant d'abaisser le nombre de Reynolds liquide jusqu'à la valeur de début d'entraînement, tout en prenant en compte l'évolution des caractéristiques du gaz lorsque des gouttes ont déjà été entraînées. Le résultat principal est que Ishii et Mishima (1989) obtiennent une corrélation qui ne dépend que de deux nombres adimensionnels que sont le nombre de Reynolds du liquide et le nombre de Weber gazeux.

$$E = f(We, Re_l)$$

c) Théorie de Sawant *et al.* (2008)

Ils affirment tout d'abord que le gros défaut de la corrélation de Ishii et Mishima (1989) est qu'elle suppose que l'entraînement peut être total lorsque j_g tend vers l'infini, alors qu'en réalité la quantité d'eau entraînée atteint un palier. Ils reprennent les nombres adimensionnels décrits précédemment mais modifient le nombre de Weber. L'entraînement est alors fonction de deux nombres adimensionnels $E = f(Re_l, We')$ et sa dépendance est représentée à la Fig. 2.22, avec les nombres adimensionnels suivants :

$$We' = We\left(\frac{1}{\bar{\rho}} - 1\right)^{0,25}$$
$$Re_l = \frac{j_l D}{\nu_l}$$

Sawant *et al.* (2008) observent trois zones d'entraînement quand le débit de gaz augmente, une première où la quantité entraînée ne dépend que du nombre de Weber et est indépendante du nombre de Reynolds, une zone de transition, puis une zone où l'entraînement est uniquement dépendant du nombre de Reynolds et indépendant du nombre de Weber, comme sur la Fig.2.22.

L'interprétation se fait en matière de vagues, qui sont les responsables de l'entraînement. Lorsque peu d'eau a été entraînée, la diminution de la quantité d'eau dans le film n'a que peu d'effet sur ces vagues, et l'entraînement n'est alors que dépendant de l'inertie du gaz. Dans la seconde phase, la quantité entraînée est telle que la viscosité va influencer progressivement le film liquide. À un certain point le film liquide va devenir si peu important que les vagues ne vont plus être hors de la sous-couche visqueuse du cœur gazeux et l'entraînement va être limité à une valeur dépendant du nombre de Reynolds liquide. Il est important de noter que le nombre de Reynolds liquide a une influence sur l'emplacement de la transition entre ces zones. Plus il est important et plus la transition vers la limite sera importante. La quantité restante dans le film liquide au maximum de l'entraînement augmente aussi en fonction du nombre de Reynolds (même si la proportion d'eau restante diminue), probablement à cause de l'effet de la turbulence sur le cœur gazeux. Ces corrélations donnent de très bons résultats confrontés à leurs données expérimentales comme montré sur la Fig. 2.23, ainsi que lorsqu'elles sont

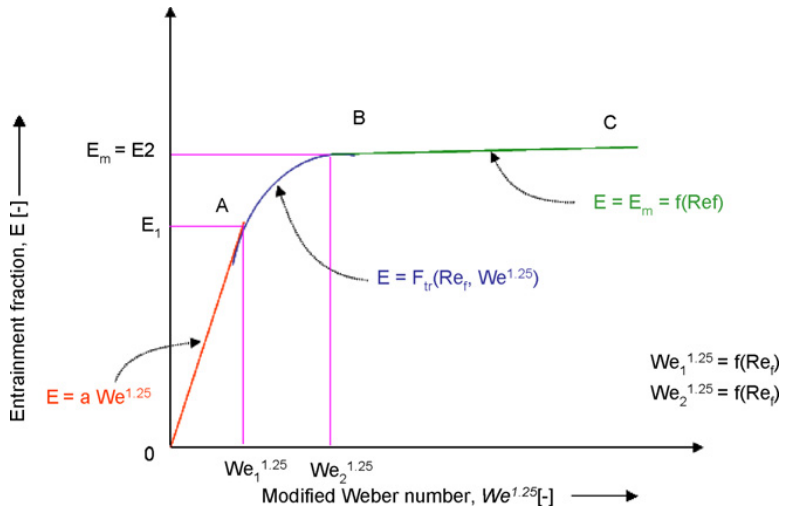


Figure 2.22 Quantité entraînée en fonction du nombre de Weber modifié et du nombre de Reynolds d'après Sawant *et al.* (2008).

comparées à des données de la littérature comme celles de Assad *et al.* (1998), Owen *et al.* (1985) et Schadel (1988).

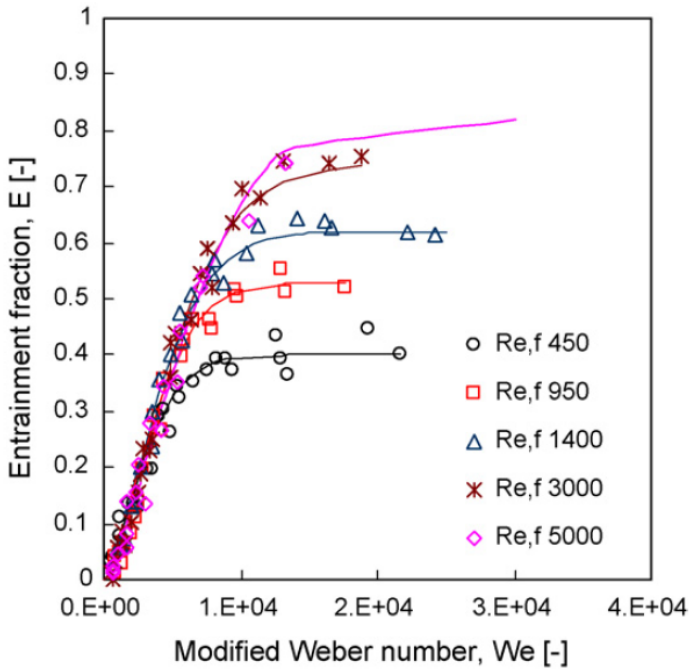


Figure 2.23 Comparaison de la corrélation proposée aux données expérimentales obtenues par Sawant *et al.* (2008).

d)Théorie de Cioncolini et Thome (2010)

Les travaux effectués par Cioncolini et Thome (2010) améliorent la corrélation de Sawant *et al.* (2008) en créant le nombre de Weber du cœur gazeux défini par :

$$We_c = \frac{D_c \rho_c V_c^2}{\sigma} = f(Re, We, \beta, \bar{\rho}) \tag{2.7}$$

Ce nouveau nombre de Weber se base sur des variables dites de cœur. Le cœur est la zone constituée de la surface du tube moins celle occupée par le film comme cela est illustré sur la Fig. 2.24. Le paramètre γ représente le rapport de surface occupée par les gouttes sur celle occupée par le film liquide. Ce paramètre est différent de l'entraînement E qui compare les flux respectifs de film liquide et de gouttes. La surface de cœur vaut alors :

$$A_c = A - A_{lf} = A(\varepsilon + \gamma - \varepsilon\gamma) \tag{2.8}$$

On a donc la distance de cœur :

$$D_c = D\sqrt{\epsilon + \gamma - \epsilon\gamma} \tag{2.9}$$

La masse volumique de cœur ρ_c et la vitesse de cœur V_c sont alors respectivement la masse volumique moyenne du cœur et la vitesse moyenne du cœur. La corrélation utilisée pour γ provient des travaux de Cioncolini *et al.* (2009). Cioncolini et Thome (2010) n'utilisent alors qu'un seul nombre adimensionnel au lieu de deux précédemment, car le nombre de Weber de cœur prend maintenant en compte la quantité d'eau dans le film liquide par le biais des variables de cœur.

Les auteurs prouvent que le nombre de Weber de cœur est le nombre adimensionnel le plus adapté à l'aide d'une méthode basée sur l'analyse dimensionnelle et des données expérimentales actuelles. Le nombre de Weber de cœur est celui qui a le plus d'influence parmi les vingt nombres adimensionnels créés. De plus aucun autre nombre adimensionnel n'a d'influence claire sur les données. Cioncolini et Thome (2010) affirment cependant que les données étant peu précises, il est probable qu'il existe des dépendances de second ordre à d'autres nombres adimensionnels. Leur corrélation reste semi-empirique dans le sens où la courbe d'entraînement en fonction du nombre de Weber proposé a comme seul critère de se rapprocher au mieux des données. La corrélation proposée (éq. 2.10) est comparée à un très grand nombre de données et donne des résultats très satisfaisants comme on peut le voir sur la Fig. 2.25.

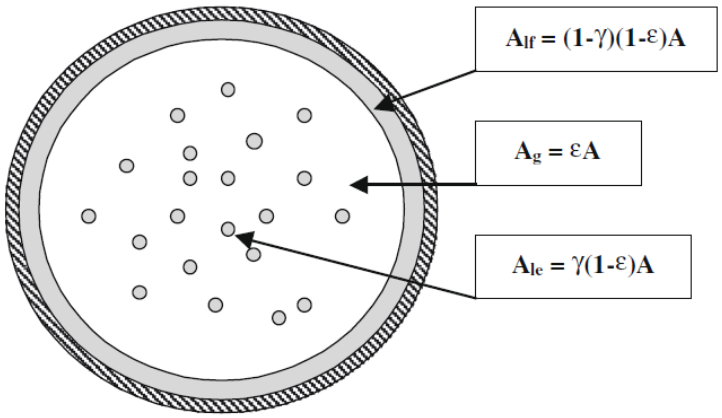


Figure 2.24 Schéma de la section du cylindre expliquant l'utilisation de variables de cœur. Cioncolini et Thome (2010)

$$E = \left(1 + 13.18\, We_c^{-0.655}\right)^{-10.77} \tag{2.10}$$

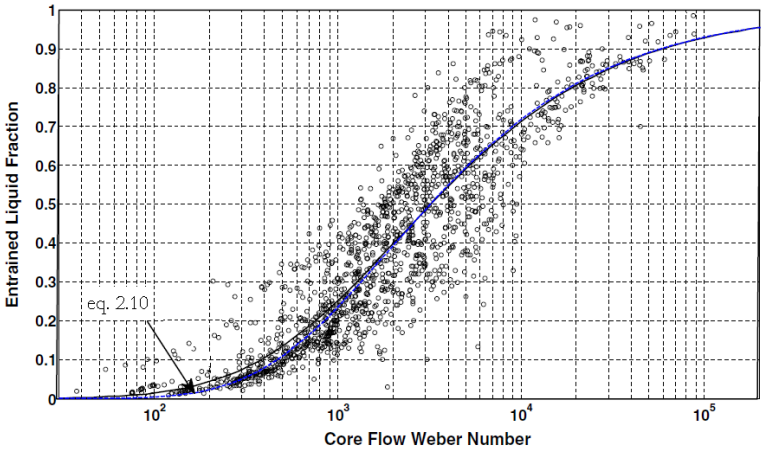


Figure 2.25 Comparaison des données expérimentales à la corrélation de Cioncolini et Thome (2010).

Plusieurs différences apparaissent entre cette étude et celle de Sawant *et al.* (2008). Tout d'abord l'entraînement n'est plus limité à une valeur limite. Ensuite la quantité d'eau connait une plus forte croissance au début de l'entraînement, ce qui est expliqué par Cioncolini et Thome (2010) par le fait qu'à faible entraînement l'eau entraînée dans le cœur va avoir un fort impact sur l'inertie de ce dernier et donc augmenter fortement l'entraînement.

Autres études portant sur les écoulements annulaires

Nous n'avons décrit dans cette partie que les études ayant eu un impact clé sur la compréhension des corrélations d'entraînement, mais le lecteur pourra également se référer entre autres à Gill *et al.* (1964), Cousins et Hewitt (1968), Whalley *et al.* (1973), Jagota *et al.* (1973), Oliemans *et al.* (1986), Schadel *et al.* (1990), Nakazatomi et Sekoguchi (1996), Assad *et al.* (1998), Pan et Hanratty (2002), ou Han *et al.* (2007).

2.5.3 Description des écoulements annulaires en faisceau de tubes

Les écoulements annulaires n'ont été que très peu observés en faisceau de tubes car cela nécessite des débits de gaz très élevés. Noghrehkar *et al.* (1999) reconnaissent l'écoulement annulaire en comparant leur signal de sonde optique à celui obtenu en tube cylindrique pour un écoulement annulaire. Ulbrich et Mewes (1994) quant à eux reconnaissent l'écoulement annulaire grâce à la suppression des fluctuations de pression à des débits de gaz plus importants que ceux du régime agité.

CHAPITRE 3 CONSIDÉRATIONS EXPÉRIMENTALES

Durant ce chapitre nous présentons le montage expérimental que nous avons utilisé tout au long de notre étude. Cette boucle d'essai a également été utilisée par Inès Benito et le lecteur pourra se référer à son mémoire pour plus de détails.

3.1 Section d'essai

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, notre section expérimentale représente une portion du faisceau de tubes d'un générateur de vapeur. Nous illustrons cela sur la Fig. 3.1. Cette géométrie a pour objectif de représenter la partie haute des générateurs de vapeur, lorsque l'écoulement arrive de manière perpendiculaire au faisceau de tubes. Nos tubes ont un diamètre de 38 mm ce qui est environ deux fois plus grand que le diamètre des tubes utilisés dans les générateurs de vapeur industriels. Ce choix a été effectué afin que les écoulements soient plus facilement observables, et qu'une sonde optique y soit plus aisément utilisée.

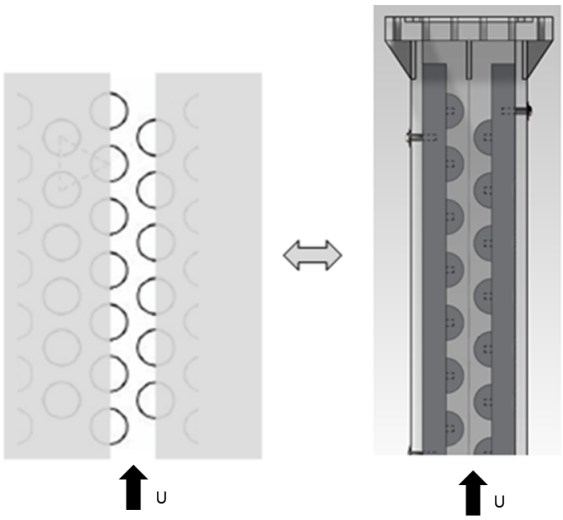


Figure 3.1 À droite, section expérimentale utilisée pour représenter un faisceau de tubes lui même représenté à gauche.

La section utilisée est une tour à base carrée contenant des demi tubes comme on peut le voir sur la Fig. 3.2. Elle mesure 2 m de haut sur une profondeur de 0.1 m. Sur ce schéma les caractéristiques géométriques de la section sont représentées. On peut ajouter que d'après Mureithi et Masabarakiza (2011) on peut considérer que les fluides vont se déplacer dans un

chemin d'écoulement dont la largeur caractéristique est le pas moins le diamètre $(P - D)$. C'est cette valeur de 19 mm qui est donc la largeur caractéristique dans la section, et qui est utilisée pour calculer les vitesses homogènes.

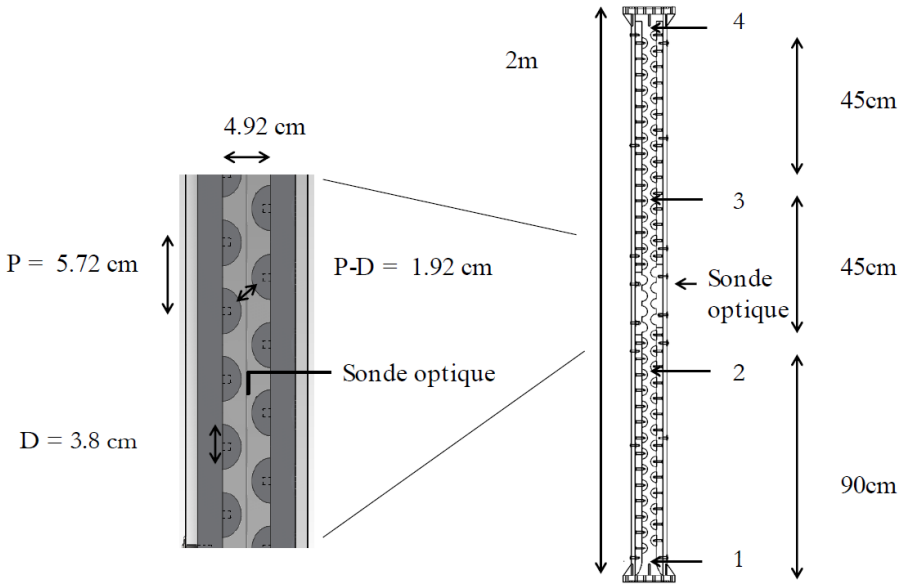


Figure 3.2 Schéma représentant la section d'essai et les positions des points de mesure.

Cette section d'essai est intégrée dans une boucle expérimentale que nous allons maintenant présenter.

3.2 Boucle d'essai

Nous pouvons imposer dans la section les conditions expérimentales voulues en y faisant varier le débit d'eau et le débit d'air. L'air provient du circuit d'air comprimé de Polytechnique Montréal, et l'eau est acheminée à l'aide d'une pompe à engrenages préalablement étalonnée. La boucle expérimentale est représentée dans sa globalité par Inès Benito sur la Fig. 3.3 et nous récapitulons dans le tableau 3.1 les éléments de la boucle.

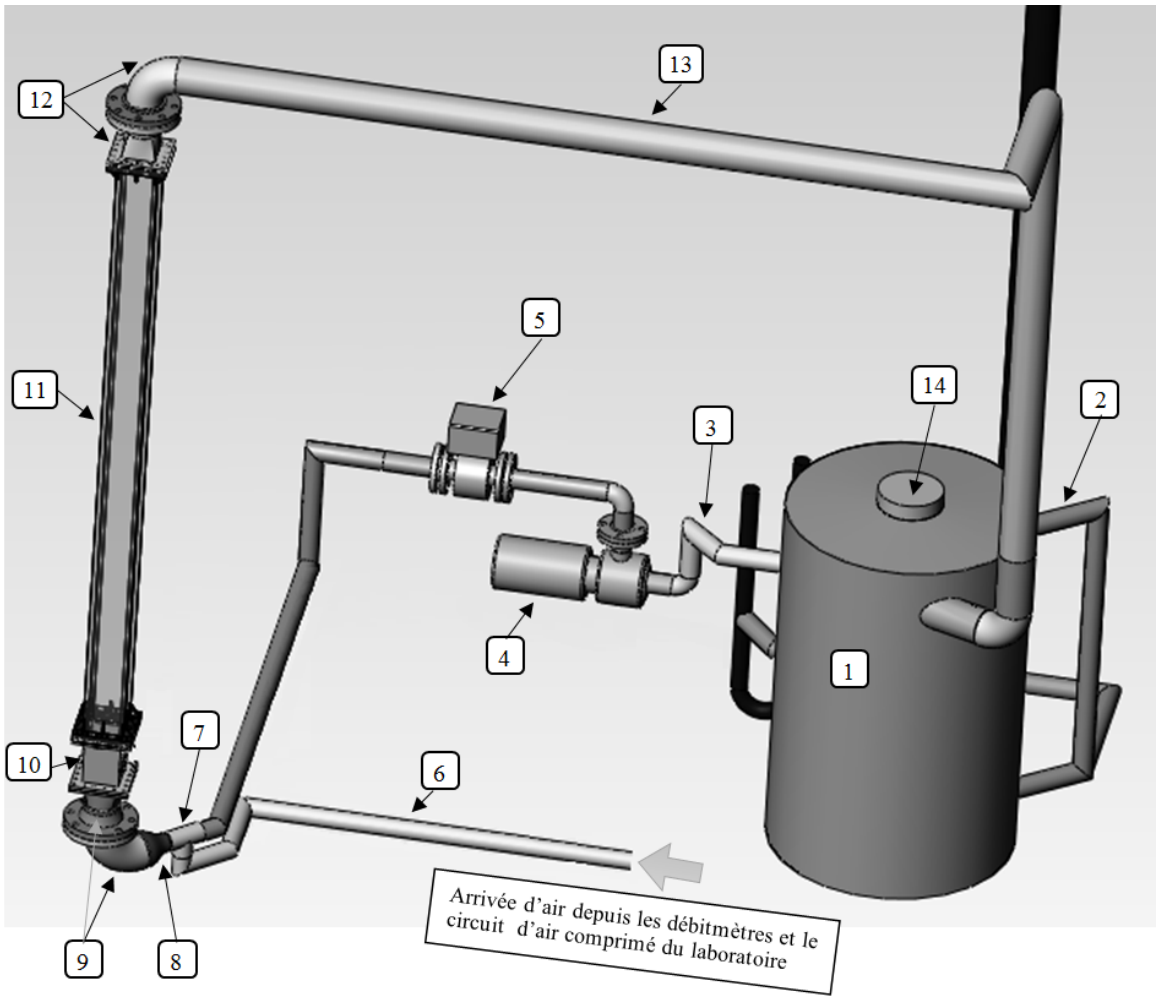


Figure 3.3 Schéma de la boucle expérimentale.

Les caractéristiques des différents composants des circuits d'eau et d'air sont ensuite précisées dans les tableaux 3.2 et 3.3. Il est à noter que la pompe centrifuge de marque *Gould pumps* et le débitmètre massique de marque *Krohne* ont été remplacés par une pompe à engrenage durant la campagne expérimentale. La pompe de marque *Gould pumps* n'a servi qu'à vérifier que le choix de la pompe n'avait pas d'influence sur les résultats expérimentaux.

3.2.1 Injection dans la section d'essai

Le section telle que dessinée initialement par Nelly Coquand avait un défaut d'injection. La surface avant l'entrée, au niveau du coude était plus grande que la surface au niveau de la section expérimentale, comme on peut le voir sur la Fig.3.4. La section étant grande, l'air était ralenti avant l'entrée, et ne pouvait entraîner l'eau de manière régulière. Nous observions alors une arrivée d'eau intermittente dans la section d'essai, ce qui entraînait une forte irrégularité

Tableau 3.1 Éléments numérotés de la boucle d'essai.

Numéro de l'élément	Élément
1	Réservoir
2	Conduites de vidange et trop-plein du réservoir
3	Sortie du réservoir vers la boucle
4	Pompe (Goulds Pumps)
5	Débitmètre massique Krohne
6	Arrivée d'air depuis le circuit d'air comprimé du laboratoire
7	Connecteur
8	Divergent
9	Coude inférieur
10	Ancien injecteur d'air (non utilisé)
11	Section d'essai
12	Coude supérieur
13	Conduite flexible de retour au réservoir
14	Ouverture (évacuation de l'air)

Tableau 3.2 Récapitulatif des caractéristiques des pompes et du circuit d'air

Composant	Fluide	Modèle	Plage d'opération
Circuit d'air comprimé	Air	Fourni par Polytechnique Montréal	De 12 CFM à 300 CFM
Pompe à engrenages	Eau	*OBERDORFER PUMPS INC.*	De 2.3 $10^{-3} L/s$ à 1.27 L/s
Pompe *Goulds*	Eau	*Goulds SH2G6B0*	De 0.59 L/s à 1.41 L/s

Tableau 3.3 Récapitulatif des débitmètres utilisés.

Composant	Fluide	Modèle	Plage d'opération	Précision
Débitmètre massique	Air	*Aalborg GFC 77*	0.25-16.7 L/s	± 0.25 L/s
Plaque à orifice	Air	*Rosemount S015T1S0512D*	De 10 à 300 CFM	± 1.5 %
Débitmètre massique	Eau	*Krohne IFM4010/D/6*	0.59-23.6 L/s	± 0.5 %

de l'écoulement dans la section.

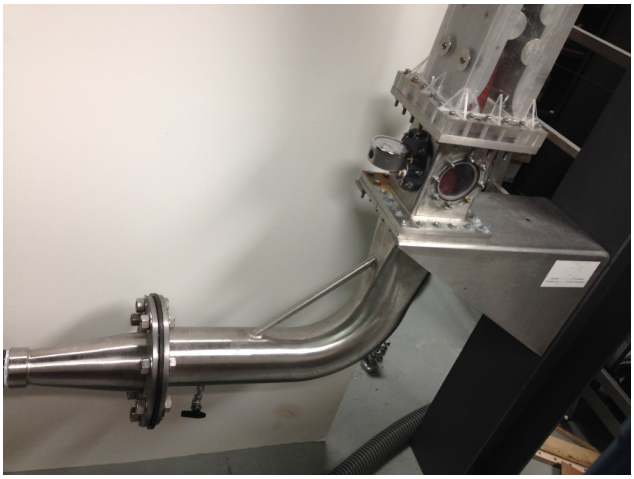


Figure 3.4 Photo de l'injection prévue initialement.

Pour pallier à ce problème nous avons modifié le montage pour que l'air soit injecté directement au niveau de la section, et qu'il n'y ait pas de ralentissements. L'air est transporté jusqu'à la section grâce à un tuyau coaxial à l'écoulement d'eau. La Fig. 3.5a illustre le nouveau montage coaxial, et la Fig. 3.5b montre l'emplacement de l'injection. Avec ce type d'injection nous n'observons plus d'intermittence au niveau de l'injection des fluides. Nous n'avons pas ensuite de système permettant au mélange de se faire. Les fortes variations dans la section vont effectuer le mélange dans la partie la plus basse de la section.

3.2.2 Sortie de section d'essai

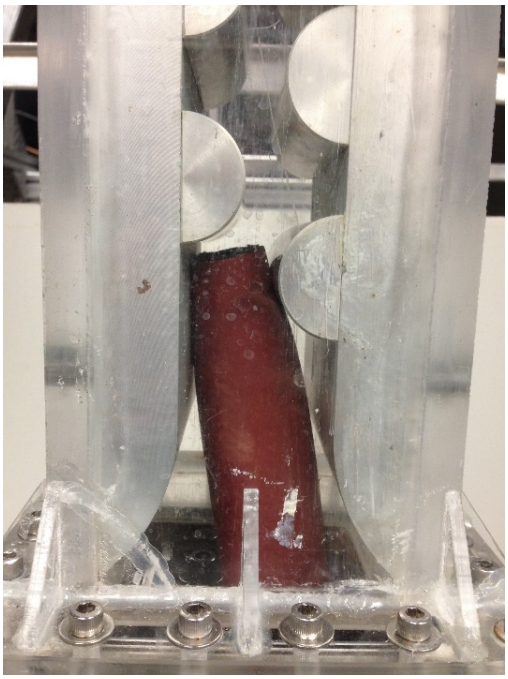
En sortie de section d'essai la taille de la section augmente également, et nous reviendrons au chapitre 5 sur cet aspect.

3.3 Appareils de mesure utilisés

3.3.1 Sondes optiques

Pour caractériser chaque écoulement, nous utilisons une sonde optique. Une sonde optique permet de détecter la nature du fluide de manière locale et instantanée. Plus de mille fois par seconde la sonde va donner l'information de la phase dans laquelle elle se trouve grâce au principe suivant : un signal laser est envoyé dans la fibre de la sonde optique installée dans l'écoulement. Étant donné que l'indice optique de l'eau est supérieur à celui de l'air, le signal va être plus réfléchi et va plus être renvoyé vers le capteur si la sonde se situe dans l'air que

(a)



(b)

Figure 3.5 Photos de l'injection permettant un meilleur mélange.

si elle se situe dans l'eau. La Fig. 3.6 illustre le principe de fonctionnement de la fibre. La sonde optique est placée au milieu de la section en terme d'altituede comme cela est visible sur la Fig. 3.2 et elle est placée au centre du chemin d'écoulement.

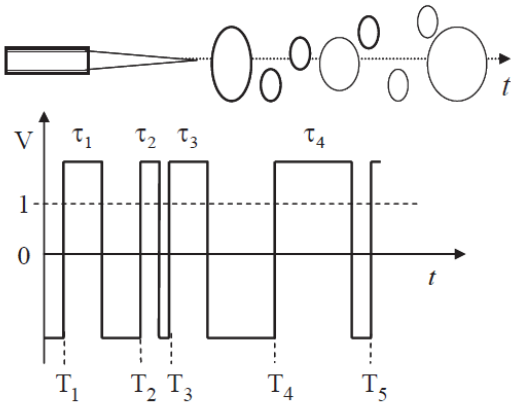


Figure 3.6 Schéma explicatif du fonctionnement d'une sonde optique d'après Pettigrew *et al.* (2005).

Les dimensions de la sonde optique sont présentées sur la Fig. 3.7. Les gouttes ont des

diamètres parfois de l'ordre de la centaine de microns, et elles seront alors difficiles à mesurer avec la sonde optique, qui a un diamètre de 170 microns.

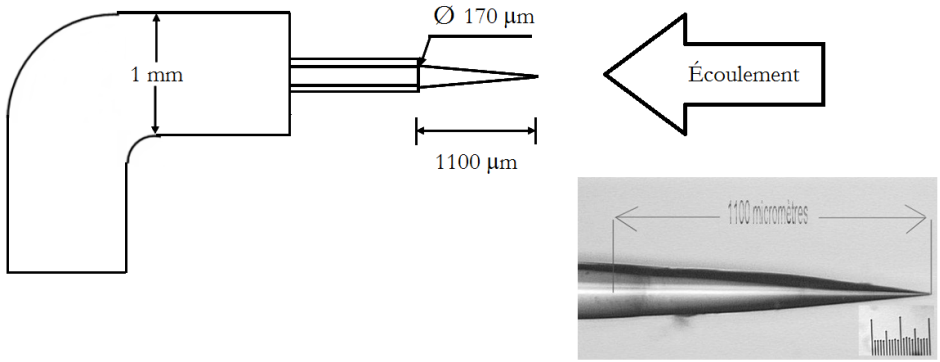


Figure 3.7 Dimensions de la sonde optique utilisée.

3.3.2 Sondes de pression

Nous utilisons des sondes de la marque Omega de modèle *PX409-015GUSBH*. Elles nous donnent la possibilité de mesurer les fluctuations de la pression entre 0 et 15 psi, avec une précision de $\pm 0.08\%$, et une fréquence d'acquisition de 1000 Hz. Les mesures de pression peuvent être réalisée en quatre positions de la section d'essai. Sur la Fig. 3.2 les positions des appareils de mesure expérimentaux sont récapitulés, avec les positions des sondes de pression numérotées de 1 à 4.

3.3.3 Collecteur isocinétique

Comme nous l'avons vu précédemment, le paramètre critique pour décrire un écoulement annulaire est la fraction E d'eau entraînée sous forme de gouttes. Or une sonde optique ne peut pas donner de mesures précises en ce qui concerne les gouttes, car celles ci sont trop petites. Nous avons alors dessiné et fabriqué un collecteur en nous inspirant de celui réalisé par Barbosa *et al.* (2002). Il s'agit d'un tube sur lequel des capteurs de pression sont installés et qui va prélever une partie de l'écoulement, dont la proportion en eau et en air va ensuite être mesurée. Les capteurs de pression servent à s'assurer que le prélèvement se fait de manière isocinétique, c'est à dire que l'écoulement à l'intérieur du tube collecteur va à la même vitesse que dans la section. En effet si les pressions dynamiques dans le tube et à l'extérieur du tube collecteur sont égales, cela signifie que l'écoulement va à la même vitesse à l'intérieur et à l'extérieur du tube. Le dessin technique du collecteur est présenté sur la Fig. 3.8, avec les deux mesures de pression bien visibles.

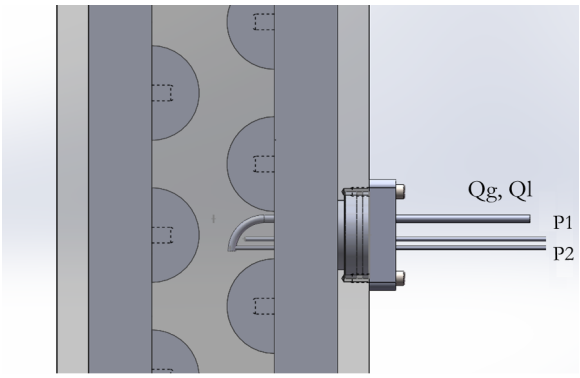
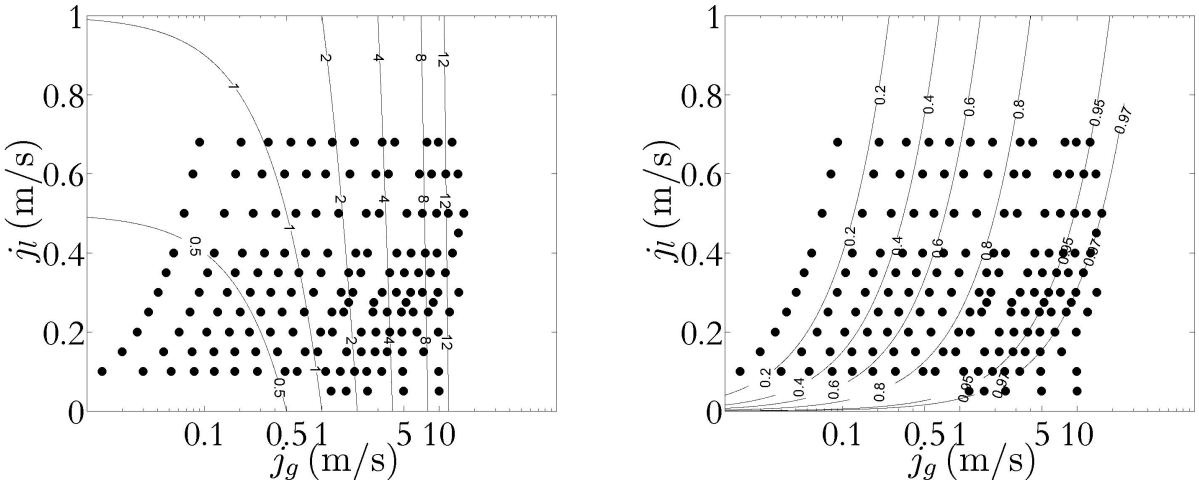


Figure 3.8 Dessin technique du collecteur fabriqué pour étudier les écoulements annulaires sur la tour.

3.4 Conditions expérimentales étudiées

Nous avons alors un montage expérimental nous permettant d'étudier un large panel de conditions expérimentales. Nous récapitulons ces points en fonction de j_g et j_l sur la Fig. 3.9a avec les iso-U tracées et sur la Fig.3.9b avec les iso-β tracées.



(a) Carte avec les iso-U tracées.

(b) Carte avec les iso-β tracées.

Figure 3.9 Conditions expérimentales accessibles.

CHAPITRE 4 CARACTÉRISATION DES ÉCOULEMENTS

Dans ce chapitre nous essayons de mettre en évidence les conditions pour lesquelles chaque écoulement devient présent. Pour cela nous caractérisons chaque écoulement en terme de fluctuations de taux de vide et de pression, et nous délimitons les débits pour lesquels chaque écoulement est visible. Comme nous l'avons présenté dans notre revue de littérature la carte de Noghrehkar *et al.* (1999) est *a priori* une des cartes effectuées en faisceau les plus fiables. De plus ils effectuent leurs expériences avec des débits qui nous intéressent, car ils sont proches de ceux présents dans les générateurs de vapeur. Nous allons alors nous baser sur ces travaux pour prédire l'écoulement annulaire. D'autre part, Ulbrich et Mewes (1994) mesurent et analysent les fluctuations de pression pour identifier les différents régimes d'écoulement et nous allons également utiliser leur méthode. Leur critère est basé sur le fait qu'un écoulement intermittent laissera apparaître des fluctuations de pression.

4.1 Post-traitement des données

Pour trier efficacement les différents profils, les transformées de Fourier ont été extraites des signaux de pression et les fonctions de densité de probabilité de taux de vide (PDF) ont été produites.

4.1.1 Transformées de Fourier des signaux de pression

La transformée de Fourier discrète de pression est calculée en utilisant plusieurs fenêtres de Hanning de 12 secondes avec un chevauchement de 75 %, sur une durée totale de 60 secondes. Elle est calculée sur chaque fenêtre avec la formule suivante où h est la fonction de Hanning :

$$\hat{f}(\nu) = \frac{1}{T}\int_0^T h(t)f(t)e^{-i\nu t}\,\mathrm{d}t \tag{4.1}$$

Nous avons calculé les transformées de Fourier car nous nous intéressons aux maxima des modules des transformées de Fourier. Pour obtenir une évaluation énergétique des composantes de pression il faudrait plutôt analyser les densités spectrales de puissance. Un exemple typique de transformée de Fourier est représenté sur la Fig. 4.1b où des fluctuations importantes de pression autour de 5 Hz peuvent être observées.

4.1.2 Fonctions de densité de probabilité de taux de vide

χ_g est la fonction indicatrice avec χ_g=1 si la sonde est dans le gaz et χ_g=0 si elle est dans le liquide. La fonction indicatrice est mesurée localement à une fréquence de 50 kHz. Pour obtenir la PDF, il faut d'abord calculer le taux de vide local moyen mesuré pendant un temps T_s appelé temps d'échantillonnage. Ce taux de vide local moyen est défini par :

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{T_S} \int_{t-\frac{T_s}{2}}^{t+\frac{T_s}{2}} \chi_g(\tau)\,\mathrm{d}\tau \tag{4.2}$$

Ces taux de vide moyens permettent alors de tracer la fonction de densité de probabilité défini par :

$$P(a \leq \varepsilon \leq b) = \int_a^b PDF(\varepsilon)\,\mathrm{d}\varepsilon \tag{4.3}$$

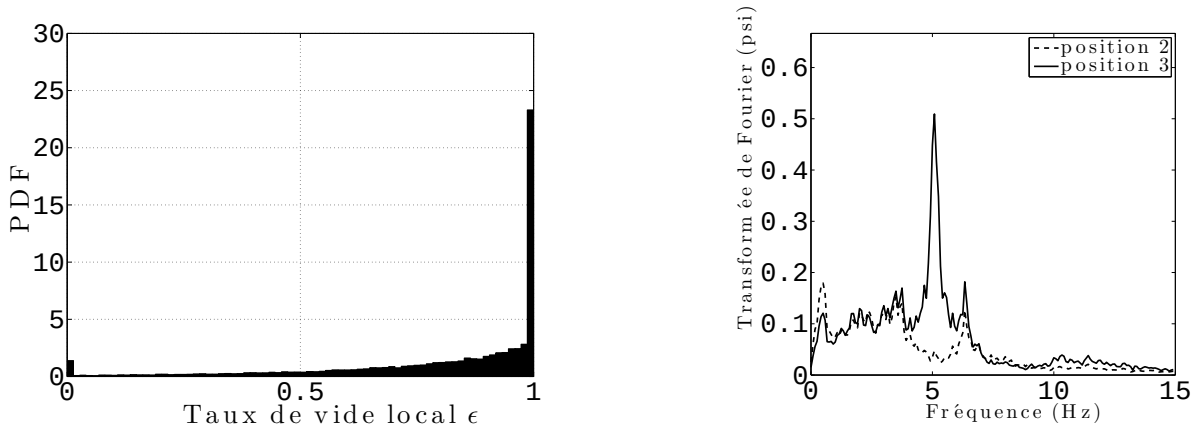
Où a et b sont deux valeurs de ε. Un exemple de PDF est tracé sur la Fig. 4.1a avec $PDF(0.99 \leq \varepsilon \leq 1) = 24$ donc $P(0.99 \leq \varepsilon \leq 1) = 0.01 * 24 = 0.24$. Cela signifie qu'il y a une probabilité de 0.24 que la sonde soit dans l'air pendant plus de 99 % de la période d'échantillonnage. Ce temps d'échantillonnage est important car deux PDF d'un même signal χ_g(t) avec des temps d'échantillonnage différents seront différentes. La longueur d'échantillonnage est calculée grâce à ce temps d'échantillonnage et à la vitesse homogène. C'est la longueur d'écoulement qui traverse la sonde durant un temps d'échantillonnage. Cette longueur d'échantillonnage L_s permet à l'expérimentateur de s'adapter à la taille des structures diphasiques de l'écoulement. Par exemple, si la longueur d'échantillonnage est de 1 mm, un pic à un taux de vide ε=0 % permet de conclure que l'écoulement est composé de structures d'eau plus grandes que 1 mm. Étant donné que la longueur d'échantillonnage dépend de la vitesse, le nombre de points de mesure durant cette longueur va décroître quand la vitesse va augmenter. Le résolution de la PDF sera alors adapté en conséquence.

4.1.3 Post-traitement réalisé par Noghrehkar *et al.* (1999)

Noghrehkar *et al.* (1999) ont une méthodologie qui comporte quelques imprécisions, en terme de choix de longueur d'échantillonnage, de définition de la PDF, et de résolution de la PDF sur ε.

Choix du temps d'échantillonnage

Noghrehkar *et al.* (1999) identifient les différents régimes uniquement par le profil des fonc-

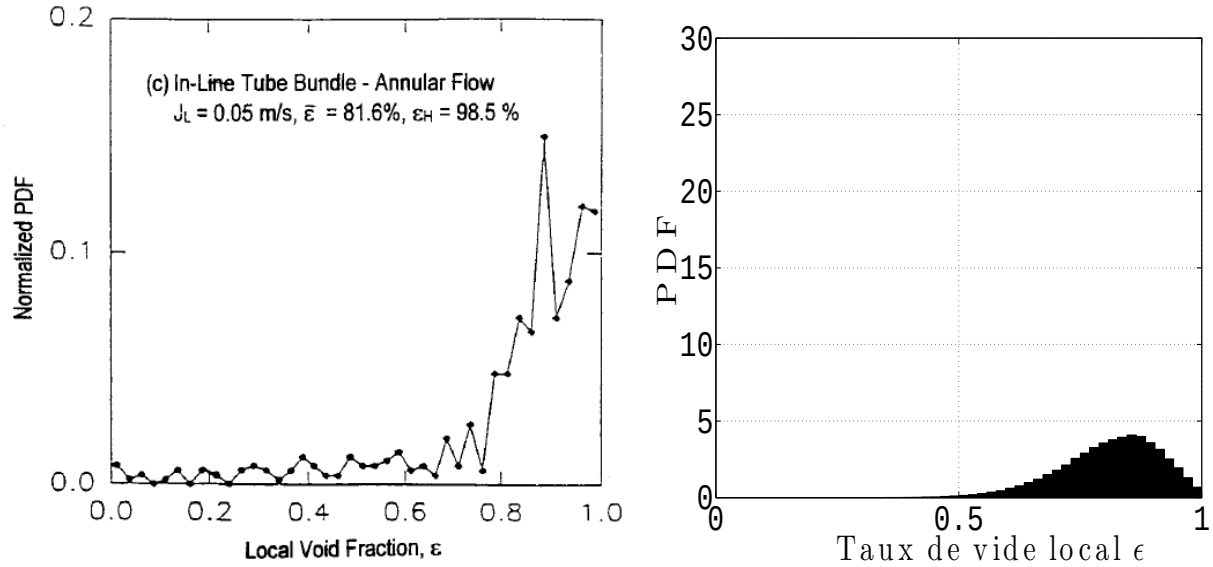


(a) Exemple de PDF avec β=80%, U=0.8 m/s et une longueur d'échantillonnage L_s=10 mm.

(b) Exemple de transformée de Fourier avec β=96%, U=6.9 m/s.

Figure 4.1 Exemple de PDF et de Transformée de Fourier

tions de densités de probabilités de taux de vide (PDF). Cependant leur PDF est calculée avec un temps d'échantillonnage fixe, ce qui signifie que leur longueur d'échantillonnage change avec la vitesse de l'écoulement. Leur méthode n'est pas d'utiliser la PDF en tant qu'outil de compréhension physique. Ils mesurent des PDF en tube cylindrique pour des écoulements dont ils connaissent le profil, et les comparent à des PDF en faisceau de tube pour conclure sur le profil. Le problème est que leur distance d'échantillonnage n'est pas toujours adaptée à l'écoulement. Au niveau de leur frontière entre écoulement intermittent et annulaire, leur longueur d'échantillonnage est L_s= 30 mm, ce qui est plus grand que les structures intéressantes. Les gouttes ont en effet une taille généralement inférieure au mm d'après Azzopardi (1997). La PDF va alors donner une information trop moyennée, comme on peut le voir sur la Fig. 4.2a. Il y a alors un problème de logique : avec cette longueur d'échantillonnage un écoulement annulaire implique un profil similaire à celui présenté en Fig. 4.2a, mais l'implication contraire n'est pas vrai. Il est possible de visualiser ce type de profil de PDF et d'avoir un écoulement intermittent. En prenant un point avec des débits comparables et L_s= 30 mm nous obtenons également un signal moyenné qui pourrait être facilement qualifié de signal d'écoulement annulaire (Fig. 4.2b), or pour ce point expérimental nous obtenons des fluctuations de pression très importantes, et une PDF réalisée avec une longueur d'échantillonnage plus adaptée prouve la présence de structures d'eau plus grandes que 1 mm. L'écoulement n'est pas annulaire et nous avons prouvé le problème d'échantillonnage de Noghrehkar *et al.* (1999). Nous allons adapter sa méthodologie en faisant varier notre temps d'échantillonnage pour être mieux adapté aux structures diphasiques.



(a) Exemple de signal de PDF présenté par Noghrehkar *et al.* (1999).

(b) PDF avec β=90%, U=7.3 m/s et une longueur d'échantillonnage L_s=30 mm.

Figure 4.2 Mise en évidence du défaut de méthodologie de Noghrehkar *et al.* (1999)

Définition théorique de la PDF

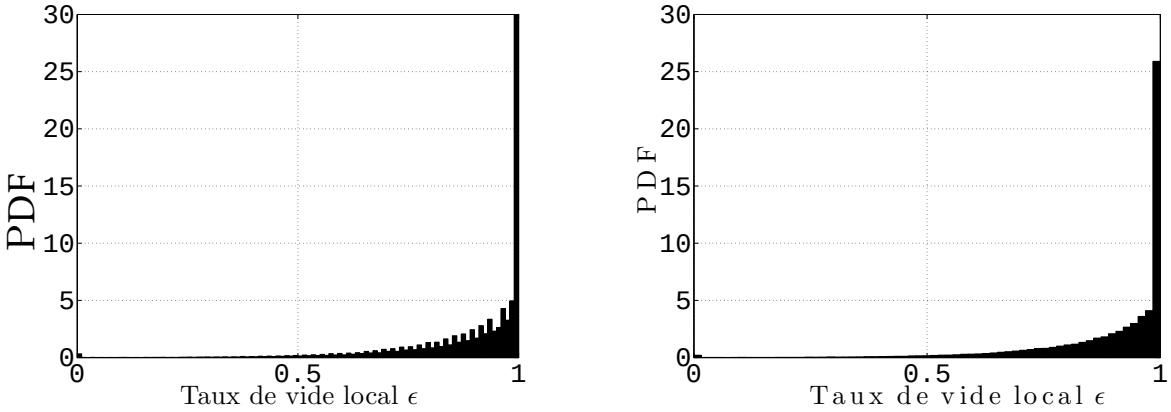
Comme nous l'avons expliqué précédemment la PDF permet d'accéder à la probabilité après intégration. Ainsi sur la Fig.4.2a Noghrehkar *et al.* (1999) n'ont pas tracé la PDF en fonction du taux de vide, mais la probabilité de présence de chaque taux de vide. En effet l'intégration de leur PDF sur tout le taux de vide ne donne pas une probabilité de 1.

Résolution sur le taux de vide

La résolution sur le taux de vide doit être adaptée au nombre de points composant la mesure moyenne du taux de vide. Par exemple, si le taux de vide est obtenu grâce à uniquement deux points de mesure, les valeurs accessibles ne sont que 0, 1, et 0.5. Il faut donc séparer ε en trois intervalles. Si on sépare ε en deux intervalles les valeurs de 0.5 seront soient considérées comme 1 ou 0, créant une erreur. Lorsque l'on a N points de mesure pour ε, il y a alors $N+1$ résultats possibles et on séparera toujours le taux de vide en un maximum de $N+1$ ou en un de ses diviseurs. De cette façon il y aura autant de valeurs accessibles possibles de taux de vide dans chaque intervalle permettant de calculer la PDF.

Dans la pratique nous limiterons le nombre maximum d'intervalles sur ε afin d'obtenir des graphiques les plus clairs possibles, et nous utiliserons toujours des diviseurs de $N+1$ pour cela. Un exemple de l'influence de la résolution est présenté sur la Fig. 4.3. Le mauvais choix

de résolution peut expliquer les fluctuations de valeur étonnantes que Noghrehkar *et al.* (1999) ont obtenu sur la Fig. 4.2a.



(a) PDF avec mauvais choix de résolution pour β=90%, U=6.3 m/s et L_s=10 mm.

(b) PDF avec bon choix de résolution pour β=90%, U=6.3 m/s et L_s=10 mm.

Figure 4.3 Dépendance de la PDF au choix de résolution sur ε.

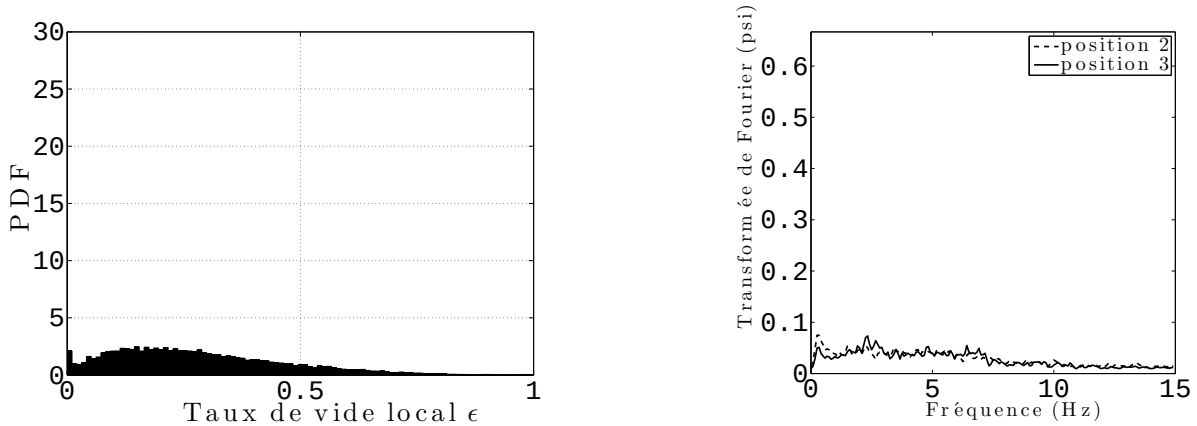
4.2 Caractéristiques des régimes d'écoulements

Habituellement seuls les écoulements à bulles, intermittents, et annulaires sont définis en faisceau de tubes. Cependant nos mesures nous permettent de définir d'autres catégories en nous appuyant sur les régimes décrits en tube cylindrique. L'analyse des fluctuations de pression et de taux de vide conduit à l'identification de quatre régimes d'écoulement appelés écoulement "bubbly" (à bulles), "slug" (à bouchons), "churn" (agité), et "annular" (annulaire). Deux sous-catégories d'écoulements agités sont également définis : agité-1 et agité-2. L'écoulement intermittent est défini par la présence de grandes structures à la fois d'eau et d'air, et de fluctuations de pression. Quand aucune fluctuation de pression n'est perceptible mais que de grandes structures à la fois de gaz et d'air sont présentes, l'écoulement est considéré comme à bouchons. Lorsque des fluctuations de pression sont en plus visibles, l'écoulement est considéré comme agité.

4.2.1 Écoulement à bulles

Le signal de la transformée de Fourier est presque plat pour les écoulements à bulles. Un écoulement à bulles est défini par contraste avec un écoulement de type bouchons défini plus loin. C'est un écoulement dont la PDF ne laisse pas apparaître de pic à ε=100% avec une longueur d'échantillonnage de 19 mm, ni de fluctuations de pression. Cette longueur

de 19 mm correspond à la distance intertube (P-D). Nous choisissons cette distance comme taille maximale de bulles, au delà les structures seront considérées comme des bouchons. Cette discrimination était déjà utilisée par Ulbrich et Mewes (1994). Une PDF typique d'écoulement à bulles est visible sur la Fig. 4.4a, et une transformée de Fourier caractéristique sur la Fig. 4.4b.



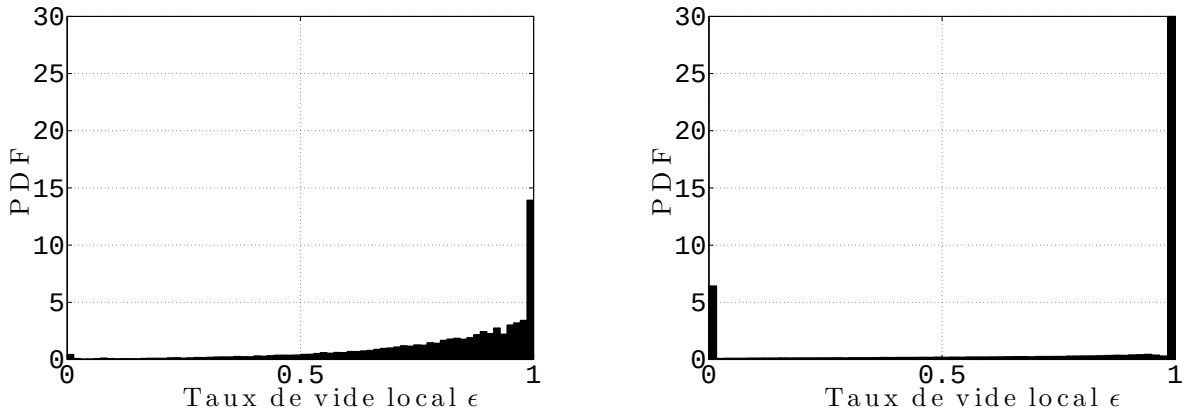
(a) PDF d'écoulement à bulles avec β=10%, U=0.6 m/s et L_s=19 mm.

(b) Transformée de Fourier pour un écoulement à bulles avec β=60% and U=1.0 m/s.

Figure 4.4 PDF et transformée de Fourier caractéristiques pour un écoulement à bulles

4.2.2 Écoulement à bouchons

L'écoulement de type à bouchons est caractérisé en tube cylindrique par de grandes structures de gaz en forme de balle de fusil. Ces structures sont généralement plus grandes que le diamètre du tube cylindrique. Compte tenu de notre géométrie, nous n'aurons pas de structures aussi bien définies, mais nous nous intéresserons à la présence de structures de la taille de la longueur caractéristique de notre section : 19 mm. La PDF de notre taux de vide est alors basée sur cette longueur, qui est la largeur minimale de la section, et nous voulons mettre en évidence des structures ayant au moins cette taille. Un exemple typique de PDF avec un pic montrant la présence de ces structures est indiqué sur la Fig. 4.5a. La PDF avec une longueur d'échantillonnage de 1 mm doit aussi laisser apparaître un pic à ε= 0% pour prouver qu'il existe des structures d'eau plus grandes que 1 mm, et donc que l'écoulement n'est pas annulaire. Un exemple typique de PDF avec cette longueur d'échantillonnage est représentée sur la Fig. 4.5b. Aucune oscillation de pression ne peut être détectée pour ce régime d'écoulement, ce qui permet de conclure que l'écoulement est intermittent de type à bouchons.



(a) PDF avec β=80%, U=0.80 m/s et L_s=19 mm. (b) PDF avec β=80%, U=0.8 m/s et L_s=1 mm.

Figure 4.5 PDF caractéristiques avec des longueurs d'échantillonnages différentes.

4.2.3 Écoulement agité

L'écoulement agité est défini par la présence de grandes structures à la fois d'air et d'eau et d'oscillations de pression. Nous avons observé différents types de fluctuations de pression, les fluctuations à basse fréquence autour de 0.6 Hz et 2.5 Hz, et celles à fréquence élevée autour de 7 Hz. Nous avons alors décidé de séparer l'écoulement agité en deux types d'écoulement : le agité-1 et le agité-2. Tous les écoulements agités laissent apparaître de grandes structures d'air et d'eau.

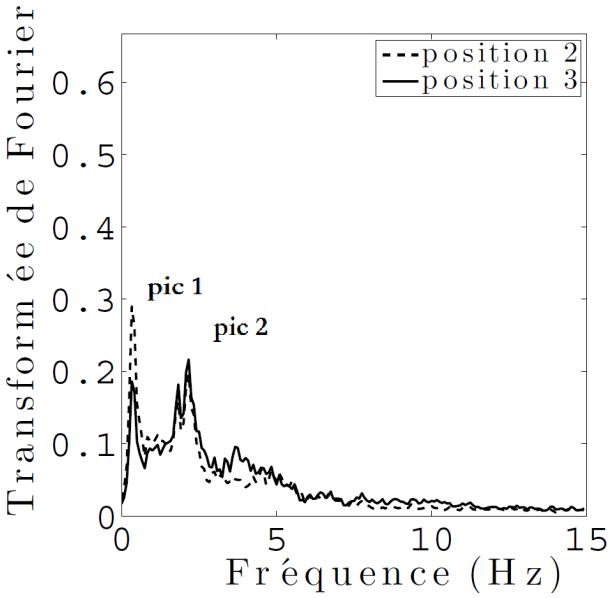
agité-1

L'écoulement agité-1 est alors défini par d'importantes fluctuations de pression à basse fréquence. Comme nous l'avons expliqué (Tapucu (2009)), ces fluctuations de pression sont une preuve de l'écoulement agité. Une transformée de Fourier typique de agité-1 peut être observée sur la Fig.4.6a, et une PDF typique de agité-1 sur la Fig.4.7a. Les fréquences des pics sont à 0.6 Hz et 2.5 Hz et ne dépendent pas des vitesses ou du taux de vide. La longueur d'échantillonnage de PDF utilisée est de 1 mm, vu que le but est de prouver qu'il y a des structures d'eau plus grandes que 1 mm, indiquant que l'écoulement n'est pas annulaire puisqu'il y a des structures plus grandes que des gouttes.

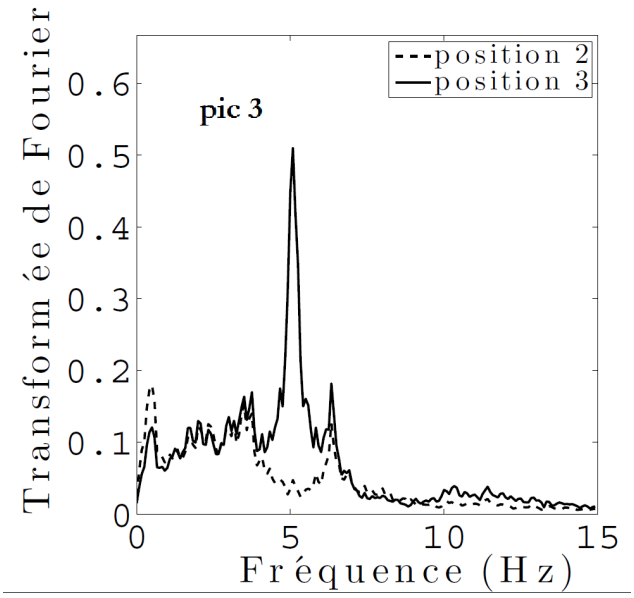
agité-2

Pour l'écoulement agité-2, si les oscillations de basse fréquence ne sont plus visibles, les oscillations à haute fréquence le sont maintenant. Une transformée de Fourier typique de

agité-2 est tracée sur la Fig.4.6b, et une PDF de agité-2 sur la Fig.4.7b. La fréquence de ce pic dépend linéairement de la vitesse homogène U et nous permet de définir un nombre de Strouhal. Plus de détails seront donnés sur ces fluctuations de pression dans le chapitre suivant.

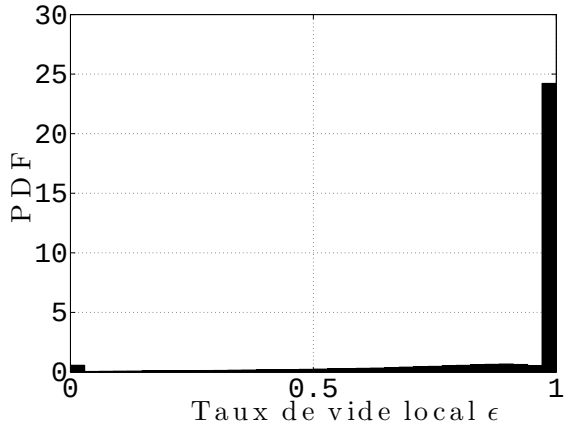


(a) Exemple de transformée de Fourier de agité-1 avec β=95%, U=3.6 m/s.

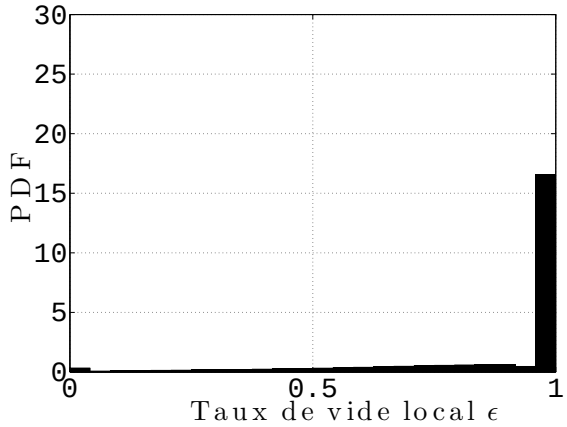


(b) Exemple de transformée de Fourier de agité-2 avec β=96%, U=4.7 m/s.

Figure 4.6 Exemples typiques de transformées de Fourier pour les écoulements agité-1 et agité-2.



(a) Exemple de PDF pour l'écoulement agité-1 avec β=95%, U=4.5 m/s, et L_s=1 mm.



(b) Exemple de PDF pour l'écoulement agité-2 avec β=95%, U=6.3 m/s, et L_s=1 mm.

Figure 4.7 Exemples typiques de PDF de taux de vide pour les écoulements agité-1 et agité-2.

4.2.4 Écoulement annulaire

Les deux critères utilisés pour définir l'écoulement annulaire reposent sur l'absence de fluctuations de pression selon Ulbrich et Mewes (1994) et aussi sur l'absence de structures de plus de 1 mm, qui est la taille maximale de gouttes en écoulement annulaire. La sonde optique étant fragile, son utilisation n'est pas possible avec le débit de gaz requis pour observer un écoulement annulaire. De plus elle ne serait pas capable de détecter les plus petites gouttes. Ainsi, elle a été utilisée uniquement pour confirmer le fait que l'écoulement n'est pas annulaire pour les points du régime agité. Pour mettre en évidence la présence d'écoulement annulaire nous nous sommes uniquement appuyés sur la disparition des fluctuations de pression, à des débits et des taux de vide plus élevés qu'en régime agité. Nous décidons d'appeler un profil de pression profil plat quand sa transformée de Fourier de pression a un maximum de moins de 0.2 psi. Un exemple de profil quasiment plat peut être caractérisé par la transformée de Fourier de la Fig. 4.8. Il existe en effet toujours des fluctuations de pression résiduelles.

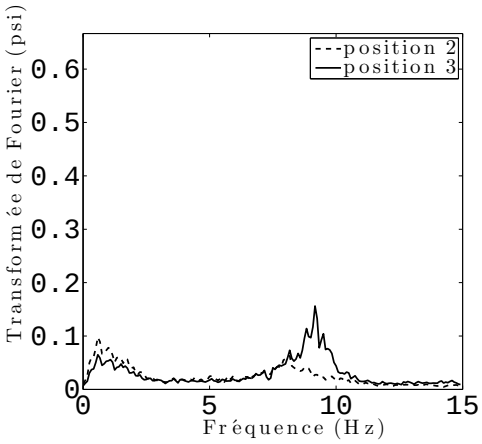


Figure 4.8 Transformée de Fourier typique d'un écoulement annulaire avec β=98% et U=14.4 m/s.

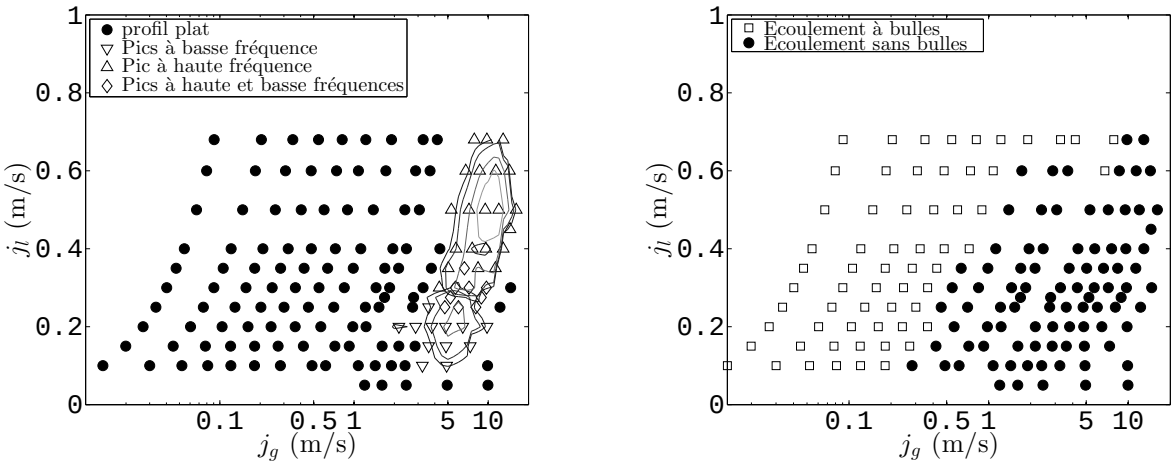
4.3 Cartes d'écoulement

Maintenant que nous avons défini les caractéristiques des différents écoulements nous pouvons réaliser une carte d'écoulement.

4.3.1 Frontières obtenues par l'analyse des signaux de pression

Le contour des maxima de la transformée de Fourier des oscillations à basse fréquence puis à haute fréquence est tracé sur la Fig. 4.9a. Le seuil permettant de décider qu'un écoulement

est agité est fixé à 0.2 psi. Nous voyons alors deux zones bien définies qui correspondent aux écoulements agité-1 et agité-2.



(a) Carte d'écoulement obtenue avec l'analyse des fluctuations de pression.

(b) Carte d'écoulement obtenue avec l'analyse des signaux de taux de vide.

Figure 4.9 Notre carte d'écoulements

Le lecteur peut remarquer sur la Fig. 4.6 que les signaux ne sont pas identiques en fonction de la position de mesure. Pour réaliser nos cartes nous avons considéré à chaque fois le maximum entre les positions de mesures 2 et 3. En réalité des cartes différentes seraient obtenues si les cartes de pression étaient basées uniquement sur la position 2 ou la position 3. Le maximum pour le régime agité-1 est en général le maximum à la position 2, et le maximum pour le régime agité-2 est en général le maximum à la position 3. Nous reviendrons sur cette question au chapitre 5.

4.3.2 Frontières obtenues à l'aide de l'analyse des PDF

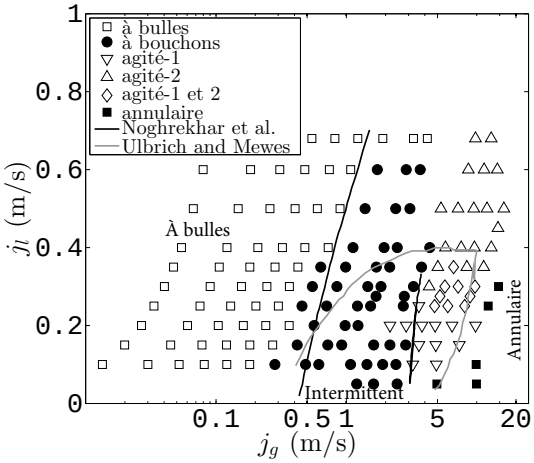
Les écoulements où il y a des structures d'air plus grandes que 19 mm sont séparés des autres. L'écoulement est considéré comme à bouchons quand au moins 10 % de l'air s'écoule sous forme de structures plus grandes que 19 mm. La carte résultant de cette étude est présentée en Fig. 4.9b. L'écoulement à bulles a une frontière directe avec l'écoulement agité, et dans ce cas le critère ne sera plus la présence de structures plus grandes que 19 mm, mais le début des fluctuations de pression.

4.3.3 Comparaison de notre carte avec les cartes existantes

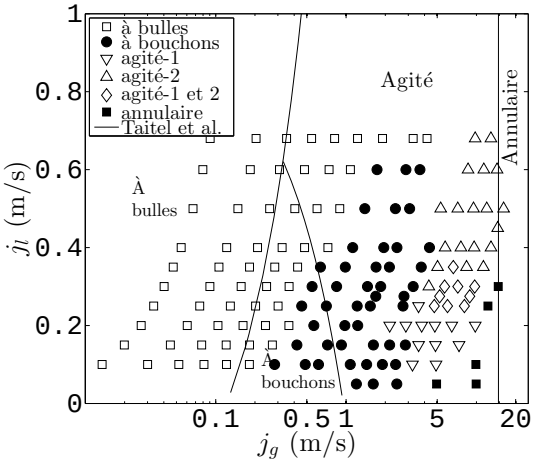
Les différentes cartes d'écoulement déterminées dans cette étude sont comparées à celles de Noghrehkar *et al.* (1999) et de Ulbrich et Mewes (1994) sur la Fig. 4.10a. Nos résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus par Taitel *et al.* (1980) dans une conduite verticale cylindrique, sur la Fig. 4.10b. Avec des vitesses superficielles liquide inférieures à 0.4 m/s, des résultats similaires à ceux que Ulbrich et Mewes (1994) sont obtenus, à la différence que nous séparons les différents types d'écoulement intermittents. Cependant, à des débits de liquide supérieurs, les résultats diffèrent fortement. Alors qu'ils affirment que l'écoulement est à bulles nous observons encore de très importantes fluctuations de pression. L'écoulement à bulles est visible dans des situations comparables à ce que Noghrehkar *et al.* (1999) observent, mais ces auteurs observent l'écoulement annulaire à des débits gazeux bien inférieurs à nos débits. Le début de l'écoulement annulaire pour Noghrehkar *et al.* (1999) correspond au début de nos fluctuations de pression, et donc de l'écoulement agité. Comme nous l'avons expliqué, cette différence est normale car la méthodologie de Noghrehkar *et al.* (1999) n'est pas pertinente pour mettre en évidence la présence d'écoulements annulaires. Finalement, Taitel *et al.* (1980) prédisent un écoulement annulaire pour des débits compatibles avec nos résultats, même si en terme d'écoulement agité et à bouchons il existe des différences notoires. Grant et Murray (1972) prévoient l'apparition de l'écoulement annulaire à des vitesses de gaz bien plus grandes que nous. La frontière qui pour eux est celle entre le régime agité et le régime à bulles correspond pour nous à la frontière entre agité-1 et agité-2.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons apporté de nouvelles informations sur les caractéristiques des écoulements. En particulier nous avons précisé les débits pour lesquels des fluctuations de pression apparaissent. Nous avons également réalisé une nouvelle carte d'écoulement plus complète que les précédentes, notamment en montrant les défauts de la méthodologie utilisée par Noghrehkar *et al.* (1999), et en l'adaptant grâce à notre compréhension physique. À des débits pour lesquels nous avions prévus d'observer des écoulements annulaires, nous observons d'importantes fluctuations de pression. Nous allons alors nous intéresser plus en détail à ces fluctuations de pression, pour déterminer si elles proviennent bien de l'écoulement agité et non d'effets dûs à notre montage expérimental. En effet il se peut que le montage expérimental soit responsable de fluctuations de pression.



(a) Carte d'écoulement obtenu comparée avec celle de Noghrehkar *et al.* (1999) et de Ulbrich et Mewes (1994).



(b) Carte d'écoulement obtenu comparée avec celle de Taitel *et al.* (1980). Taitel *et al.* (1980) distinguent deux types d'écoulements intermittents : à bouchons et agités.

Figure 4.10 Comparaison des résultats que nous obtenons avec ceux de la littérature

CHAPITRE 5 ANALYSE DES FLUCTUATIONS DE PRESSION

Dans ce chapitre nous nous intéressons plus spécifiquement aux fortes oscillations de pression décrites dans le chapitre précédent. Nous voulons comprendre quelle est leur origine et comment elles évoluent en fonction des débits, des positions de mesure, ou même du type de sortie utilisée. Nous réalisons des mesures de pression avec un temps d'acquisition de 60s avec des qualités volumétriques $\beta \in [80\%; 98\%]$, des vitesses superficielles de liquide $j_l \in [0.05; 0.68\ m/s]$ et des vitesses superficielles gazeuses $j_g \in [0.4; 15\ m/s]$. Nous observons alors d'importantes fluctuations de pression dont un exemple typique est présenté sur la Fig. 5.1. Sur ce graphique, nous faisons varier les vitesses des fluides tout en restant à une qualité volumétrique constante, et effectuons à chaque vitesse la transformée de Fourier du signal de pression.

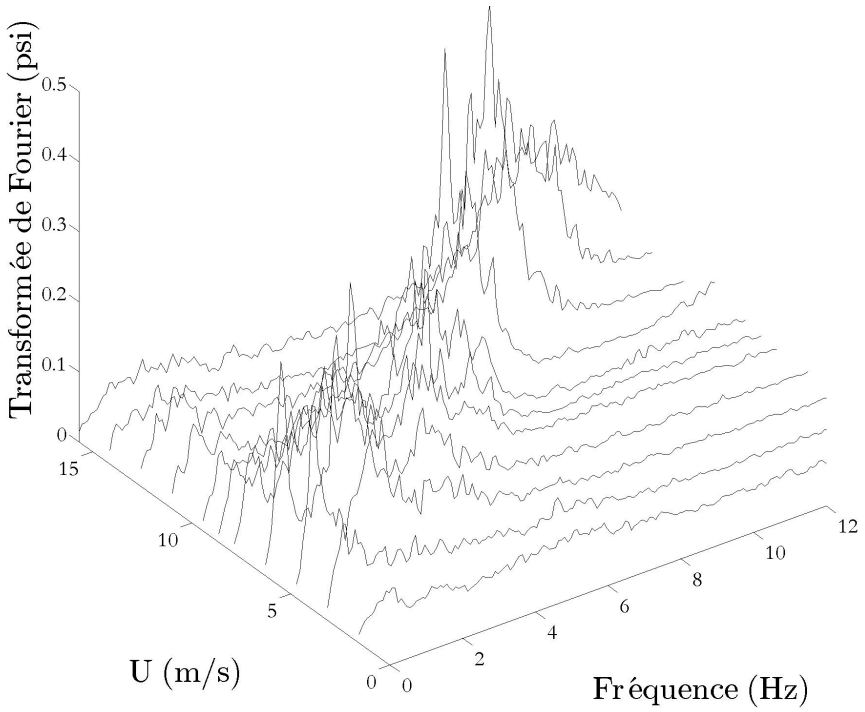


Figure 5.1 Tracés de la transformée de Fourier pour différentes vitesses homogènes U et $\beta = 97\%$

On observe tout d'abord deux pics à basse fréquence. Le premier pic est très étroit et a une fréquence d'environ 0.6 Hz indépendante de la vitesse et de β. Le second culmine aux alentours de 2.5 Hz, est plus large, et a également une fréquence indépendante de la vitesse et de β. Enfin une troisième composante fréquentielle est présente dans le spectre tracé. Sa

fréquence évolue en fonction de la vitesse, avec une tendance linéaire. Comme déjà souligné dans le chapitre précédant, il est à noter que selon la qualité volumétrique et la vitesse, ces composantes ne seront pas toutes présentes ou aussi significatives. Par exemple, à des qualités volumétriques inférieures à $\beta = 90\%$, les fluctuations de pression observées sont beaucoup moins significatives.

5.1 Influence de la vitesse et de β sur les fréquences et amplitudes des fluctuations de pression

Nous essayons de comprendre quel est le lien entre ces fluctuations de pression et les vitesses des fluides respectifs.

5.1.1 Les deux pics à basse fréquence

Nous traçons alors les fréquences et amplitudes des maxima des deux premiers pics en fonction de la vitesse homogène et observons que les fréquences de ces deux pics restent constantes, comme cela est illustré pour $\beta = 96\%$ sur la Fig. 5.2 pour la position 2. Les deux pics ont des comportements similaires. Si la fréquence du maximum reste constante, l'amplitude maximale, elle, se produit pour des vitesses de plus en plus grandes quand la qualité volumétrique augmente. En réalité ces pics en amplitude seront toujours à leur maximum d'amplitude pour des vitesses surfaciques de liquide comprises entre 0.25 et 0.30 m/s, et donc pour des vitesses homogènes et des vitesses de gaz de plus en plus grandes lorsque β augmente. L'amplitude passe par un maximum pour ces débits de liquide puis décroit ensuite quand les vitesses augmentent. On note aussi que ces deux pics atteignent leur maximum pour $\beta = 96\%$ puis décroîent en amplitude pour disparaître à partir de $\beta = 98\%$. Il est important de retenir que c'est le débit liquide qui a le plus d'influence sur cette composante de pression à β fixé.

5.1.2 Les pics à basse fréquence dans la littérature

Le pic étroit à plus basse fréquence est observé sur la force de traînée subie par les tubes par Zhang *et al.* (2007) ou Pettigrew *et al.* (2005). Il est généralement écarté, et décrit comme un phénomène annexe non intéressant. Il est à noter que ce premier pic n'est observé dans la littérature que par les auteurs utilisant des faisceaux constitués de moins de trois tubes de largeur. Le deuxième pic est aussi observé par ces deux groupes ainsi que par Senez *et al.* (2010) sur la force de traînée autour de fréquences proches des nôtres même si légèrement supérieures. Cette composante est interprétée comme provenant de fluctuations de quantité de mouvement diphasique à l'échelle de la section à l'aide de mesures complémentaires avec

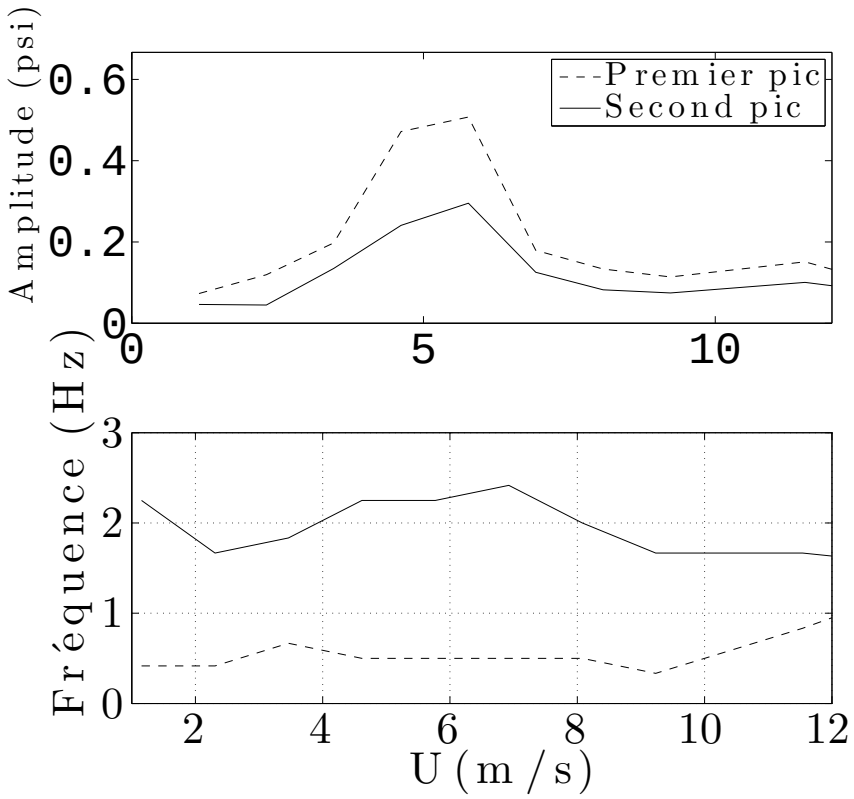


Figure 5.2 Dépendances de la fréquence et de l'amplitude des pics à basse fréquence à la vitesse homogène pour $\beta = 96\%$ à la position 2

des sondes optiques. Ces groupes les observent aussi dès $\beta = 80\%$, avec des débits de liquide plus importants que les nôtres. Il sera d'ailleurs intéressant de changer notre pompe pour étudier cette zone dans le futur.

5.1.3 Le pic à haute fréquence

Dans notre étude le troisième pic passe lui aussi par un maximum mais pour des vitesses supérieures. Nous traçons l'amplitude de ce pic et nous observons que l'amplitude augmente pour des vitesses significativement plus grandes, comme cela est visible sur la Fig. 5.3 pour la position 3. Ce pic n'est réellement présent qu'à partir d'une vitesse de 6 m/s et décroît pour des vitesses au delà de 12 m/s. Il est également beaucoup moins visible à partir de $\beta = 98\%$. Nous observons que l'évolution du pic à haute fréquence se fait de manière proportionnelle à la vitesse homogène ce qui nous permet de définir un nombre de Strouhal. Nous obtenons des valeurs de ce nombre de Strouhal entre 0.025 et 0.045.

Nous calculons un nombre de Strouhal pour chaque β en effectuant une régression linéaire et

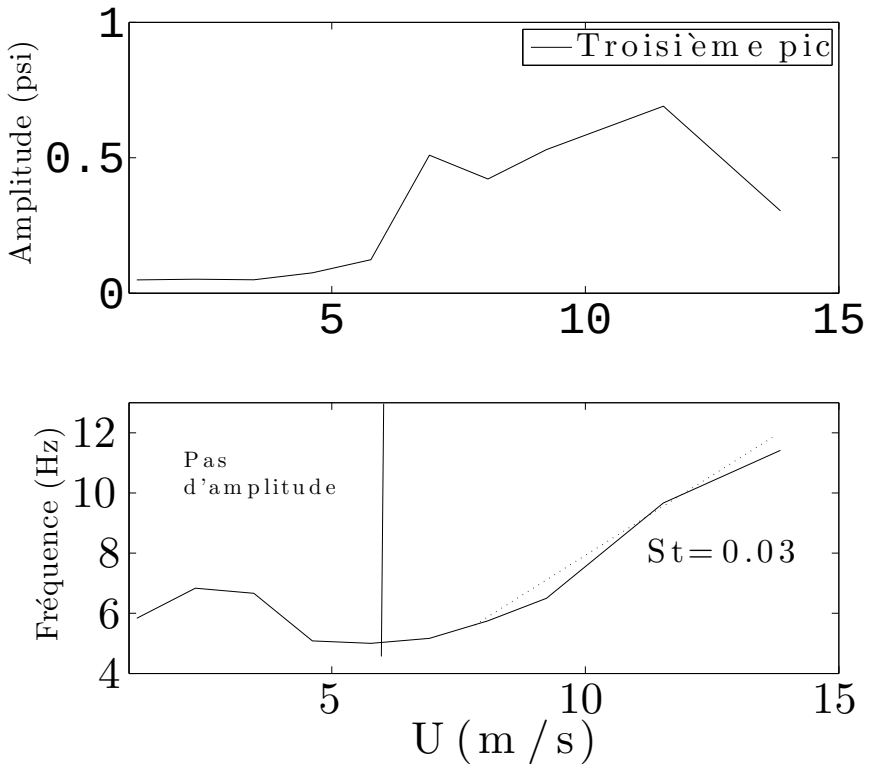


Figure 5.3 Dépendances de la fréquence et de l'amplitude à la vitesse homogène du troisième pic pour $\beta = 96\%$ à la position 3

obtenons le coefficient de dépendance de la fréquence à la vitesse. Pour calculer le nombre de Strouhal nous utilisons une longueur caractéristique de 38 mm qui correspond au diamètre des tubes que nous utilisons.

5.1.4 Le pic à haute fréquence dans la littérature

Cette hypothèse d'utiliser le diamètre des tubes est effectuée étant donnée l'analyse effectuée par Zhang *et al.* (2008). Ils mesurent des forces de portance du même ordre de grandeur que nous en terme de fréquence, et une dépendance similaire à la vitesse. Ils prouvent à l'aide de mesures de sonde optique que ces forces de portance sont liées à des effets de sillage de tubes. Ils associent à leurs forces un nombre de Strouhal pour chaque β. Nous illustrons nos résultats obtenus pour le nombre de Strouhal sur la Fig. 5.4. Sur cette figure nous traçons en plus de nos valeurs les valeurs obtenues par Senez *et al.* (2010), ce qui nous permet de confirmer que le phénomène que nous observons est cohérent avec celui décrit dans la littérature. En effet si on extrapole les valeurs obtenues par Senez *et al.* (2010) à haut taux de vide on obtient des valeurs similaires aux nôtres. Nous n'avons pas pu étudier de manière comparable à ces

auteurs les fluctuations à $\beta = 80\%$ et $\beta = 70\%$ car nos débits de liquide étaient limités.

L'interprétation en terme de sillage de tubes est intéressante, mais à la lumière des écoulements effectués en tube cylindrique sur les écoulements agités, il est aussi important de s'intéresser aux vagues. En tube cylindrique, en régime agité, de nombreux auteurs comme Barbosa *et al.* (2001) observent des vagues apparaissant à intervalle régulier. Leurs nombres de Strouhal sont moins proches de ceux que nous obtenons, mais compte tenu de la différence importante de géométrie, cela laisse ouverte l'hypothèse que les fluctuations de pression proviennent de vagues, qui elles mêmes affectent le sillage des tubes, et que le sillage des tubes lui même affecte les vagues.

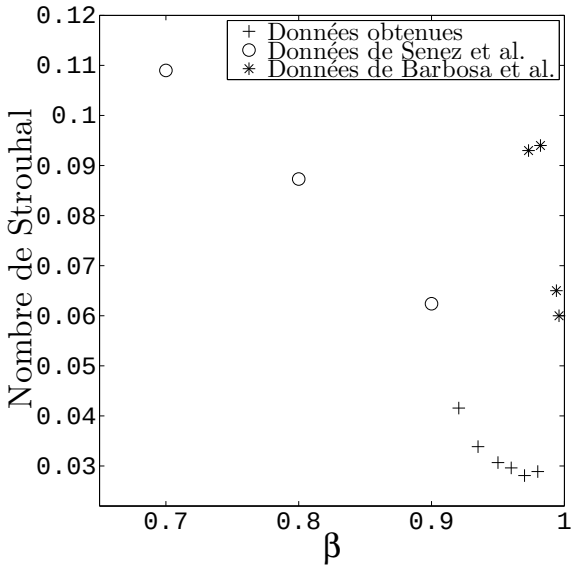


Figure 5.4 Nombre de Strouhal calculé en fonction de la qualité volumétrique

5.1.5 Comparaison à la littérature en terme d'amplitude

Si la comparaison des fréquences se justifient, la comparaison des amplitudes est plus délicate. En effet, les auteurs comme Zhang *et al.* (2007) et Senez *et al.* (2010) mesurent les forces subies par leur tube, forces qui sont difficiles à comparer précisément aux fluctuations de pression que nous mesurons.

5.2 Influence de la position dans la colonne sur les fluctuations de pression

Les fluctuations de pression dépendent de la position de mesure dans le montage expérimental, et nous nous intéressons alors à la dépendance de ces fluctuations à cette position. Nous

mesurons la pression à chaque position de mesure pour des conditions similaires et traçons les spectres obtenus sur la Fig. 5.6.

5.3 Dépendances à la position sur les trois pics

On observe alors des composantes de pression très différentes selon la position, ce que nous récapitulons dans le tableau 5.1. La position 1 est particulière car la sonde se situe dans l'eau, sous le niveau de l'injection d'air et du faisceau. Il s'agit alors de capter les fluctuations qui sont à l'échelle de la section entière sachant que certaines composantes pourront avoir été filtrées. On retrouve alors uniquement le pic à très basse fréquence, qui est d'ailleurs à son maximum pour cette position. Ce pic va décroitre constamment avec l'altitude dans la section. En position 2 les trois pics sont présents. Le deuxième pic est très légèrement moins important en position 2 qu'en position 3, en effet ce pic croît en amplitude avec l'altitude. Le troisième pic, à haute fréquence, est lui beaucoup moins important en position 2 qu'en position 3. Il est intéressant de noter que les premier et deuxième pics ont des évolutions contraires en terme d'amplitude. Le deuxième pic croît avec l'altitude quand le premier décroît. La mesure effectuée en position 4 laisse apparaître un profil quasiment plat. La position 4 est aussi particulière car la sonde se situe juste après le dernier tube du faisceau, donc dans une situation intermédiaire entre la sortie plus large, et le faisceau (ces deux points de mesures particuliers sont visibles sur la Fig. 5.5).

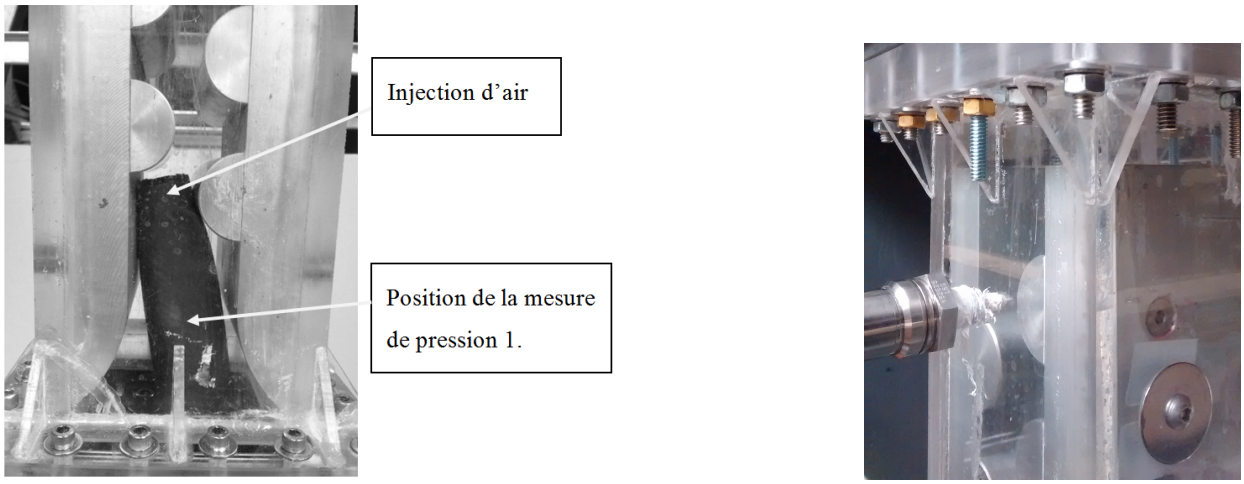
Tableau 5.1 Récapitulatif des amplitudes des fluctuations de pression

	position 1	position 2	position 3	position 4
Premier pic à basse fréquence (agité-1)	+++	++	+	0
Deuxième pic à basse fréquence (agité-1)	+	++	++	0
Troisième pic à haute fréquence (agité-2)	0	+	++++	0

5.3.1 Changements de carte d'écoulement dûs à la position

Comme nous l'avons expliqué au chapitre 4, les cartes d'écoulement vont dépendre de la position à laquelle les mesures sont effectuées. Nous traçons sur la Fig. 5.7b des cartes basées sur les quatre positions de mesure de pression.

Ces cartes permettent de bien comprendre comment la position de mesure va changer la défi-



(a) Position 1 (b) Position 4

Figure 5.5 Images des positions de mesure de pression 1 et 4

nition de l'écoulement. L'importance des pics à basse fréquence diminue avec l'altitude, alors que l'importance du pic à haute fréquence augmente avec l'altitude. Très peu de fluctuations de pression sont observables au point de mesure 4, probablement à cause de la proximité de la sortie.

5.3.2 Influence de la position dans la littérature

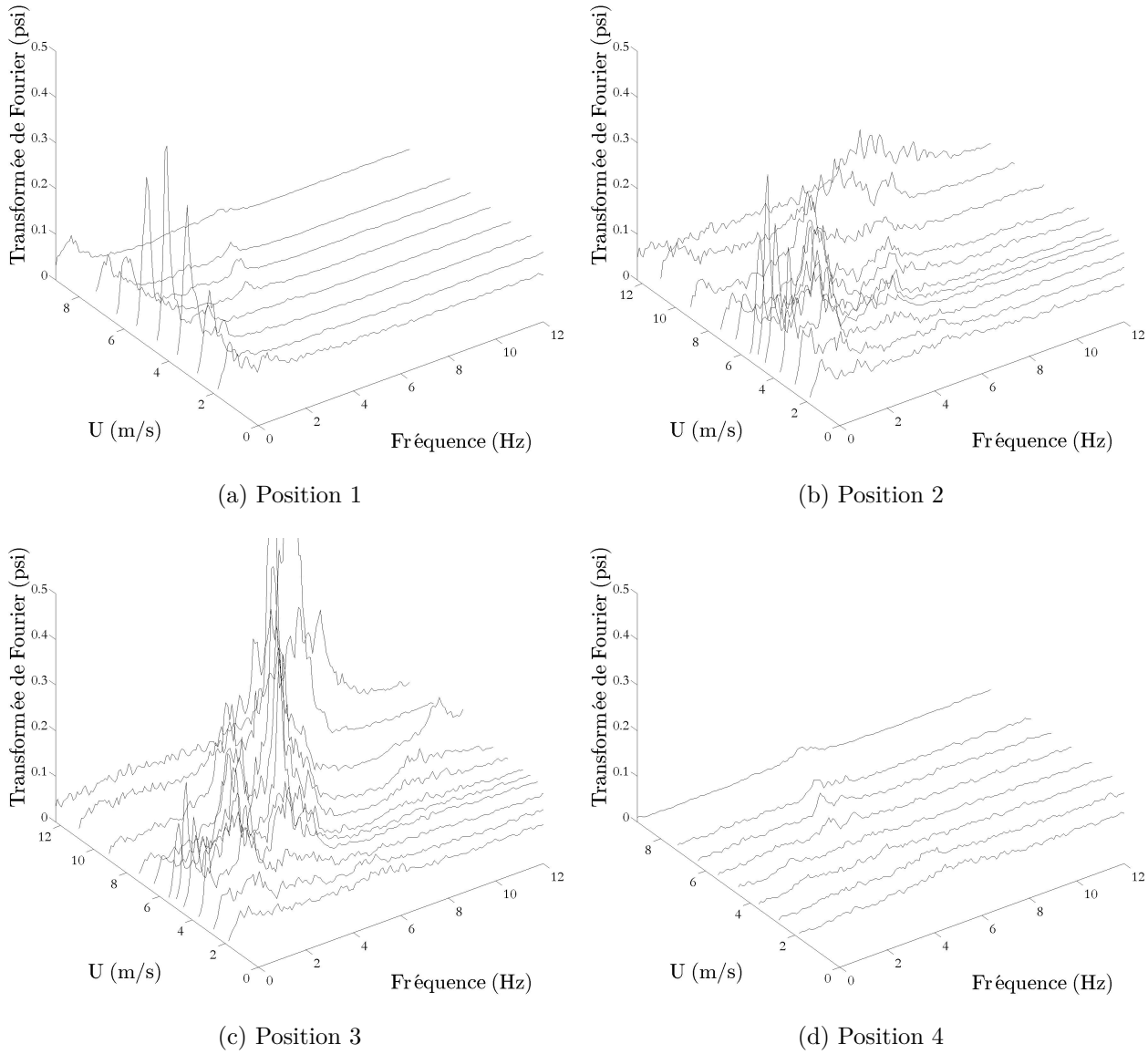
On observe que le troisième pic a une amplitude qui croît avec l'altitude, ce que Zhang *et al.* (2009) observent aussi. Ils notent que le deuxième pic qu'ils observent sur les forces de traînée et qui correspondent à notre deuxième pic à basse fréquence croît en amplitude. Ainsi globalement les mêmes tendances sont observées.

5.4 Corrélation des signaux des diverses positions

Nous nous intéressons maintenant aux corrélations entre les diverses positions.

5.4.1 Les pics à basse fréquence. (premier et deuxième pics)

Tout d'abord on note que le premier pic est totalement corrélé entre les positions 1, 2, et 3. De plus il y a très peu de déphasage entre les signaux, ainsi il s'agit probablement d'une onde acoustique, qui se propage à la vitesse du son, comme cela est illustré sur la Fig. 5.8. Sur cette même figure on voit que le deuxième pic est aussi très bien corrélé entre les positions 2 et 3. On mesure la pente de la phase et on évalue alors une vitesse de propagation de l'ordre



(a) Position 1

(b) Position 2

(c) Position 3

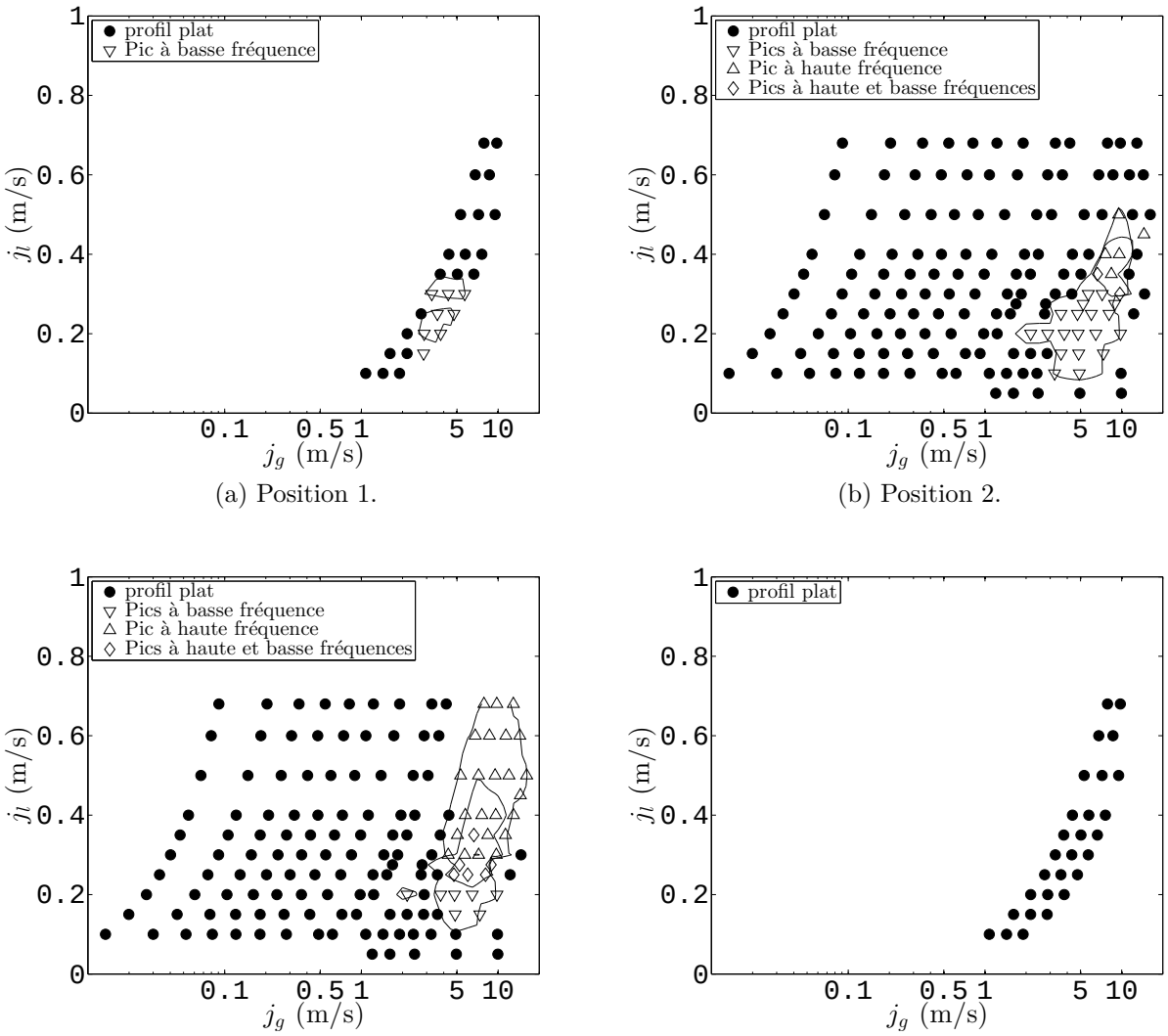
(d) Position 4

Figure 5.6 Tracés des transformées de Fourier en fonction des positions dans la section pour $\beta = 95\%$

de 5 m/s, ce qui correspond à l'ordre de grandeur de la vitesse homogène de l'écoulement de 6.3 m/s.

5.4.2 Le pic à haute fréquence. (troisième pic)

Le troisième pic est peu significatif à la position 2, et le signal n'est que moyennement cohérent avec celui en position 3, comme on peut le voir sur la Fig. 5.9a. Ce pic ne devient cohérent que pour les très hauts débits comme sur la Fig 5.9b, en même temps que le troisième



(a) Position 1.

(b) Position 2.

(c) Position 3.

(d) Position 4.

Figure 5.7 Cartes d'écoulement basées sur une seule position de mesure de pression

pic devient de moins en moins important en amplitude. Il semble que lorsqu'on s'approche des conditions de l'écoulement annulaire et que les fluctuations de pression diminuent, la corrélation augmente.

5.4.3 Cas particulier : la cohérence entre les positions 1 et 2

Nous observons en analysant le déphasage que le signal à basse fréquence est d'abord en position 2 avant d'être en position 1. Étant donné que la position de mesure 1 se situe sous l'injection, nous interprétons cela par le fait que les fluctuations de pression naissent dans la zone de mélange située après l'injection, soit entre les positions 1 et 2. La propagation

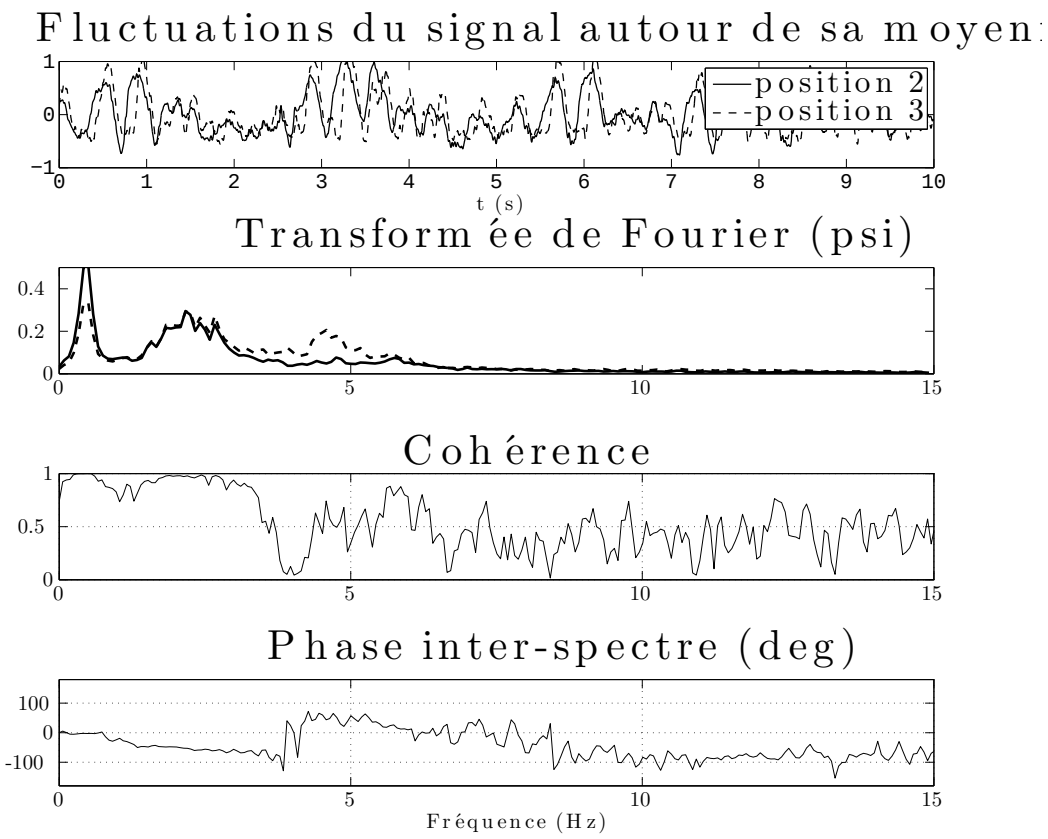
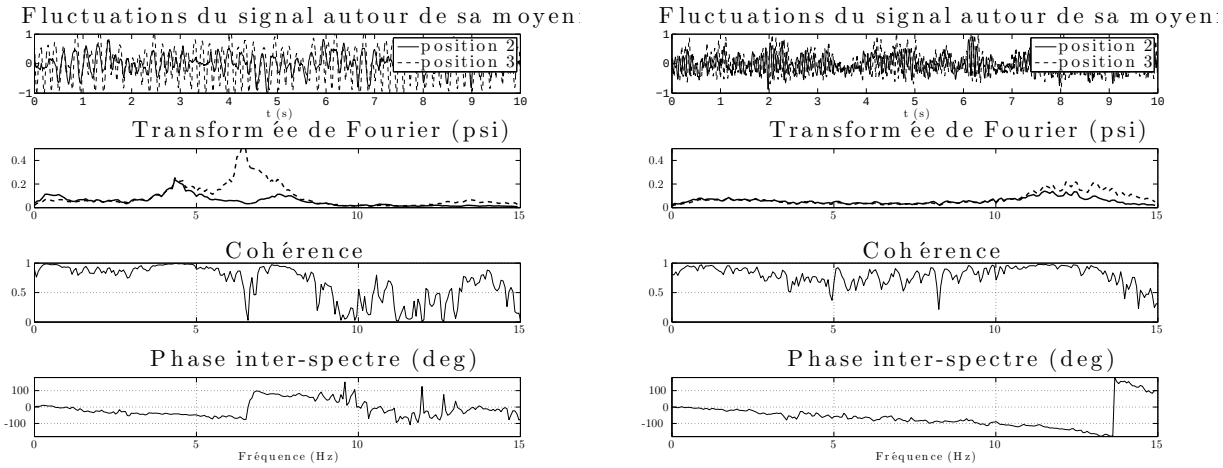


Figure 5.8 Corrélation fréquentielle entre les signaux obtenus aux positions 2 et 3, avec β=96% et U=6.3 m/s

jusqu'au point de mesure 1 est plus longue que jusqu'au point de mesure 2.

5.4.4 Corrélations des divers signaux dans la littérature

Dans la littérature, la cohérence des pics à basse fréquence est aussi bonne que pour nous, mais il n'y a malheureusement pas de données de vitesses de propagation. En ce qui concerne la cohérence du troisième pic correspondant à la portance, la cohérence est moins bonne même si elle est présente sur une certaine distance. Cette cohérence décroît assez vite avec la distance, ce qui est en accord avec ce que nous observons.



(a) β=96% et $U = 9.2m/s$

(b) β=97% et U=15.7m/s

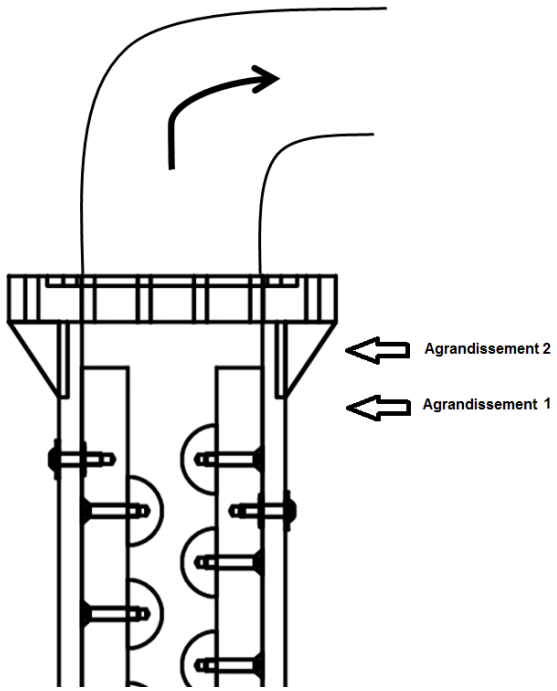
Figure 5.9 Corrélation fréquentielle entre les signaux obtenus aux positions 2 et 3

5.4.5 Hypothèses de l'origine des forces quasi-périodiques

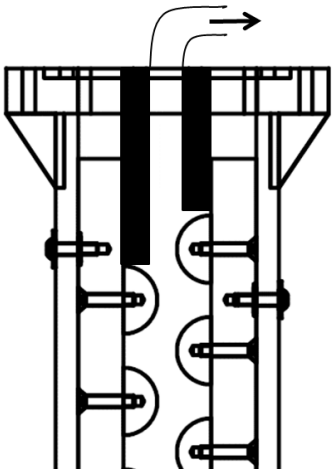
Les forces obtenues étant parfois très corrélées, il est possible que les fluctuations observées proviennent de l'entrée ou de la sortie et se propagent. Nous émettons alors l'hypothèse que la sortie que nous utilisons expérimentalement a un fort effet. En effet la section s'agrandit fortement après le dernier tube, comme cela est visible sur la Fig. 5.10a. Comme nous l'avons expliqué dans la revue de littérature, cela peut engendrer des effets de jet qui se répercutent sur toute la section. Après les derniers tubes la section augmente environ d'un facteur 2. Après le support des tubes, la section devient encore deux fois plus grande environ. Nous pensons que ces élargissements peuvent être responsables de fluctuations de pression car les fluides vont devoir fortement ralentir. Si la sortie est responsable de ces fluctuations, alors il faudra la prendre en compte pour la conception de générateurs de vapeur dans le futur.

5.5 Mesures de pression avec une nouvelle sortie

Suite à l'hypothèse émise précédemment nous changeons la sortie pour que le ralentissement des fluides soit moins conséquent. Nous limitons la fin du faisceau comme sur la Fig. 5.10b en ajoutant des cales afin que la surface n'augmente plus significativement. À l'oeil aucune différence dans l'écoulement n'est visible. Nous réalisons alors à nouveau les mêmes mesures de pression que sur la Fig. 5.6 et observons des données significativement différentes.



(a) Schéma de la sortie de la section d'essai utilisée. (Sortie A)



(b) Schéma de la nouvelle sortie de section (Sortie B). En noir les cales en plexiglas ajoutées.

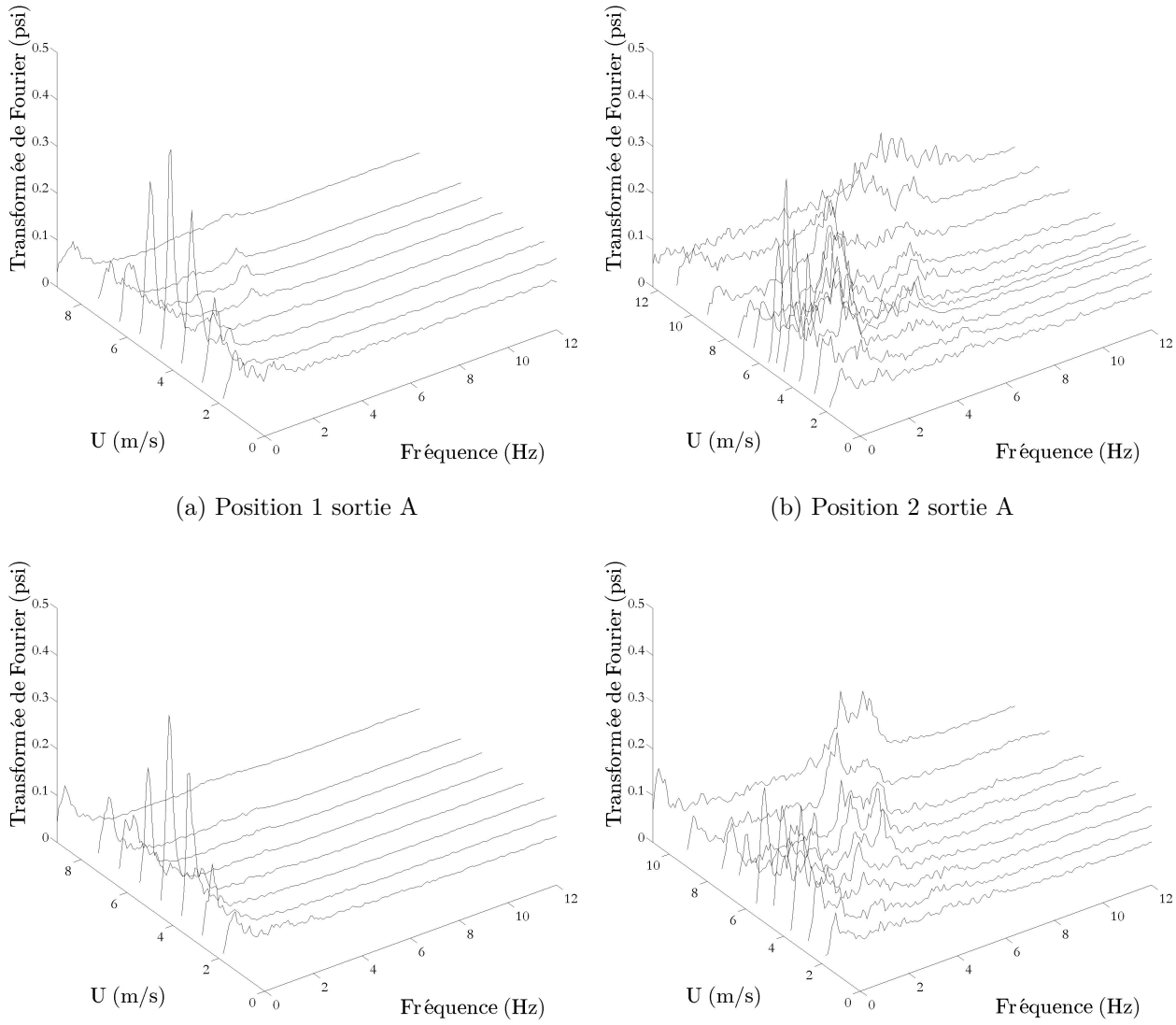
Figure 5.10 Schéma de la sortie de la section d'essai utilisée pour les premières expériences

5.5.1 Influence de la sortie sur les positions 1 et 2

Nous comparons alors sur la Fig. 5.11 les spectres obtenus pour les positions 1 et 2 avec les sorties A et B. Tout d'abord nous notons que très peu de différence n'est visible pour la position 1, si ce n'est que le pic semble être légèrement moins important avec la nouvelle sortie. En position 2 on observe des amplitudes très semblables pour les deux premiers pics, avec une différence au niveau de la troisième composante. Nous traçons alors sur la Fig. 5.12 l'évolution des fréquences et des amplitudes maximales des deux premiers pics en fonction de la vitesse homogène pour les deux sorties et observons des évolutions très similaires, même si les fréquences du deuxième pic sont légèrement plus élevées. On retient surtout que pour ces deux positions peu de différence n'est visible.

5.5.2 Influence de la sortie sur les positions 3 et 4

Sur la Fig. 5.13 ce sont les positions 3 et 4 que nous comparons avec des sorties différentes. En ce qui concerne la position 3, de très importantes différences apparaîssent maintenant. Les deux premiers pics à basse fréquence sont d'amplitude à nouveau assez semblable même



(a) Position 1 sortie A

(b) Position 2 sortie A

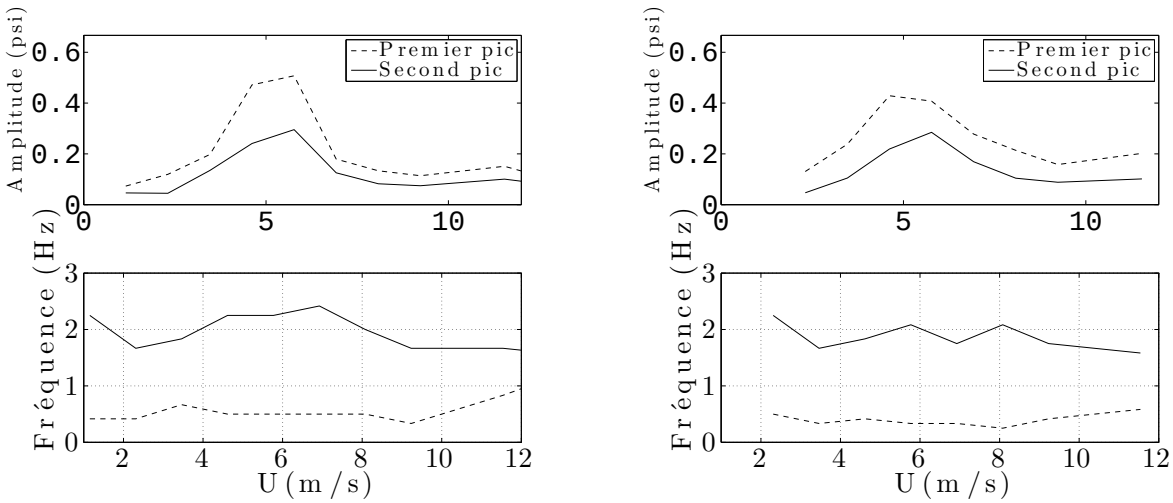
(c) Position 1 sortie B

(d) Position 2 sortie B

Figure 5.11 Comparaison des transformées de Fourier pour les positions 1 et 2 dans la section pour $\beta = 95\%$ avec les deux sorties

si les amplitudes pour le deuxième pic sont plus importantes que pour la nouvelle sortie. La différence la plus notable concerne le troisième pic, qui, même si il reste présent à une fréquence relativement semblable, a une amplitude largement moins importante. Les résultats de la position 4 sont eux aussi surprenants : des fluctuations de pression très importantes sont maintenant visibles alors que le profil était complètement plat avec la sortie A. Cela concerne aussi bien les pics de pression à basse fréquence et à haute fréquence.

On observe alors des composantes de pression très différentes selon la position, et très diffé-



(a) sortie A (b) sortie B

Figure 5.12 Dépendances de la fréquence et de l'amplitude des pics à basse fréquence à la vitesse homogène en position 2 pour $\beta = 96\%$ selon la sortie

rentes de ce que nous observions avec la sortie A, ce que nous récapitulons dans le tableau 5.2.

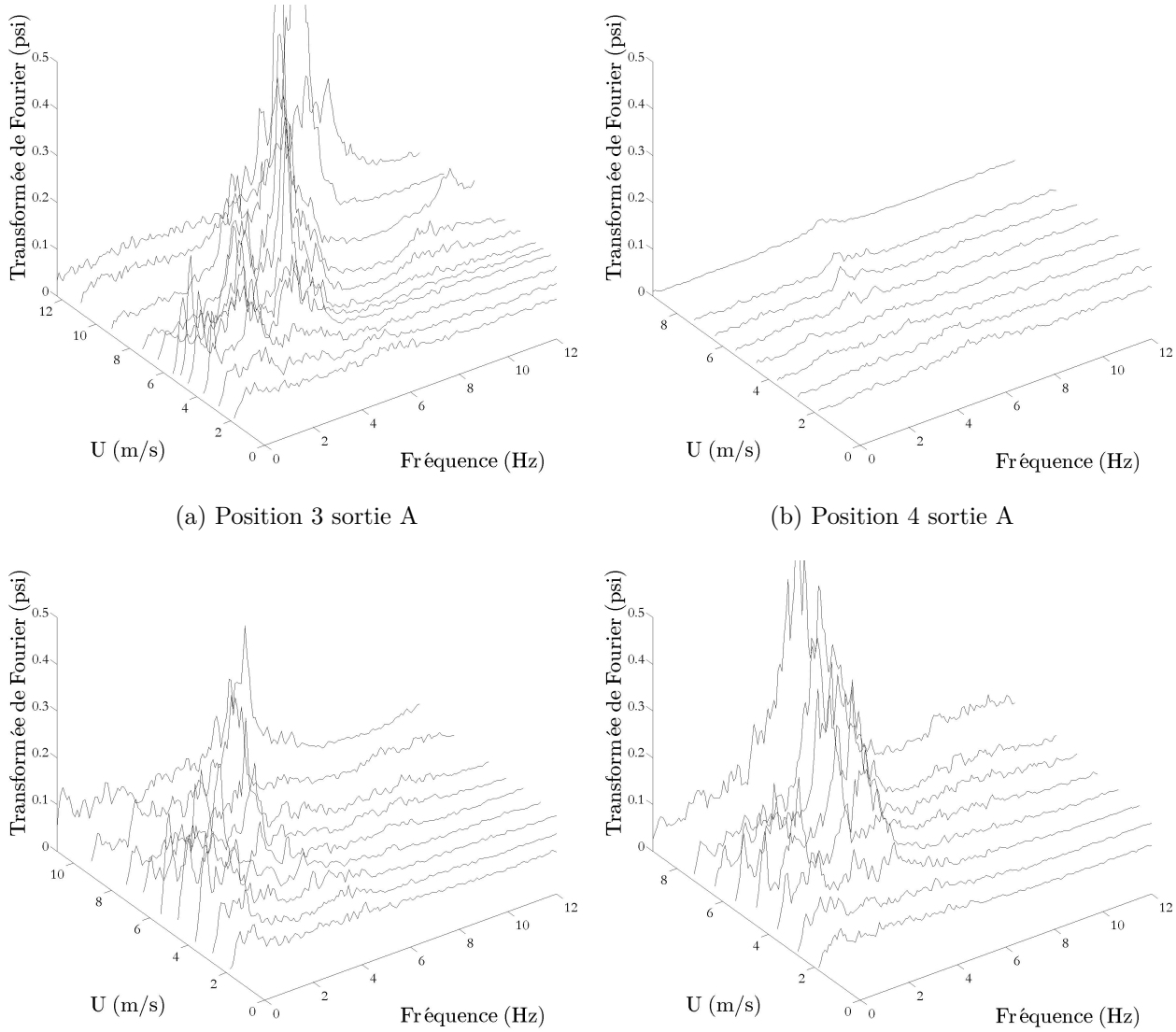
Tableau 5.2 Récapitulatif des amplitudes des fluctuations de pression avec la sortie B

	position 1	position 2	position 3	position 4
Premier pic à basse fréquence (agité-1)	+++	++	+	+
Deuxième pic à basse fréquence (agité-1)	+	++	+++	+
Troisième pic à haute fréquence (agité-2)	0	+	++	++++

5.5.3 Changements de carte d'écoulement dûs à la position

Comme nous l'avons expliqué au chapitre 4, les cartes d'écoulement vont dépendre de la position à laquelle les mesures sont effectuées. Nous traçons sur la Fig. 5.14 des cartes basées sur les positions 3 et 4 avec la nouvelle sortie et nous les comparons aux cartes avec la sortie A pour ces mêmes positions. Nous ne traçons pas les cartes pour les positions 1 et 2 étant donné que les résultats sont très semblables.

Ainsi l'écoulement va être beaucoup moins souvent considéré comme agité-2 en position 3



(a) Position 3 sortie A

(b) Position 4 sortie A

(c) Position 3 sortie B

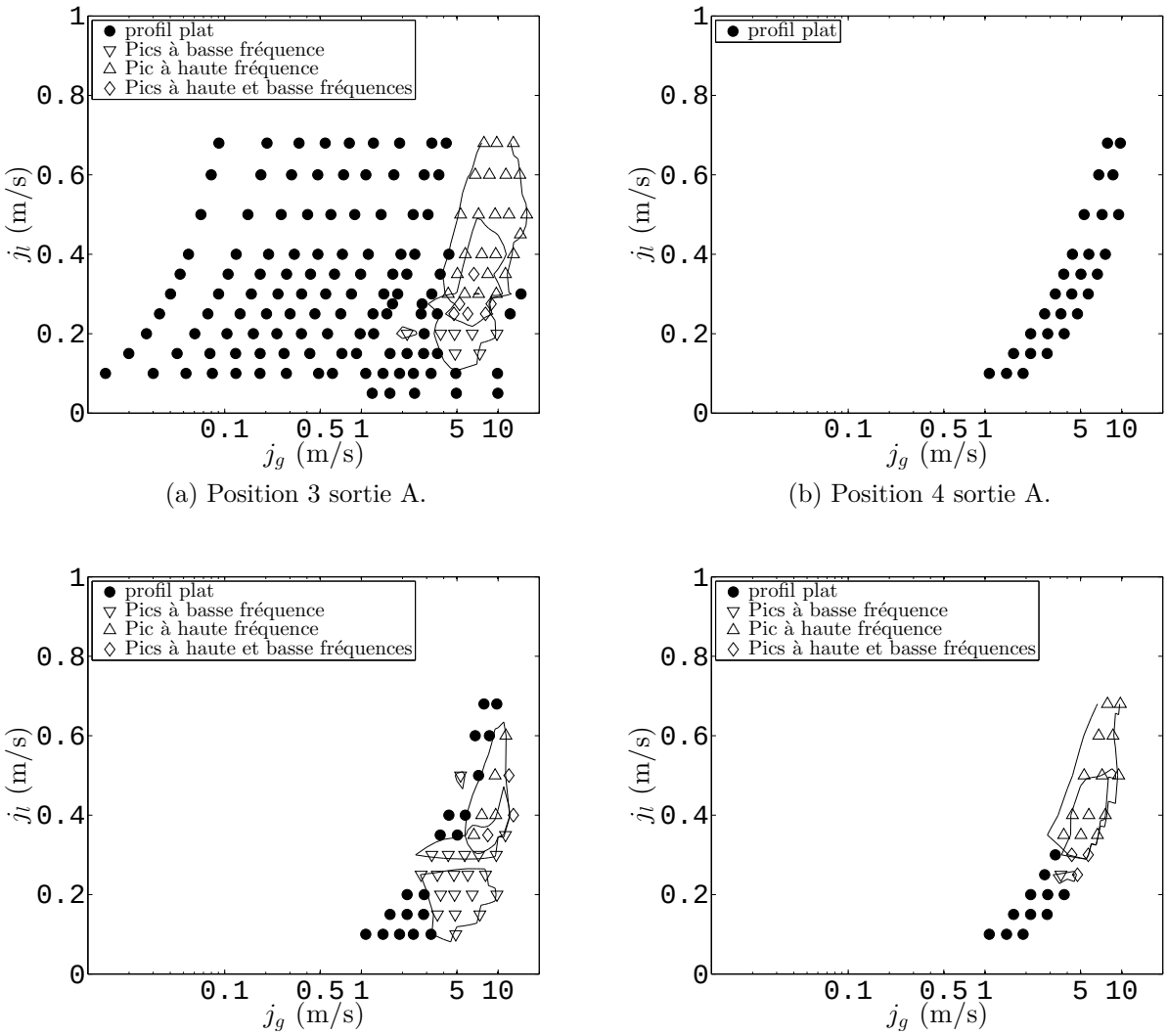
(d) Position 4 sortie B

Figure 5.13 Comparaison des transformées de Fourier pour les positions 3 et 4 dans la section pour $\beta = 95\%$ avec les deux sorties

avec la sortie B. En revanche en position 4 l'écoulement pourrait être considéré comme agité-2 avec la sortie B, alors qu'avec la sortie A, l'écoulement laisse apparaître des profils plats de pression.

5.5.4 Corrélation des signaux des diverses positions avec la nouvelle sortie

Nous nous intéressons alors à la corrélation entre les positions 3 et 4 pour étayer l'hypothèse que les fluctuations de pression observées sont provoquées par la sortie. Nous observons sur la



(a) Position 3 sortie A.

(b) Position 4 sortie A.

(c) Position 3 sortie B.

(d) Position 4 sortie B.

Figure 5.14 Comparaison des cartes d'écoulement basées sur une seule position avec les deux sorties

Fig. 5.15 que le pic à haute fréquence n'est que moyennement corrélé entre ces deux positions. Les pics 1 et 2 sont toujours aussi corrélés.

5.5.5 Hypothèse de surpression due à la nouvelle sortie

Nous avons donc mis en évidence le fait que la sortie avait un fort effet sur les fluctuations de pression dans la section. Étant donné que la nouvelle sortie est plus étroite, des pertes de charge plus importantes ont lieu. Ainsi la pression moyenne aux points de mesures est maintenant plus grande, ce que nous allons analyser maintenant. Il faut noter que la pression

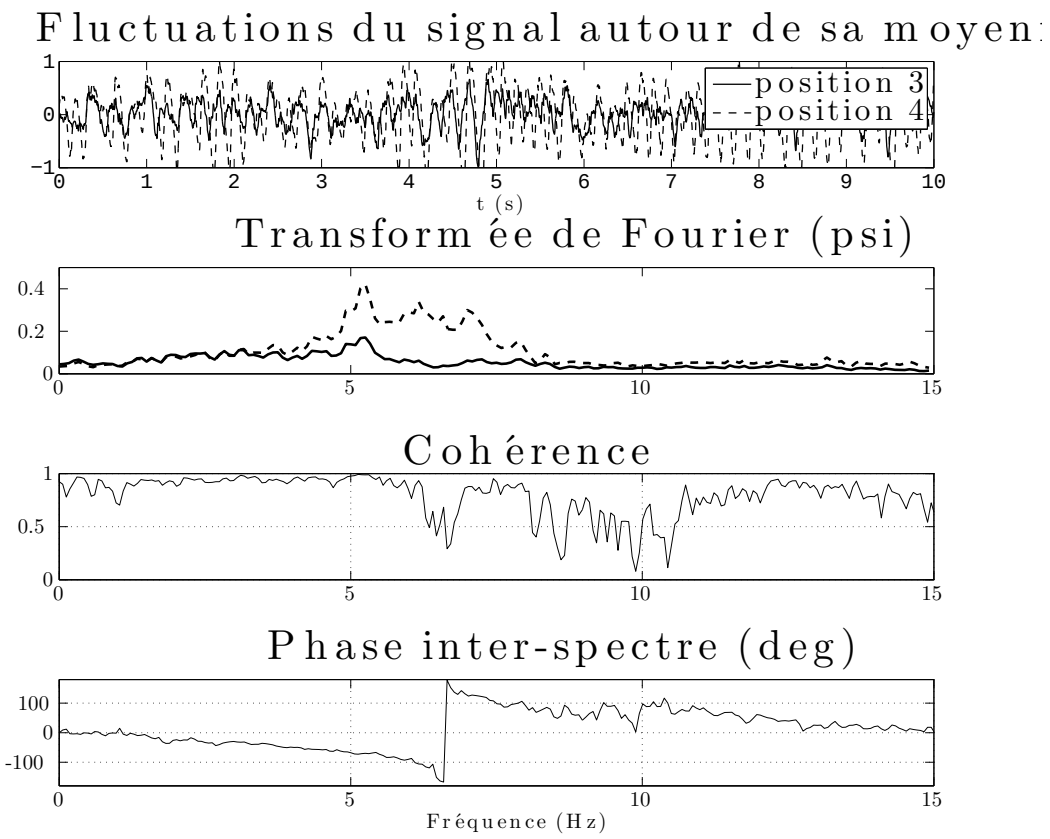


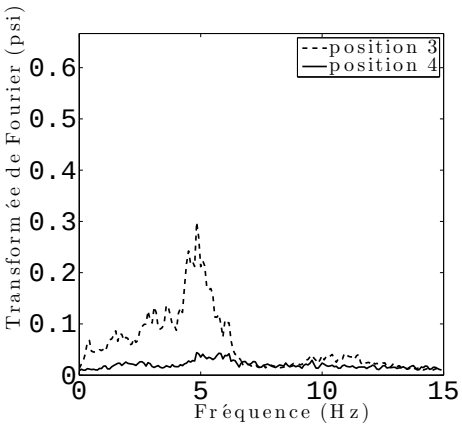
Figure 5.15 Corrélation fréquentielle entre les signaux obtenus aux positions 3 et 4 avec la sortie B

a un effet direct sur la vitesse de gaz, mais que cet effet est très faible. Une variation de 1 psi sera en effet responsable d'une variation de seulement 7% sur la vitesse. Pour tester l'hypothèse de l'influence de la surpression sur les fluctuations nous allons alors pressuriser l'écoulement avec la sortie A, pour réaliser des mesures avec les mêmes conditions de pression qu'avec la sortie B.

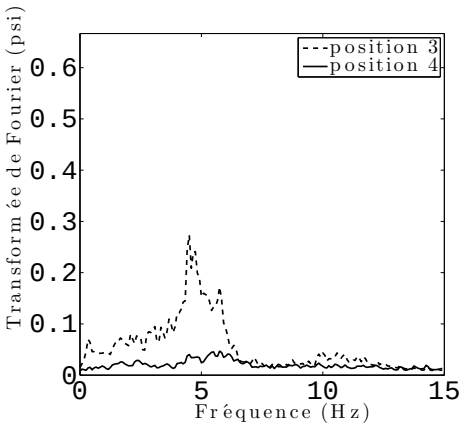
Mesures de pression avec la sortie A en conditions de pression similaires

Nous pressurisons alors le montage expérimental en installant un robinet en sortie et un capteur de pression de manière à être capable de réaliser des points expérimentaux avec la sortie A avec la pression mesurée avec la sortie B. Sur la Fig.5.16 nous présentons deux fois le même point expérimental avec la sortie A. Sur la figure 5.16a nous présentons le cas où nous ne pressurisons pas la section, et sur la Fig. 5.16b nous pressurisons la section de manière à ce

que la pression moyenne dans la section soit la même que pour le même point expérimental avec la sortie B.



(a) Transformée de Fourier pour la sortie A, à pression atmosphérique avec β=93.5%, U=4.7m/s



(b) Transformée de Fourier pour la sortie A, en pressurisant comme avec la sortie B avec β=93.5%, U=4.7m/s

Figure 5.16 Étude de l'effet de la pressurisation sur les fluctuations de pression

Nous observons que la différence de pression a un effet minime et pouvons donc conclure quand à l'absence d'effet de pressurisation dû au changement de sortie.

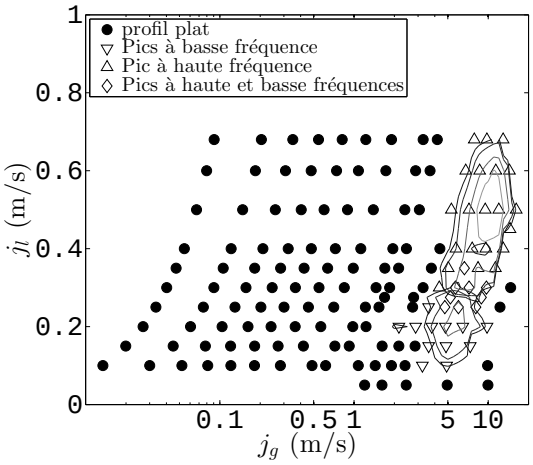
5.5.6 Changement de carte d'écoulement dû à la nouvelle sortie

Maintenant que nous avons la preuve que l'effet est bien dû à la sortie en elle-même nous pouvons étudier son influence sur les cartes d'écoulements. Comme nous l'avons vu les fluctuations anciennement présentes en position 3 sont moins importantes et des fluctuations sont maintenant visibles en position 4. Nous allons alors déterminer de nouvelles cartes d'écoulement en prenant en compte ces fluctuations. Il s'agit ici de tracer des cartes d'écoulements basés sur les maxima entre deux positions, comme cela a été fait au chapitre 4 avec les positions 2 et 3.

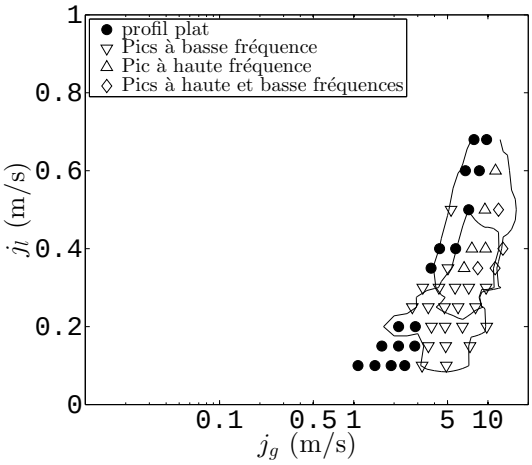
Carte avec les mêmes positions de mesure qu'au chapitre 4

Pour cela nous traçons à nouveau les contours de pression avec la nouvelles sortie avec les positions 2 et 3, et nous la comparons à la carte obtenue au chapitre 4 sur la Fig. 5.17.

La délimitation du régime agité-1 n'est pas affectée par le changement de sortie, en effet on obtient les mêmes délimitations. Il est d'ailleurs intéressant de noter que la partie de la zone dite intermittente qui est inchangée est celle en accord Ulbrich et Mewes (1994) et Grant et



(a) Carte d'écoulement obtenue avec la sortie A, avec en noir les courbes d'iso-amplitudes de fluctuations de pression.



(b) Carte d'écoulement obtenue avec la sortie B, avec en noir les frontières de agité-1 et agité-2 établies avec la sortie A.

Figure 5.17 Comparaison des cartes d'écoulement que nous obtenons selon la sortie

Murray (1972). En ce qui concerne la zone agité-2 les fluctuations auparavant présentes sont maintenant beaucoup moins importantes.

Carte d'écoulement en analysant les fluctuations des positions une par une

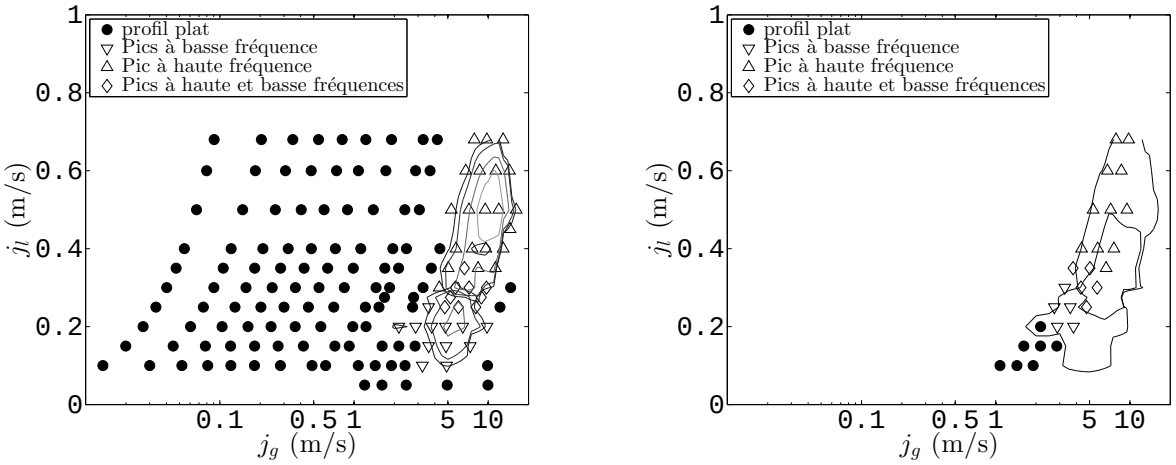
Nous analysons maintenant les fluctuations nouvellement présentes au niveau de la position 4, et comparons la carte basée sur ces mesures à la carte réalisée au chapitre 4. Il est intéressant de remarquer que l'on observe avec la position 4 à nouveau des frontières pour l'écoulement agité-2 similaires à celles obtenues avec la sortie A et la position 3. On peut récapituler le lien entre les positions, les sorties, et les cartes d'écoulement dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 Récapitulatif des configurations d'écoulement majoritairement observées au en fonction des positions et des sorties

	position 2	position 3	position 4
Sortie A	agité-1	agité-1&2	profil plat
Sortie B	agité-1	agité-1	agité-2

5.5.7 Interprétation de l'effet de la sortie

Nous avons alors essayé de comprendre pourquoi le fait que la section s'élargisse entraînait des fluctuations de pression à la position 3, et le fait de restreindre celle-ci en entraînait à



(a) Carte d'écoulement obtenue avec la sortie A, avec en noir les courbes d'iso-amplitudes de fluctuations de pression

(b) Carte d'écoulement obtenue avec la sortie B basé sur la position 4, avec en noir les frontières de agité-1 et agité-2 établies avec la sortie A.

Figure 5.18 Comparaison des cartes d'écoulement en changeant la sortie et en se basant sur des positions différentes

la position 4. L'hypothèse apparaissant naturellement est celle que des effets de jet soient présents en raison de l'élargissement de la section en sortie. Cependant le fait de remplacer la sortie par une sortie plus étroite devrait diminuer ces fluctuations dans toute la section, soit aussi bien en position 4 qu'en position 3. Or ces fluctuations ne sont plus présentes en position 3 mais deviennent très importantes en position 4.

Nous avons prouvé que le changement de la sortie avait un effet crucial pour l'écoulement. Nous proposons de possibles interprétations dans la section suivante pour expliquer l'effet de la sortie. Cet effet n'est pas anecdotique pour l'industrie, car dans un générateur de vapeur, la section s'accroît rapidement en sortie du faisceau de tubes.

5.6 Discussion

Nous avons maintenant de nombreuses informations provenant de nos travaux et de la littérature que nous devons discuter.

5.6.1 Les fluctuations à basses fréquences

Étant donné les résultats provenant des corrélations, il est le plus probable que les fluctuations à basse fréquence naissent au niveau de la zone d'injection. Il sera d'ailleurs intéressant de modifier cette dernière pour observer son effet. Les deux premiers pics sont visiblement liés car

ils ont des évolutions très similaires en fonction des débits, à une position donnée. Cependant en terme d'altitude le premier pic décroît en amplitude quand le deuxième pic croît, ce qui laisse penser que le premier pic est le moteur du deuxième. Il pourrait alors être créé au niveau de l'injection et être ensuite responsable du deuxième pic. Le fait que le premier pic ne soit pas visible dans le cas de faisceaux larges serait alors la dû au fait que le premier pic a transféré son énergie plus vite. Les maxima étant toujours pour des débits de liquide similaires et cela indépendamment de β, le débit de liquide doit en tout cas avoir un rôle clé dans les modèles théoriques expliquant ces deux pics.

5.6.2 Les fluctuations à hautes fréquences

Les fluctuations à haute fréquence pourraient être générées par le sillage des tubes étant donné leur dépendance à la vitesse, mais cela ne permet pas d'expliquer l'évolution de son amplitude en fonction de l'altitude. Il y a alors un phénomène qui prend une certaine distance à se créer. Cela pourrait être la distance pour que des vagues se mettent en place, ce qui reste compatible avec l'interprétation de ces fluctuations comme liées au sillage. On note sur le tableau 5.4 que la diminution du deuxième pic est lié à la croissance du troisième pic, ce qui fait une différence surtout à la position 3 entre le cas avec la sortie A et la sortie B. Cela laisse penser que le pic 2 est le moteur du pic 3. Nous expliquons dans ce cas le rôle de la sortie B avec la suggestion suivante : avec la sortie B l'onde du deuxième pic se propage mieux car elle est canalisée en sortie de faisceau, et se transforme en troisième pic plus tardivement. Avec la sortie A la sortie crée un effet de congestion qui force la transformation du deuxième pic vers le troisième. Un transfert d'énergie plus tardif du pic 1 vers le pic 2 puis du pic 2 vers le pic 3 permettrait d'expliquer pourquoi le premier pic n'est pas observé dans les sections plus larges. Dans ce cas le premier pic a entièrement transféré son énergie au deuxième pic avant les points de mesure.

Tableau 5.4 Récapitulatif des amplitudes des fluctuations de pression avec les deux sorties

sortie	pic	position 1	position 2	position 3	position 4
A	Premier	+++	++	+	0
A	Deuxième	+	++	++	0
A	Troisième	0	+	++++	0
B	Premier	+++	++	+	+
B	Deuxième	+	++	+++	+
B	Troisième	0	+	++	++++

5.7 Conclusion

Ainsi, dans ce chapitre, nous avons caractérisé et analysé les fluctuations de pression des régimes agités. Ces fluctuations sont très différentes en fonction des débits des fluides, et de la position de mesure dans la section d'essai. La composante à très basse fréquence est une onde à très haute vitesse générée dans la zone de mélange en bas de la section et dont l'intensité décroit avec l'altitude. La deuxième composante est également générée dans la zone de mélange mais sa propagation se fait à la vitesse de l'écoulement, et son intensité croit avec l'altitude. Elle peut s'interpréter comme provenant de variations de quantité de mouvement dans la section d'après la littérature. Nous émettons l'hypothèse que cette composante est générée par le premier pic. La troisième composante n'est visible qu'à partir d'une certaine altitude et cette altitude dépend de la sortie de section et de la vitesse de l'écoulement. Elle peut s'interpréter comme du sillage des tubes avec la littérature. Nous soulevons également l'hypothèse que cette composante correspond aux vagues identifiées en tube cylindrique en écoulement agité. L'hypothèse que nous proposons est que ces fluctuations sont générées à partir du deuxième pic, et que cette transition prend une distance plus ou moins longue selon les conditions d'écoulement. Finalement les deux premiers pics ont des fréquences indépendantes des vitesses donc on peut supposer qu'ils proviennent de forçage physique. En revanche le troisième pic dépend de la vitesse, donc une longueur caractéristique va entrer en jeu, et il s'agit donc d'un forçage géométrique.
Nous avons aussi mis en évidence l'influence de la sortie sur les oscillations de pression, et prouvé que les effets étaient bien dûs au changement de sortie et non à la pressurisation de la section.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

Nous avons apporté un grand nombre de nouvelles informations sur les cartes d'écoulement, ainsi que sur les caractéristiques des divers régimes d'écoulement. En particulier nous avons apporté un tout nouvel éclairage sur les forces fluctuantes observées en faisceau.

6.1 Synthèse des travaux

Dans un premier temps nous avons amélioré les cartes d'écoulement réalisées, en nous appropriant les méthodes utilisées précédemment et en corrigeant leurs défauts. Nous avons montré que la méthodologie utilisée par Noghrehkar *et al.* (1999) n'était pas adaptée et nous avons amélioré sa méthode pour obtenir de meilleurs résultats. Nous avons ensuite proposé une nouvelle classification d'écoulement en séparant le régime intermittent en régimes agité-1, agité-2 et à bouchons, classification basée sur notre quantité de données plus importante que pour les études précédentes.
Nous avons alors analysé en profondeur les fluctuations de pression qui apparaissent lorsque l'écoulement est agité. Nous avons mis en évidence l'évolution de ces fluctuations avec la position dans la section, et les dépendances de ces dernières aux débits de liquide et de gaz, apportant de cette manière de toutes nouvelles informations sur les forces fluctuantes. Ensuite, nous avons étudié l'effet de la sortie et prouvé que celui-ci pouvait avoir un rôle crucial sur l'écoulement. Ce résultat est particulièrement intéressant car les sorties de générateur sont généralement conçues sans prendre en compte le fait que la sortie de faisceau a une influence sur les oscillations de pression. Finalement nous avons émis une hypothèse permettant d'expliquer l'origine des fluctuations de pression.

6.2 Limitations de la solution proposée

Une limitation importante de notre carte d'écoulement est que nos débits de liquide sont trop faibles. Une pompe plus puissante devra être installée pour nous permettre de considérer des débits de liquide plus importants.
En ce qui concerne la frontière entre les écoulements à bulles et à bouchons, nous avons choisi un critère subjectif de quantité de gaz présent sous forme de bouchons et l'influence de ce critère devra être étudié.
Finalement, concernant l'étude des fluctuations de pression, notre nombre de positions de mesure dans la section est trop faible, ce qui nous empêche de conclure quand à certains

effets.

6.3 Travaux futurs

En ce qui concerne les régimes d'écoulement, des travaux futurs doivent continuer avec notre méthodologie, mais avec une sonde optique plus solide et la sonde isocinétique construite, pour être capable d'appréhender des débits plus élevés, que ce soit en terme de gaz ou d'eau. En effet de nombreuses études ont été réalisées avec des débits d'eau plus importants que ceux que nous avons considérés, et il sera important de pouvoir comparer de futurs résultats à ces dernières. Il sera également important d'appliquer notre méthodologie à des faisceaux de tubes plus larges, où des différences peuvent être visibles. Une expérience particulièrement intéressante pourra être de réaliser des mesures de pression et de sonde optique sur un faisceau sur lequel la sortie est modifiable.

Pour mieux comprendre les fluctuations de pression observées dans le régime agité, de nombreux travaux pourront être entrepris. Du point de vue de l'effet de l'injection, une campagne expérimentale pourra être menée, et des mesures pourront être effectuées après des modifications de l'injection. Pour obtenir plus d'explications sur les transferts d'un pic à l'autre une méthode pourra être d'augmenter le nombre de prises de mesures de pression dans la section. Cela permettra de mieux comprendre les éventuels mécanismes de transferts entre les pics, et de mieux mesurer les vitesses de propagation d'onde.

Nous avons aussi maintenant une plus grande précision sur les débits requis pour obtenir des écoulements annulaires en faisceau de tubes, et une étude quantitative pourra être entreprise avec l'utilisation du collecteur isocinétique. Ce collecteur permettra d'obtenir des données quantitatives sur les écoulements annulaires en faisceau, et ouvrira la voie à des simulations numériques. Il est à noter que le collecteur a été conçu et fabriqué pour fonctionner à la fois avec la tour, et un faisceau de tubes.

RÉFÉRENCES

A. Al-Sarkhi, C. Sarica, et B. Qureshi, “Modeling of droplet entrainment in co-current annular two-phase flow : A new approach”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 39, pp. 21–28, 2012.

W. Ambrosini, P. Andreussi, et B. Azzopardi, “A physically based correlation for drop size in annular flow”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 17, no. 4, pp. 497–507, 1991.

B. Ameel, K. De Kerpel, H. Caniere, C. T’Joen, H. Huisseune, et M. De Paepe, “Classification of two phase flows using linear discriminant analysis and expectation maximization clustering of video footage”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 40, pp. 106–112, 2012.

J. Asali, T. t. Hanratty, et P. Andreussi, “Interfacial drag and film height for vertical annular flow”, *AIChE Journal*, vol. 31, no. 6, pp. 895–902, 1985.

A. Assad, C. Jan, M. L. de Bertodano, et S. Beus, “Scaled entrainment measurements in ripple-annular flow in a small tube”, *Nuclear engineering and design*, vol. 184, no. 2, pp. 437–447, 1998.

B. Azzopardi, “Disturbance wave frequencies, velocities and spacing in vertical annular two-phase flow”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 92, no. 2, pp. 121–133, 1986.

——, “Drops in annular two-phase flow”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 23, pp. 1–53, 1997.

——, *Gas-liquid flows*. Begell house New York, 2006.

B. Azzopardi et E. Wren, “What is entrainment in vertical two-phase churn flow ?” *International journal of multiphase flow*, vol. 30, no. 1, pp. 89–103, 2004.

J. Barbosa, A. Govan, et G. Hewitt, “Visualisation and modelling studies of churn flow in a vertical pipe”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 27, no. 12, pp. 2105–2127, 2001.

J. Barbosa, G. Hewitt, G. König, et S. Richardson, “Liquid entrainment, droplet concentration and pressure gradient at the onset of annular flow in a vertical pipe”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 28, no. 6, pp. 943–961, 2002.

C. Berna, A. Escrivá, J. Muñoz-Cobo, et L. Herranz, "Review of droplet entrainment in annular flow : Interfacial waves and onset of entrainment", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 74, pp. 14–43, 2014.

H. Canière, B. Bauwens, C. T'Joen, et M. De Paepe, "Mapping of horizontal refrigerant two-phase flow patterns based on clustering of capacitive sensor signals", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 23, pp. 5298–5307, 2010.

A. Cioncolini et J. R. Thome, "Prediction of the entrained liquid fraction in vertical annular gas–liquid two-phase flow", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 36, no. 4, pp. 293–302, 2010.

A. Cioncolini, J. R. Thome, et C. Lombardi, "Unified macro-to-microscale method to predict two-phase frictional pressure drops of annular flows", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 35, no. 12, pp. 1138–1148, 2009.

G. Costigan et P. Whalley, "Slug flow regime identification from dynamic void fraction measurements in vertical air-water flows", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 23, no. 2, pp. 263–282, 1997.

L. Cousins et G. F. Hewitt, "Liquid phase mass transfer in annular two-phase flow : Radial liquid mixing." Atomic Energy Research Establishment, Harwell (England), Rapp. tech., 1968.

E. De Langre, *Fluides et solides*. Editions Ecole Polytechnique, 2001.

P. Feenstra, D. Weaver, et R. Judd, "An improved void fraction model for two-phase cross-flow in horizontal tube bundles", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 26, no. 11, pp. 1851–1873, 2000.

L. B. Fore et A. E. Dukler, "The distribution of drop size and velocity in gas-liquid annular flow", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 21, no. 2, pp. 137–149, 1995.

L. Gill, G. F. Hewitt, J. Hitchon, et P. Lacey, "Sampling probe studies of the gas core in annular two-phase flow—i the effect of length on phase and velocity distribution", *Chemical Engineering Science*, vol. 18, no. 8, pp. 525–535, 1963.

L. Gill, G. F. Hewitt, et P. Lacey, "Sampling probe studies of the gas core in annular two-phase flow—ii : Studies of the effect of phase flow rates on phase and velocity distribution", *Chemical Engineering Science*, vol. 19, no. 9, pp. 665–682, 1964.

I. D. R. Grant et I. Murray, *Pressure drop on the shell-side of a segmentally baffled shell-and-tube heat exchanger with vertical two-phase flow.* National Engineering Laboratory, 1972.

H. Han, K. S. Gabriel, et Z. Wang, "A new method of entrainment fraction measurement in annular gas–liquid flow in a small diameter vertical tube", *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 18, no. 2, pp. 79–86, 2007.

K. Hay, Z.-C. Liu, et T. Hanratty, "Relation of deposition to drop size when the rate law is nonlinear", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 22, no. 5, pp. 829–848, 1996.

M. Ishii et M. Grolmes, "Inception criteria for droplet entrainment in two-phase concurrent film flow", *AIChE Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 308–318, 1975.

M. Ishii et K. Mishima, "Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 32, no. 10, pp. 1835–1846, 1989.

A. Jagota, E. Rhodes, et D. Scott, "Tracer measurements in two phase annular flow to obtain interchange and entrainment", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 51, no. 2, pp. 139–148, 1973.

D. Jepson, B. Azzopardi, et P. Whalley, "The effect of gas properties on drops in annular flow", *International journal of multiphase flow*, vol. 15, no. 3, pp. 327–339, 1989.

T. M. A. S. John. (2013) San onofre to be permanently closed, http ://www.kpbs.org/news/2013/jun/07/san-onofre-be-permanently-closed/. En ligne : `http://www.kpbs.org/news/2013/jun/07/san-onofre-be-permanently-closed/`

J. E. Juliá, Y. Liu, S. Paranjape, et M. Ishii, "Upward vertical two-phase flow local flow regime identification using neural network techniques", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, no. 1, pp. 156–169, 2008.

M. Kaichiro et M. Ishii, "Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 27, no. 5, pp. 723–737, 1984.

A. Kawahara, P.-Y. Chung, et M. Kawaji, "Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 28, no. 9, pp. 1411–1435, 2002.

S. H. Khor, M.-A. Mendes-Tatsis, et G. F. Hewitt, "Application of isokinetic sampling technique in stratified multiphase flows", American Society of Mechanical Engineers, New

York, NY (United States), Rapp. tech., 1996.

A. Mahvash et A. Ross, “Two-phase flow pattern identification using continuous hidden markov model”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 34, no. 3, pp. 303–311, 2008.

D. A. McNeil, A. Sadikin, et K. H. Bamardouf, “A mechanistic analysis of shell-side two-phase flow in an idealised in-line tube bundle”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 45, pp. 53–69, 2012.

K. McQuillan et P. Whalley, “Flow patterns in vertical two-phase flow”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 11, no. 2, pp. 161–175, 1985.

N. Mureithi et C. Masabarakiza, “Determination of flow structure in a tube array by particle image velocimetry”, dans *ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2011, pp. 353–364.

M. Nakazatomi et K. Sekoguchi, “Effect of pressure on entrainment flow rate in vertical upward gas—liquid annular two-phase flow. part ii : An assessment of published correlations of entrainment flow rate through high-pressure data and proposal of new correlations”, *Heat Transfer-Japanese Research*, vol. 25, no. 5, pp. 281–292, 1996.

E. Naudascher et D. Rockwell, *Flow-induced vibrations : an engineering guide*. Courier Corporation, 2012.

G. Noghrehkar, M. Kawaji, et A. Chan, “Investigation of two-phase flow regimes in tube bundles under cross-flow conditions”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 25, no. 5, pp. 857–874, 1999.

A. Ohnuki et H. Akimoto, “Experimental study on transition of flow pattern and phase distribution in upward air–water two-phase flow along a large vertical pipe”, *International journal of multiphase flow*, vol. 26, no. 3, pp. 367–386, 2000.

R. Oliemans, B. Pots, et N. Trompe, “Modelling of annular dispersed two-phase flow in vertical pipes”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 12, no. 5, pp. 711–732, 1986.

D. Owen, G. Hewitt, et T. Bott, “Equilibrium annular flows at high mass fluxes data and interpretation”, *PCH Physicochemical Hydrodynamics*, vol. 6, no. 1-2, pp. 115–131, 1985.

L. Pan et T. J. Hanratty, “Correlation of entrainment for annular flow in horizontal pipes”, *International journal of multiphase flow*, vol. 28, no. 3, pp. 385–408, 2002.

E. Perrot, N. Mureithi, M. Pettigrew, et G. Ricciardi, “Vibration excitation forces in a normal triangular tube bundle subjected to two-phase cross flow”, dans *ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2011, pp. 93–102.

M. Pettigrew et C. Taylor, “Two-phase flow-induced vibration : An overview (survey paper)”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 116, no. 3, pp. 233–253, 1994.

M. Pettigrew, C. Taylor, et B. Kim, “Vibration of tube bundles in two-phase cross-flow : Part 1—hydrodynamic mass and damping”, *Journal of pressure vessel technology*, vol. 111, no. 4, pp. 466–477, 1989.

M. Pettigrew, C. Zhang, N. Mureithi, et D. Pamfil, “Detailed flow and force measurements in a rotated triangular tube bundle subjected to two-phase cross-flow”, *Journal of Fluids and Structures*, vol. 20, no. 4, pp. 567–575, 2005.

J. Pietralik, A. Campagna, et V. Frisina, “Validation of the thirst steam generator thermal-hydraulic code against the clotaire phase ii experimental data”, *Canadian Nuclear Society*, p. 275, 1998.

E. Rosa, R. Salgado, T. Ohishi, et N. Mastelari, “Performance comparison of artificial neural networks and expert systems applied to flow pattern identification in vertical ascendant gas–liquid flows”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 36, no. 9, pp. 738–754, 2010.

T. Sawai, M. Kaji, T. Kasugai, H. Nakashima, et T. Mori, “Gas–liquid interfacial structure and pressure drop characteristics of churn flow”, *Experimental thermal and fluid science*, vol. 28, no. 6, pp. 597–606, 2004.

P. Sawant, M. Ishii, et M. Mori, “Droplet entrainment correlation in vertical upward co-current annular two-phase flow”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, no. 6, pp. 1342–1352, 2008.

S. Schadel, G. Leman, J. Binder, et T. Hanratty, “Rates of atomization and deposition in vertical annular flow”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 16, no. 3, pp. 363–374, 1990.

S. A. Schadel, “Atomization and deposition rates in vertical annular two-phase flow”, Illinois Univ., Urbana, IL (USA), Rapp. tech., 1988.

K. Sekoguchi et M. Takeishi, “Interfacial structures in upward huge wave flow and annular flow regimes”, *International journal of multiphase flow*, vol. 15, no. 3, pp. 295–305, 1989.

H. Senez, N. Mureithi, et M. Pettigrew, “Vibration excitation forces in a rotated triangular tube bundle subjected to two-phase cross flow”, dans *ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting collocated with 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels.* American Society of Mechanical Engineers, 2010, pp. 565–573.

Y. Taitel, D. Bornea, et A. Dukler, “Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes”, *AIChE Journal*, vol. 26, no. 3, pp. 345–354, 1980.

T. Tambouratzis et I. Pàzsit, “A general regression artificial neural network for two-phase flow regime identification”, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 37, no. 5, pp. 672–680, 2010.

A. Tapucu, “The thermal-hydraulics of two-phase systems”, 2009.

N. H. Taylor, G. Hewitt, et P. Lacey, “The motion and frequency of large disturbance waves in annular two-phase flow of air-water mixtures”, *Chemical Engineering Science*, vol. 18, no. 8, pp. 537–552, 1963.

T. Ueno, W. Leung, et M. Ishii, “Local measurement in two-phase flow across a horizontal tube bundle”, dans *Proceedings of the 2nd International Conference on Multiphase Flow, Kyoto, Japan*, 1995, pp. 3–7.

R. Ulbrich et D. Mewes, “Vertical, upward gas-liquid two-phase flow across a tube bundle”, pp. 249–272, 1994.

B. Villard, “Flow-induced vibration of steam generators : Summary of clotaire program test results”, 1999.

T. Von Karman, “Mechanical similitude and turbulence”, 1931.

L. Wang, Z. Huang, B. Wang, H. Ji, et H. Li, “Flow pattern identification of gas–liquid two-phase flow based on capacitively coupled contactless conductivity detection”, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 5, pp. 1466–1475, 2012.

M. Watson et G. Hewitt, “Pressure effects on the slug to churn transition”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 25, no. 6, pp. 1225–1241, 1999.

P. Whalley, P. Hutchinson, et G. F. Hewitt, *The calculation of critical heat flux in forced convection boiling.* AERE, 1973, vol. 7520.

G. Xu, C. Tso, et K. Tou, “Hydrodynamics of two-phase flow in vertical up and down-flow across a horizontal tube bundle”, *International journal of multiphase flow*, vol. 24, no. 8, pp. 1317–1342, 1998.

C. Zhang, M. Pettigrew, et N. Mureithi, “Vibration excitation force measurements in a rotated triangular tube bundle subjected to two-phase cross flow”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 129, no. 1, pp. 21–27, 2007.

——, “Further study of quasiperiodic vibration excitation forces in rotated triangular tube bundles subjected to two-phase cross flow”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 131, no. 3, p. 031303, 2009.

——, “Correlation between vibration excitation forces and the dynamic characteristics of two-phase cross flow in a rotated-triangular tube bundle”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 130, no. 1, p. 011301, 2008.

Y. Zhao, C. N. Markides, O. K. Matar, et G. F. Hewitt, “Disturbance wave development in two-phase gas–liquid upwards vertical annular flow”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 55, pp. 111–129, 2013.