REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DR YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE, DEPARTEMENT DE GENIE CLIMATIQUE



Mémoire

Présentée pour l'obtention du grade de MASTER

En : Génie Climatique

Spécialité : Génie Climatique

Par : TALEB Abdelhamid et GUETTACHE Karim

THEME

ETUDE EXPERIMENTALE SUR L'EVOLUTION DES STRUCTURES D'ECOULEMENTS DIPHASIQUES GAS-LIQUIDE DANS UNE CONDUITE HORIZONTALE

Proposé et dirigé par :

Dr. ZEGUAI Salim

2021/2022

Résumé

L'étude expérimentale menée a pour objectif d'analyser les écoulements diphasiques air-eau en direction dans une conduite horizontale en fonction des conditions d'entrée rigoureusement contrôlées. Un dispositif expérimental a été déjà réalisé par Zeguai et al., 2013 pour produire un écoulement diphasique air-eau dans un tube en verre de 3mm de diamètre intérieur, orientable par rapport à la gravité et instrumenté. La vitesse apparente du liquide et du gaz varie de 78 10^{-5} ms^{-1} à 7860 10^{-5} ms^{-1} et de 2.3 10^{-3} ms^{-1} à 3.54 ms^{-1}, respectivement. Des mesures des débits eau et air, et des pressions à l'entrée et à la sortie associées à des visualisations par caméra rapide 1000 i/s ont été déjà mises en œuvre par Zeguai et ., 2013. Les résultats déjà obtenus par zeguai et al., 2013 nous permettent de mettre en évidence les différentes structures observées du mélange diphasique au niveau de la zone de mélange L/D=10 et en aval dans tube de test à L/D=420 de l'entrée. Pour les régimes étudiés, nous mettons en évidence les structures de bulles, poches et annulaire. Ces structures diffèrent selon la zone d'observation. Dans la zone de mélange elles sont plus complexes dans la zone de formation. Ces structures évoluent le long de la conduite pour présenter des géométries simplifiée avec des interfaces lisses et en quantité moins importantes. Les cartes d'écoulement proposées par Zeguai et al., 2013, révèlent des réarrangements des structures.

Mots clés: Mini et microcanaux, Conditions d'entrée, Structures d'écoulements diphasiques, visualisation.

Abstract

The carried out experimental study aims at analyzing air–water two-phase flow patterns in a horizontal tube for laminar flow with carefully controlled conditions. An experimental test rig has been already setup by Zeguai et al., 2013 to produce a two-phase flow in a glass tube of 3 mm inner diameter with co-current air and water flows. Unlike previous studies, the investigated ranges of superficial velocity of the liquid and gas are from 0.78 x 10^{-3} ms^{-1} to 79 x 10^{-3} ms^{-1} and from 2.3 x 10^{-3} ms^{-1} to 3.54 ms^{-1} respectively. Flow visualizations are recorded with a high-speed camera in the entrance region at L/D = 10 corresponding to a mixing zone of the two phases and far downstream at L/D = 420 have already been implemented by Zeguai et al., 2013. The results already obtained by Zeguai et al., 2013 are used to highlight the flow patterns in both zones. Within the explored ranges of superficial velocities, several flow patterns were obtained namely bubbly, slug and annular flow pattern. More complex flow patterns were visualized in the entrance region that evolve to fewer and simplified flow structure with smoother interfaces far downstream. Flow maps were drawn and proposed by Zeguai et al., 2013. They reveal some pattern rearrangements. A detailed description and the physical interpretation of the change in the flow structure between the two investigated zones are given in the paper.

Mots clés: Mini and microchannels, inlet conditions, two-phase flow patterns, visualization.

Dédicaces

*A mes très **CHERS PARENTS**, Aucune phrase, aucun mot ne saurait exprimer à sa juste valeur le respect et l'amour que je vous porte.*
Vous m'avez entouré d'une grande affection, et vous avez été toujours pour moi un grand support dans mes moments les plus difficiles. Sans vos précieux conseils vos prières, votre générosité, je n'aurai pu surmonter le stress de ces longues années d'études. Vous êtes pour moi l'exemple de droiture, de lucidité et de persévérance.

A mes chers frères AYOUB et KHALIL pour leur appui et leur encouragement

A ma sœur.

Merci à mon grand-père et ma grand-mère et que Dieu vous donne longue vie

A mes chères collègues, MESSAOUD, KARIM, NASRO, **Abderrahim,** *MOHAMMED, RIAD, OUSSAMA.*

A ma grande famille.

TALEB Abdelhamid

Dédicaces

*A mes très **CHERS PARENTS**, Aucune phrase, aucun mot ne saurait exprimer à sa juste valeur le respect et l'amour que je vous porte.*
Vous m'avez entouré d'une grande affection, et vous avez été toujours pour moi un grand support dans mes moments les plus difficiles. Sans vos précieux conseils vos prières, votre générosité, je n'aurai pu surmonter le stress de ces longues années d'études. Vous êtes pour moi l'exemple de droiture, de lucidité et de persévérance.

A Mes Frère et mes sœurs

A ma grand-mère et que Dieu vous donne longue vie

A mon cousin **BILAL et ibrahim** Merci pour ta présence et ton aide au quotidien.

A mes chères collègues, MESSAOUD,. **Abderrahim**

MARWAN,AYOUB MOUSTTACHE

A ma grande famille.

GUETTACHE Karim

Remerciements

En tout premier lieu, nous remercions chaleureusement notre encadreur en Master Dr Salim ZEGUAI pour sa grande compétence scientifique, son soutien, mais aussi pour la confiance, l'autonomie et la liberté qu'il nous a accordé dans la conduite de nos recherches. On lui doit beaucoup dans la réussite de ce travail.

J'adresse mes remerciements aux enseignants qui ont accepté de jugé notre travail en qualité de rapporteur.

Enfin, nous tenons à exprimer notre sympathie à l'ensemble des enseignants, ingénieurs, techniciens et secrétaires de la faculté de Technologie pour leur amabilité. Nous ne serions oubliés nos amis en Master avec qui on a vécu au quotidien de bons moments et tous les autres qu'on a côtoyés.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le dévouement, la patience et les encouragements continus de nos parents, qui ont su supporter avec tendresse notre absence durant la réalisation de ce travail. Merci pour leur amour, leur soutien et leur aide durant toutes nos années d'étude. Nous n'aurons pas pu réussir sans vous.

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Nomenclature……. 06
Liste des illustrations, Figures et Tableaux ……. 09
Introduction générale……. 14
Chapitre I. Généralités sur les écoulements diphasiques en conduite ……..…… 17
I. 1 Introduction……. 18
I.2 Phénoménologie des configurations d'écoulement diphasique en conduite horizontale 18
I.2.1 Principe de classification des écoulements diphasiques …… 18
I.2.2. Configurations d'écoulement diphasique en conduite horizontale …….. 19
I.2.2.1 L'écoulement à bulles allongées …….. 19
I.2.2.2 L'écoulement stratifié …….. 19
I.2.2.3 L'écoulement ondulé …… 19
I.2.2.4 L'écoulement à poche/Bouchon ……. 20
I.2.2.5 L'écoulement dispersé ……...…… 20
I.2.2.6 L'écoulement annulaire ……. 20
I.3 Les cartes de structures d'écoulements diphasiques …...…….…….. 21
I.3.1 Carte de Mandhane et al. (1974)…….. 21
I.3.2 Carte de Taitel et Duckler. (1976)…….…….. 22
I.3.3 Carte Mécanistes ……..…….. 23
I.4 Phénoménologie des structures d'écoulements diphasiques en conduite verticale 24
I. 4.1 Ecoulement à bulles ……. 24
I.4.2 Ecoulement à poches..…….……..... 24
I.4.3 Ecoulement à forte coalescence …… 24
I.4.4 Ecoulement annulaire ……. 25
I.4.5 Ecoulement de transition ……. 25
I.4.6 Ecoulement dispersé ……. 25
I.5 Synthèse de travaux antérieurs relatifs à la présence du coude dans les conduites . 25
I.5.1 Modèle homogène ……..…….. 25
I.5.2 Etude de CHENOWETH et MARTIN (1955)……..…….. 26
I.5.3 Modèle DEOBOLD (1962)…….……. 26
I.5.4 Modèle de FITZIMMONS (1964)……..... 26
I.5.5 Modèle de SEKODA et al (1969)…… 26

I.5.6 Modèle de BRUCE (1971)…….. 27
I.5.7 Modèle de CHISHLM (1983)…….. 27
I.6 Tableau de l'écoulement diphasique dans le tube courbé et les coudes…….. 28
I.7 Conclusion……... 29

Chapitre II. Revue bibliographique…… 30
II. 1 Introduction……. 31
II.2 Macro et micro canaux et phénomènes mis en jeu……... 34
II.3 Structures d'écoulements et paramètres influents…… 37
II.3.1 Les cartes d'écoulements dimensionnelles…… 40
Ecoulement diphasique horizontal…….. 47
Conduite horizontale d ≥ 1mm…….. 47
Chapitre III. Dispositif expérimental..…….……... 54
III. 1Introduction…… 55
III. 2 Principe de l'expérience……. 56
III. 3 Description du dispositif expérimental…….. 56
III. 4 Veine de mesure……. 58
III. 5 Système d'amenée et boucles des fluides…….. 59
III. 6 Protocole expérimental…….. 60
III.6.1 Description général…….. 60
III.6.2 Description d'un scénario d'expérience et de mesure……. 61

Chapitre IV. Résultats – I : Structures d'écoulements dans une conduite horizontale….. 67
IV. 1Introduction…… 68
IV.2 Visualisation des structures d'écoulements diphasiques en position horizontale. 70
IV.2.1 Dans la zone de création du mélange diphasique à L/D = 10……. 71
a- Très faible vitesse du liquide (U_{LS} = 78 10-5 m/s, Re_{LS} = 2.34)……. 71
b- Vitesse de la phase liquide modérée (U_{LS} = 2948 10^{-5} m/s, Re_{LS} = 88.44)… 73
c- Vitesse de la phase liquide élevée (U_{LS} = 5890 10^{-5} m/s, Re_{LS} = 176.7)…… 75
IV.2.2 Dans la zone à L/D = 420 de la conduite…… 75
a- Très faible vitesse du liquide (U_{LS} = 78 10^{-5} m/s, Re_{LS} = 2.34)……... 76

b- Vitesse de liquide modérée (U_{LS} = 2948 10^{-5} m/s, Re_{LS} = 88.44) et élevée (U_{LS} = 5890 10^{-5} m/s, Re_{LS} = 176.7)……. 76

IV.2.3 Comparaison des structures observées à L/D = 10 et à L/D = 420 du tube de test…….. 77

IV.3 Cartes d'écoulements……. 81

IV.3.1 Carte d'écoulement dans la zone de formation du mélange diphasique à L/D = 10…….. 81

IV.3.2 Carte d'écoulement dans la zone à L/D = 420 et comparaison avec celle dans la zone d'entrée de la conduite L/D = 10…… 83

IV.4 Influence du diamètre de la buse d'injection……. 85

Conclusion……. 85

Conclusion générale et perspectives…….. 88

Références…….. 90

NOMENCLATURE

Nomenclature

A	*Section du tube [m^2]*
Ca	*Nombre capillaire [-]*
D_h	*Diamètre hydraulique [m]*
d_{JI}	*Diamètre de passage de phases dans la jonction à l'entrée [m]*
Eo	*Nombre d'Eötvos [-]*
F_{I-G}	*Force d'inertie du gaz [N]*
F_{I-LG}	*Force d'inertie entre phases [N]*
F_{I-L}	*Force d'inertie du liquide [N]*
F_{I-M}	*Force d'inertie du mélange [N]*
F_{σ}	*Force de tension superficielle [N]*
$F_{v-G-Paroi}$	*Force de viscosité du gaz [N]*
F_{v-LG}	*Force de viscosité entre phases [N]*
$F_{v-L-Paroi}$	*Force de viscosité du liquide [N]*
$F_{v-M-Paroi}$	*Force de viscosité du mélange [N]*
F_{g-G}	*Force gravitationnelle du gaz [N]*
F_{g-LG}	*Force de gravité entre phases [N]*
F_{g-L}	*Force gravitationnelle du liquide [N]*
F_{g-M}	*Force gravitationnelle du mélange [N]*
Fr	*Nombre de Froude [-]*
g	*Accélération gravitationnelle [m/s^2]*
G	*Flux massique (Mass flux, Mass velocity) [kg/m^2s]*
Je	*Nombre de Jeffreys [-]*
$l_{c,g}$	*Longueur caractéristique Capillaro-gravitational [m]*
$l_{c,i}$	*Longueur caractéristique Capillaro-inertial [m]*
$l_{v,i}$	*Longueur caractéristique Visco-inertial [m]*
$l_{v,g}$	*Longueur caractéristique Visco-gravitational [m]*
$l_{g,I}$	*Longueur caractéristique Gravito-inertial [m]*
m_L	*Débit massique du liquide [kg/s]*
m_G	*Débit massique du gaz [kg/s]*
Re	*Nombre de Reynolds [-]*
U_{LS}	*Vitesse apparent du liquide [m/s^2]*
U_{GS}	*Vitesse apparent du gaz [m/s^2]*
V	*Volume élémentaire [m^3]*
We_{LS}	*Nombre de Weber du liquide [-]*
We_{GS}	*Nombre de Weber du gaz [-]*
X	*Qualité du gaz (Gaz quality) [-]*

Symboles grecs

α	*Taux de vide [-]*
ρ	*Densité [kg/m^3]*
σ	*Tension de surface [N/m]*
μ	*Viscosité dynamique [Pa.s]*

Indices

h	*Hydraulique*
I	*inertie*
L	*Liquide*
g	*Gravitationnelle*
G	*Gaz*
M	*Mélange*
v	*Viscosité*

LISTE DES ILLUSTRATIONS, FIGURES ET TABLEAUX

Liste des illustrations, Figures et Tableaux

Chapitre I

Figures :

FIG. I. 1 Configurations d'écoulements diphasiques en conduite horizontal. 21

FIG.I . 2 Carte des différents régimes d'un écoulement diphasique dans une conduite cylindrique horizontale (Mandhane et al. 1974). 23

FIG. II. 3 Carte des différents régimes d'un écoulement diphasique dans une conduite horizontale (Taitel et Dukler, 1976). 24

FIG. II. 4 Exemple d'une carte mécaniste. 24

FIG.II. 5 Régimes d'écoulements ascendants dans une conduite verticale. 25

Tableaux :

Tableau I.1 Ecoulement diphasique dans le tube courbé et les coudes 29

Chapitre II

Figures :

FIG. II. 1 Comparaison des structures diphasiques en position horizontale (a) Structures en macrocanal ID: 5.5mm, Coleman and Garimella, 1999 (b) Structure en minicanal ID: 1.097mm, Triplett et al. 1999 (c) Structures en microcanal ID: 100μm, Serizawa et al. 2002. 38

FIG.I I. 2 Représentation schématique de la carte des structures d'écoulements diphasiques gaz-liquide. 44

FIG. II. 3 Facteurs influant sur les structures d'écoulements diphasiques dans un canal circulaire en condition adiabatique. 46

FIG. II. 4 Cartes de structures d'écoulements diphasiques air/eau adiabatiques dans des conduites à faible diamètre de position verticale ascendante. 48

FIG.II. 5 Cartes de structures d'écoulements air/eau adimensionnelle adiabatiques en variables (Eo,We_{GS}, We_{LS}) dans des conduites à faible diamètre en position verticale ascendante. 49

FIG. II. 6 Cartes de structures d'écoulements air/eau adiabatiques dans des conduites circulaire à faible diamètre en position horizontale 50

FIG. II. 7 Comparaison entre les cartes structures d'écoulements adiabatiques air/eaupour des conduites circulaires horizontales à faible diamètre. 52

Tableaux :

Tableau II. 1 : Les forces qui interviennent dans un écoulement diphasique. 36

Tableau II. 2 : Les nombres associés comparant ces différents effets physiques. 36

Tableau II. 3 : Inventaire des travaux expérimentaux sur les cartes dimensionnelles et les caractéristiques d'écoulements diphasiques adiabatique gaz/liquide dans des conduites circulaires à faible diamètre allant 0.02mm à 6mm en positions horizontale, verticale ascendant et descendant 42

Chapitre III

Figures :

FIG. III. 1 Dispositif expérimental.. 57

FIG. III. 2 Veine de mesure et système d'injection air/eau. 59

FIG. III. 3 Courbes d'étalonnage des capteurs de pression. 62

FIG. III. 4 Chambre de correction optique iso-indice. 63

FIG. III. 5 Représentation schématique d'un scenario expérimental et du processus d'acquisition de données. 63

FIG. III. 6 Schéma représentatif de la convergence du débit mesuré (courbe verte) vers le débit consigne (courbe rouge) du gaz et du liquide sur l'interface du logiciel pilote des débitmètres contrôleur air et eau (Sc Bronkhorst Hight-tech B.V). 64

FIG. III. 7 Schéma représentatif de l'historique graphique de la pression de l'écoulement diphasique air-eau à l'entrée (courbe bleu) et à la sortie (courbe verte) du tube de test sur l'interface du logiciel Benchlink Agilent (Sc HP), pour des débits d'air et d'eau de 141,5 mln/min, 200 g/h, respectivement. 65

Chapitre IV

Figures :

FIG. IV. 1 Zone de test expérimental du présent travail 69

FIG. IV. 2 Analyse d'une image d'un ''écoulement diphasique'': distinction entre la phase liquide et la phase gazeuse. 70

FIG. IV. 3 Ecoulement typique observé à l'entrée du tube de test (ID3mm) à très faible vitesse apparente du liquide (U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s). 72

FIG. IV. 4 Ecoulement typique observé à l'entrée du tube de test (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide modérée (*ULS = 29* x *10-3 m/s*). 74

FIG. IV. 5 Ecoulement typique observé à l'entrée du tube de test (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide élevée (*ULS = 59* x *10-3 m/s*). 75

FIG. IV. 6 Ecoulement typique observé à 1280 mm de l'entrée du tube de test (ID 3mm), à très faible vitesse apparente du liquide (*ULS = 0.78* x *10-3 m/s*). 76

FIG.IV.7 Ecoulement typique observé à 1280 mm de l'entrée du tube de test (ID 3mm), vitesse apparente du liquide élevée (*ULS = 29* x *10-5 m/s*). 77

FIG. IV. 8 Carte de structures d'écoulements diphasiques air/eau dans un tube horizontal de 3 mm de diamètre intérieur et avec une aiguille d'injection d'air de 110 μm de diamètre intérieur, établie à la zone où le mélange est effectué. 82

FIG. IV. 9 Carte de structures d'écoulements diphasiques air/eau dans un tube horizontal de 3mm de diamètre intérieur et avec une aiguille d'injection d'air de 110 μm de diamètre intérieur, établie à 128cm à partir de l'entrée de tube de test. 83

FIG. IV. 10 Comparaison entre les cartes établies au niveau de la zone de mélange et à 1280mm de l'entrée du tube de test de 3mm de diamètre et une aiguille d'injection du gaz à 110 μm diamètre intérieur. 84

FIG. IV. 11 Comparaison entre les cartes établies avec une conduite de test de 3mm de diamètre et une aiguille d'injection du gaz à 110 μm et 260 μm de diamètre intérieur à 1280mm à partir du tube de test. 85

Tableau

Tableau (IV. 1) : Comparaison des structures visualisées en position horizontale entre la zone de mélange à L/D = 10 et à L/D = 420 mm 80

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les microtechnologies ont connu un essor important au cours de ces dernières décennies. Elles ont petit à petit envahi notre environnement quotidien avec l'apparition de nouvelles technologies dans différents domaines comme ceux de la santé, l'information et les télécommunications, … etc. Cette course effrénée vers la miniaturisation d'objets, de fonctionnalités, de procédés de fabrication, de capteurs de mesures, … etc., se généralisera à tous les secteurs dans les années futures. La miniaturisation présente de nombreux avantages pour les économies de matière, d'énergie et de protection de l'environnement. Elle permet également la création de nouveaux concepts et de microsystèmes qui se généraliseront à tous les domaines comme ceux de l'industrie, le transport, l'énergie, les biotechnologies, la santé, … etc. (Chen et Wu, 2000 ; Anduze et al., 2001 ; Kandlikar, 2002).

Ces micro et nanotechnologies ont suscité un grand intérêt chez la communauté scientifique pour de nouvelles recherches dans un grand nombre de thématiques à des échelles micro et nanoscopiques. Si de nombreux domaines ont été étudiés à des échelles macroscopiques, ils demeurent très difficiles à explorer à des échelles micro et nanoscopiques à cause de la carence d'outils capables d'explorer les phénomènes et les fonctionnalités dans ces petites dimensions (Nakashima et Yasuda, 2007).

Dans un grand nombre de microsystèmes, la microfluidique est omniprésente. On la retrouve dans le génie chimique pour la mise en œuvre de microprocédés, la thermique pour les microéchangeurs, la microélectronique, la mécanique pour la mise en œuvre des microsystèmes électromécaniques (MEMS et NEMS), les biotechnologies, … etc. (Kimura et al., 1999).

Plusieurs de ces applications font intervenir la microfluidique diphasique ou polyphasique pour la synthèse de produits, ou l'intensification des transferts de chaleur et des procédés (Andersson et Van den Berg, 2003 ; Shui et al., 2007 ; Hu et al., 2011). C'est pourquoi de nombreux travaux ont été développés au cours des dernières décennies pour mieux comprendre les écoulements, les transferts et les réactions chimiques en microfluidique diphasique souvent à des fins de dimensionnement des microsystèmes.

Le peu d'information donnée par les auteurs sur leurs métrologies et configurations géométriques utilisées pour réaliser le mélange gaz-liquide, ainsi que sur la position de la

zone de visualisation dans le tube de test a conduit vers des désaccords entre les résultats de plusieurs auteurs bien que parfois les paramètres de contrôles soient identiques. Ceci peut être expliqué à notre avis par des conditions d'entrée différentes et une précision et stabilité des débits des fluides de travail pas bien maitrisées.

La maîtrise des débits pour les écoulements diphasiques n'est pas aisée lorsque les débits sont très faibles. Aussi, le besoin de disposer de données fiables et précises est primordial. Sur les dispositifs expérimentaux conçus antérieurement par plusieurs expérimentateurs, durant le déroulement des expériences, il apparait souvent un phénomène de pertes de débit du liquide à l'entrée du tube de test. Celles-ci sont mises en évidence à partir des données de débit mesurées par différentes techniques (débitmètre indicateur de débit, ou par la méthode de la pesée,…. etc.). Ces pertes de débits s'intensifient au fur et à mesure que le débit du gaz augmente. Elles sont dues à la prédominance progressive de la pression du gaz vis-à-vis de la pression du liquide à l'entrée de la conduite au niveau de la zone de mélange. Ceci va engendrer une pression de retour dans le circuit du liquide, qui va produire des instabilités d'écoulements de la phase liquide. En conséquence, ces variations peuvent donner lieu à l'apparition de plusieurs structures diphasiques intermittentes pour des conditions opératoires supposées identiques (Damianides and Westwater 1988, Fukano and Kariyasaki 1993).

L'objet de notre investigation est l'étude des écoulements diphasiques en absence de changement de phase et de transfert de chaleur dans des conduites de petites dimensions. En vue d'une meilleure compréhension des mécanismes hydrodynamiques et interfaciaux mis en jeu dans les écoulements diphasiques gaz-liquide au cœur des géométries confinées, il est important de maitriser l'ensemble des paramètres qui gouvernent l'écoulement diphasique.

Sur cette base, nous avons entrepris une étude des écoulements diphasiques gaz-liquide horizontale en co-courant dans des conditions expérimentales les mieux maitrisées possibles aussi bien pour les conditions géométriques qu'opératoires.

Les gammes de vitesses apparentes considérées, diffèrent notablement de celles retenues jusque là par les différents auteurs. Les gammes de vitesses apparentes choisies permettent de créer des écoulements diphasiques ‘’laminaires’’ où les interfaces sont les moins perturbées possibles.

Le plan proposé pour la présentation de cette thèse s'articule, dans une première partie, on a établie des généralités sur les écoulements diphasiques en conduite, dans une deuxième

partie sur une revue bibliographique des travaux réalisés dans le domaine des écoulements diphasiques dans des conduites de petites dimensions. Cette recherche bibliographique se focalisera sur les travaux portant sur les écoulements diphasiques gaz-liquide, sans transfert de chaleur et en absence de changement de phase, dans des conduites circulaires. Nous analyserons plus précisément les caractéristiques des écoulements diphasiques comprenant à la fois les structures d'écoulements observées et les cartes d'écoulements.

Après avoir défini et discuté les notions de macro et micro-canaux et les mécanismes mis en jeu associés, nous rappellerons dans cette deuxième partie, les résultats majeurs obtenus dans ce domaine en mettant en évidence les paramètres dominants de ces écoulements diphasiques. Un organigramme détaillant l'ensemble des paramètres influençant les caractéristiques des écoulements diphasiques et notamment sur les cartes d'écoulement sera déduit.

Dans la partie suivante du mémoire, nous détaillerons le dispositif expérimental mis en œuvre et l'instrumentation associée pour étudier les structures d'écoulements diphasiques avec des conditions d'entrée et de débits rigoureusement contrôlées. Nous présenterons, dans le quatrième chapitre, les résultats expérimentaux obtenus pour des écoulements diphasiques en direction horizontale. Nous comparerons les cartes d'écoulement obtenues dans la zone où est crée le mélange diphasique à l'entrée de la conduite (L/D=10) et en aval loin de l'entrée (L/D=420). Nous mettrons en évidence dans ces deux zones des structures d'écoulement principales : bulles, poches, annulaire. Ces structures diffèrent notablement selon la position dans la conduite de test. Nous détaillerons les différentes structures observées et les comparerons suivant la position dans le canal. Nous analyserons ces résultats et proposerons les premières interprétations de l'établissement des écoulements diphasiques dans les conduites horizontales à faible diamètre.

CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES ECOULEMENTS DIPHASIQUES EN CONDUITE

Chapitre I. Généralités sur les écoulements diphasiques en conduite

I. 1 Introduction

Les écoulements diphasiques sont plus complexes que les écoulements monophasiques à cause, d'une part, de la dynamique des interfaces (déformation, rupture, coalescence) qui varie d'une manière brusque, et d'autre part, de l'évolution de ces interfaces à des échelles très variées qui peuvent aller de quelques microns à quelques mètres.

Dans ce chapitre, on verra des généralités sur les écoulements diphasiques (principaux paramètres, régimes et cartes d'écoulements), ainsi que des travaux antérieurs relatifs aux écoulements diphasiques en présence d'un coude.

I.2 Phénoménologie des configurations d'écoulement diphasique en conduite horizontale

I.2.1 Principe de classification des écoulements diphasiques

Le nombre de configurations possibles en écoulement horizontal est plus grand qu‟en écoulement vertical. En effet, la pesanteur est un paramètre supplémentaire. Elle tend à séparer les phases et à créer une stratification horizontale.

Plusieurs auteurs, dont Aloui (1994), rappellent que les écoulements diphasiques peuvent être classés selon les phases en présence (liquide, solide, gaz ou plasma (gaz ionisé). Les combinaisons possibles sont les suivantes:

- Mélange de deux liquides non miscibles (échangeurs à contact direct par exemple).
- Mélange solide liquide (transport de boue, etc.).
- Mélange gaz solide (transport pneumatique).
- Mélange gaz liquide (ébullition dans les réacteurs nucléaires).
- Mélange plasma solide (synthèse de nanoparticule).

Dans notre cas, nous nous intéresserons uniquement aux mélanges de fluide (gaz/liquide) sans transfert de masse entre les deux fluides (ni réaction chimique, ni changement de phase). Les écoulements diphasiques peuvent également être classés selon la distribution spatiale des interfaces ; les différentes organisations que peut prendre un écoulement diphasique sont

appelées configurations d'écoulement.

En écoulement diphasique gaz-liquide, les calculs et les descriptions sont effectués pour une configuration donnée de l'écoulement. Ces configurations sont basées sur la description d'interfaces qu'on appelle "régimes d'écoulement", et qu'on peut prévoir à l'aide "des cartes d'écoulement".

I.2.2 Configurations d'écoulement diphasique en conduite horizontale

L'identification des configurations d'écoulement et les définitions de critères de transition ont fait l'objet de plusieurs investigations tant sur le plan numérique qu'expérimental. Govier et Aziz (1972), Delhaye (1981), Hewitt (1982) puis Collier et Thom (1994) ont réalisé une revue bibliographique exhaustive.

Les descriptions suivantes sont basées sur les classifications généralement admises d'Alves (1954), Baker (1954), Govier et Omer (1962) ainsi que Mandhane et al (1974)pour un écoulement diphasique gaz liquide en conduite horizontale.(Figure I.1) montre les types d'écoulement les plus courants.

I.2.2.1 L'écoulement à bulles allongées

L'écoulement à bulles allongées (elongated bubbles) est constitué d'une succession de poches de gaz dont l'avant est arrondi et l'arrière est plat. Ces poches se déplacent le long de la partie supérieure de la conduite et sont transportées par la phase liquide. Le sillage de chaque poche contient souvent de nombreuses bulles. (Figure. I.1**.** (a)).

I.2.2.2 L'écoulement stratifié

Les écoulements stratifiés (stratified flow) présentent une séparation nette entre la phase liquide située dans le bas du tube et la phase gazeuse. Cette configuration se rencontre pour des débits de gaz et de liquide assez faibles. La forme de l'interface est contrôlée par la compétition entre les forces d'inertie qui tendent à la déformer (champ de vagues) et les forces de gravité et de tension superficielles qui tendent à la maintenir plane. (Figure. I.1. (b)).

I.2.2.3 L'écoulement ondulé

Pour des vitesses de gaz plus importantes, l'interface a tendance à se déformer et des petites vagues apparaissent à la surface. Les travaux sur la stabilité des écoulements diphasiques en conduite horizontale montrent que les domaines d'existence des régimes stratifiés et ondulés sont définis par une courbe nommée ZNS (zeroneutralstability) (Brauner et MoalemMaron) (1992) ou encore KVH (Viscous Kelvin-Helmholtz) (Trallero) (1995).Cette courbe est issue

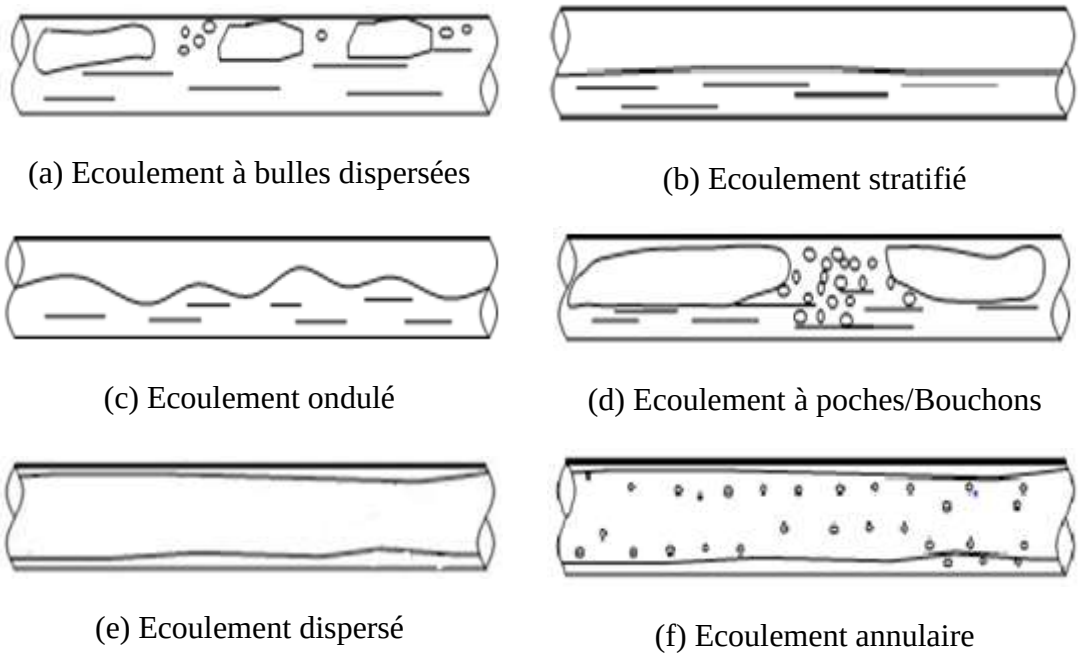
de l'étude des instabilités de type Kelvin–Helmholtz, réalisée à partir de la formulation temporelle des équations du modèle à deux fluides. (Figure. I.1. (c)).

I.2.2.4 L'écoulement à poche/Bouchon

L'écoulement à bouchons (slug pour la version anglo-saxonne) est présent pour des vitesses de gaz et de liquides moyennes. La structure présente une succession de poches de gaz et de bouchons de liquide qui contiennent de petites bulles. (Figure. I.1. (d)).

I.2.2.5 L'écoulement dispersé

C'est un écoulement dans lequel les bulles de gaz se déplacent le long de la partie supérieure de la conduite. Ces bulles sont distribuées au sein d'une phase liquide continue. Avec une augmentation du débit du gaz, le nombre de bulles augmente jusqu'à remplir entièrement la section droite de la conduite. (Figure. I.1. (e)).



(a) Ecoulement à bulles dispersées (b) Ecoulement stratifié

(c) Ecoulement ondulé (d) Ecoulement à poches/Bouchons

(e) Ecoulement dispersé (f) Ecoulement annulaire

Figure I.1 Configurations d'écoulements diphasiques en conduite horizontal.

I.2.2.6 L'écoulement annulaire

Lorsque la proportion et le débit de la phase gazeuse sont très élevés, le liquide ne peut plus être assimilé par l'écoulement et reste confiné aux parois de la conduite formant alorsun anneau dont la face interne est ondulée par la turbulence. Le régime annulaire est ainsi caractérisé par la continuité de la phase gazeuse au cœur du tube et donc par une séparation quasi-totale des phases. De fines gouttelettes sont cependant observées dans la colonne de gaz

centrale. (Figure. I.1. (f)).

I.3 Les cartes de structures d'écoulements diphasiques

Une carte de structure d'écoulement diphasique, comme son nom l'indique, est une représentation graphique bidimensionnelle des domaines d'existence des différents régimes.

La prédiction de la structure d'écoulement n'est pas facile à donner, la principale raison étant la complexité de l'écoulement diphasique, et plus particulièrement des différents phénomènes rencontrés au niveau des interfaces. Ces derniers sont gouvernés par une multitude de facteurs incluant la gravité, la géométrie, les débits, les propriétés des fluides ainsi que la forme de l'interface. De plus, pour compliquer encore la situation, l'écoulement diphasique est habituellement turbulent.

C'est pourquoi les chercheurs essaient d'éviter les difficultés mathématiques en s'appuyant plutôt sur des corrélations empiriques.

Dans le but d'aider à la prédiction des différentes configurations, de même que les transitions entre les divers régimes, il est très utile de disposer d'une carte d'écoulement montrant quel régime aura lieu pour différentes combinaisons des débits phasiques. Ces cartes sont basées sur des paramètres généraux issus de travaux connus aussi bienthéoriques qu'expérimentaux.

Ces cartes sont différentes selon les auteurs. Tout d'abord, il n'existe aucun consensus sur le système de coordonnées qui les définissent, c'est l'expérimentateur qui choisit ces coordonnées parmi les variables de l'écoulement gaz liquide. De plus, les frontières entre les différents régimes n'ont jamais été bien définies et les zones de transitions sont relativement étendues, d'où le caractère subjectif de ces cartes d'écoulement.

I.3.1 Carte de Mandhane et al. (1974)

Mandhane et al. (1974) ont collecté quelques 6000 observations de configurations d'écoulement diphasique en conduite horizontale. Après examen de cette considérable banque de données, 1178 observations ont été retenues pour produire ce qui est convenu de considérer comme la carte la plus appropriée pour décrire l'écoulement diphasique en conduite horizontale. En effet, l'usage répandu de cette carte vient du fait qu'elle couvre de très larges gammes de valeurs des paramètres de l'écoulement. Cette carte utilise comme système de coordonnées les vitesses superficielles du liquide et du gaz en coordonnées logarithmiques pour définir les zones d'existence de différents régimes d'écoulement.

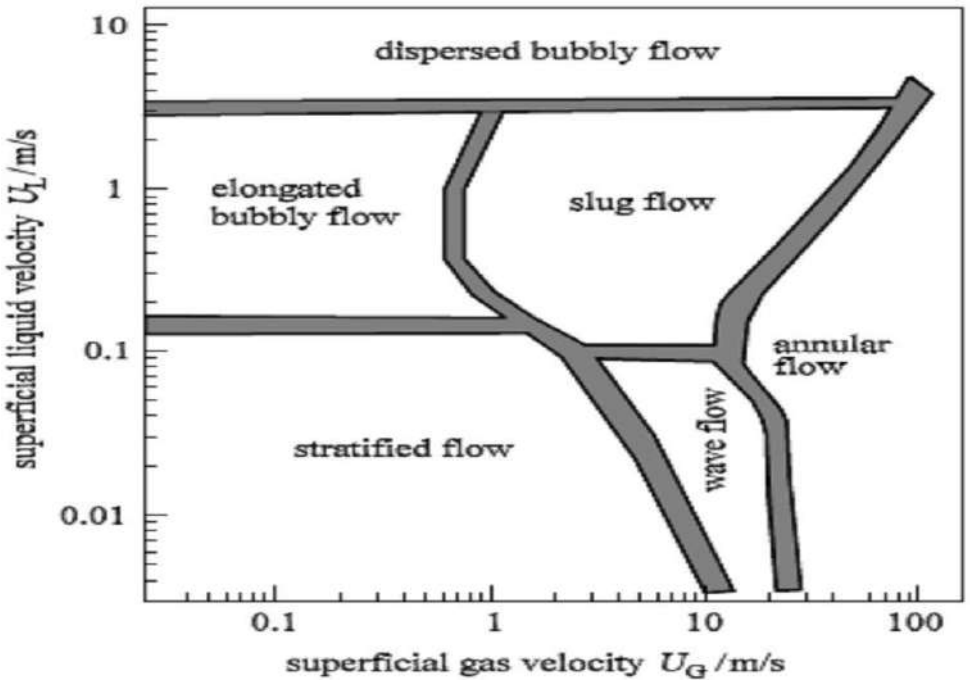


Figure I.2. Carte des différents régimes d'un écoulement diphasique dans une conduite cylindrique horizontale (Mandhane et al. 1974).

I.3.2 Carte de Taitel et Duckler. (1976)

Taitel et Dukler (1976) ont développé un modèle physique simple dans le but de prédire les transitions entre régimes d'écoulement diphasique en conduite horizontale et légèrement inclinée. Leur étude constitue la première tentative d'établissement de carte d'écoulements sans recourir de façon exclusive aux observations expérimentales. Se basant sur des concepts physiques simples, Taitel et Dukler (1976) ont établi des critères qui traitent du comportement de l'écoulement à la frontière entre deux régimes.

Ce modèle validé par les résultats expérimentaux tient compte aussi bien des propriétés des fluides que des dimensions de la conduite et de son inclinaison. Taitel et Dukler (1976) recensent les régimes d'écoulement suivant: stratifié lisse „stratifiedsmooth" (SS), stratifié ondulé „stratifiedwavy" (SW), intermittent (I), bulles dispersées „dispersedbubble" (DB), et annulaire „annular" (A). Le régime intermittent inclutaussi bien l'écoulement à bouchons que l'écoulement à poches. La figure suivante (Figure I.3)montre la carte obtenue par Taitel et Dukler (1976).

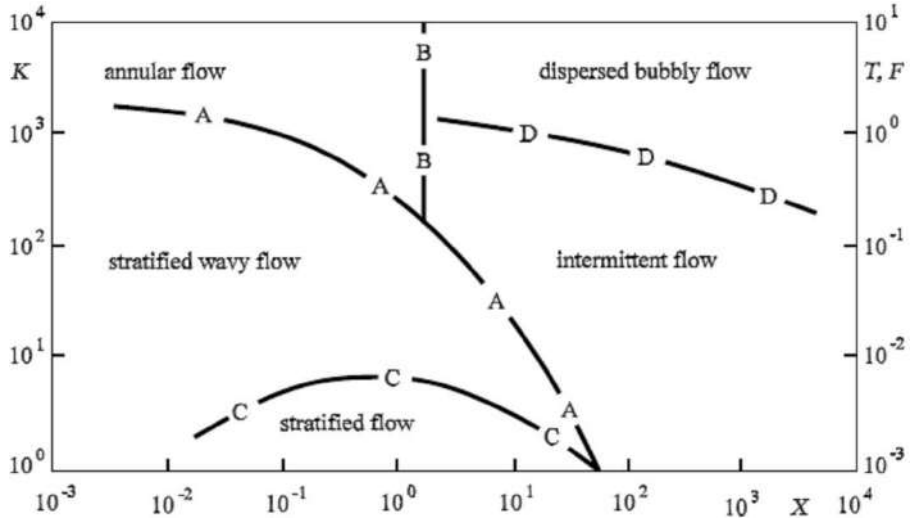


Figure I.3. Carte des différents régimes d'˜un écoulement diphasique dans uneconduite horizontale (Taitel et Dukler, 1976).

I.3.3 Carte Mécanistes

Les cartes mécanistes sont par contre développées en analysant les mécanismes physiques de transition modélisés à travers les équations fondamentales (Fig. I.4). Les corrélations empiriques sont toujours utilisées dans les modèles mécanistes pour la fermeture du modèle.

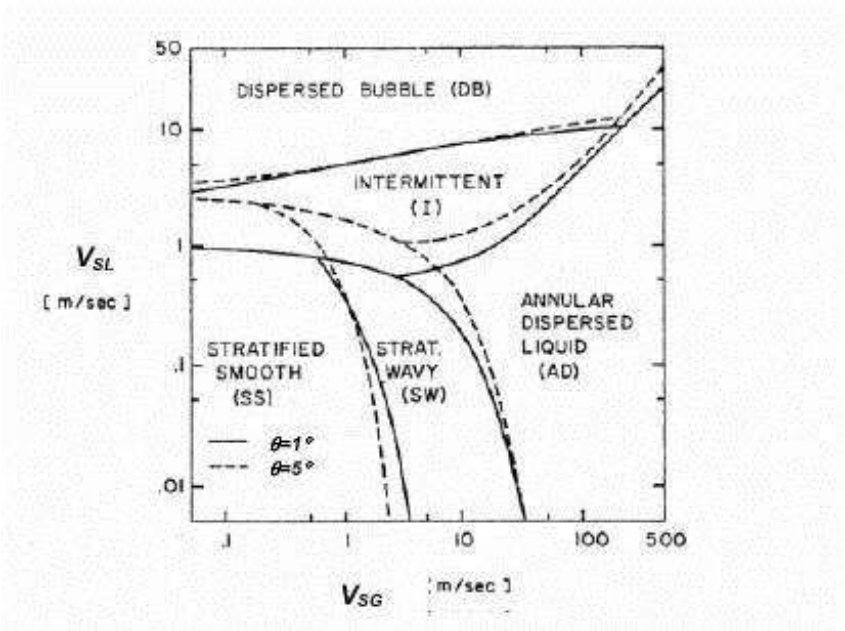


Figure.I.4. Exemple d'une carte mécaniste.

I.4 Phénoménologie des structures d'écoulements diphasiques en conduite verticale

Lors d'un écoulement diphasique gaz liquide, l'interface entre les deux phases peut prendre plusieurs formes, cela dépend du débit, des propriétés du fluide et de la géométrie du système. Les configurations de l'écoulement sont utilisées dans la description de cette distribution. La terminologie utilisée dans la définition de plusieurs régimes d'écoulements dépend de l'interprétation des expériences réalisées. La classification des régimes d'écoulement est valide seulement d'un point de vue qualitatif (Fig. I.4).

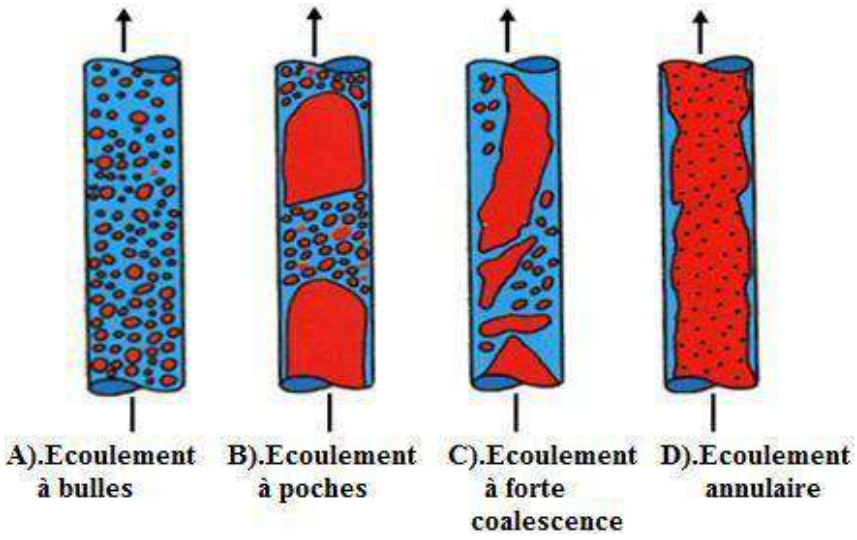


Figure. I.5 Régimes d'écoulements ascendants dans une conduite verticale.

I. 4.1 Ecoulement à bulles

La phase gazeuse de l'écoulement est répartie sous forme de bulles dispersées dans le liquide qui constitue la phase continue. Les dimensions de ces bulles sont petites en comparaison avec le diamètre de la conduite. Ce régime n'apparaît que pour de faibles vitesses superficielles de gaz.

I.4.2 Ecoulement à poches

En augmentant le débit de gaz, les bulles coalescent pour donner lieu à des poches de gaz séparées par des bouchons de liquide de sections voisines de celle de la conduite.

I.4.3 Ecoulement à forte coalescence

L'écoulement à poches peut mener à des instabilités. Dans cette situation la forme du bouchon est très irrégulière et avec une interface instable et allongée.

I.4.4 Ecoulement annulaire

La phase liquide circule comme un film près des parois du tube, avec ou sans bulles. Cette phase est aussi présente sous une forme dispersée, dans la phase gazeuse qui s'écoule dans le centre du tube.

On peut citer deux autres types d‟écoulements de plus dans les conduites verticale sont :

I.4.5 Ecoulement de transition

Les bouchons de liquide entre les bulles de gaz disparaissent et en un point la phase liquide se distribue de manière discontinue alors que la phase gazeuse devient continue.

I.4.6 Ecoulement dispersé

La phase liquide se présente comme de petites gouttes dispersées dans la phase gazeuse continue et le liquide mouille la paroi de la conduite. Généralement, l'écoulement dispersé n'est pas obtenu pour les conditions adiabatiques, où il y a une quantité de liquide même petite est généralement présente.

La différence principale entre les régimes d'écoulements diphasiques dans les conduites verticales et horizontales réside dans la diversité des effets de la force de gravité. Dans les conduites verticales, elle agit dans la même direction que la force d'inertie et la force visqueuse, tandis que dans la configuration horizontale, la force de gravité agit dans une direction normale à l'axe du canal ; ceci a comme conséquence l'apparition de la stratification des deux phases.

I.5 Synthèse de travaux antérieurs relatifs à la présence du coude dans les conduites

Les circuits de transport dans les installations industrielles comportent, pour la plupart, de diverses singularités qui provoquent d'importantes modifications de l'écoulement. Leurs influences peuvent engendrer des modifications de l'écoulement telles que la séparation des phases, les instabilités et le changement du régime de l'écoulement. Parmi ces singularités, le cas du coude (90°), correspond à une situation très courante dans la pratique. Les écoulements dans de telles singularités ont donné lieu, à une abondante littérature portant aussi bien sur le plan théorique qu'expérimental. Ces travaux restent insuffisants à ce jour lorsque l'on sait l'importance que peut présenter un rétrécissement brusque.

Dans ce qui suit, sans être exhaustif, nous évoquerons quelques travaux élaborés ces dernières années. Ces travaux nous servent de base de comparaison pour notre étude.

I.5.1 Modèle homogène

Le modèle homogène traite le mélange diphasique gaz-liquide comme un pseudo-fluide

monophasique dont les propriétés sont les moyennes du mélange obéissant aux lois d'un écoulement monophasique. Nous pouvons donc reprendre l'expression de la chute de pression singulière pour l'écoulement monophasique en remplaçant ρ par ρ_m :

$$\Delta P_c = \frac{G^2}{\rho_m}\sigma_A(1-\sigma_A) \qquad \text{(I.1)}$$

Avec $$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \qquad \text{(I.2)}$$

I.5.2 Etude de CHENOWETH et MARTIN (1955)

CHENOWETH et MARTIN (1955) ont étudié expérimentalement les écoulements diphasiques air-eau dans les coudes formés. Les résultats expérimentaux ont été comparés avec ceux obtenus à partir du modèle homogène et ceux d'un modèle basé sur la conservation de la quantité de mouvement, de la masse et de l'énergie. Partant de là, il déduit que le modèle homogène est celui qui présente une meilleure concordance avec les résultats expérimentaux.
Ce travail à montré que la chute de pression d'un écoulement diphasique en présence d'un coude est plus élevée que pour l'écoulement monophasique, La chute de pression à travers un coude relié à une conduite verticale vers le haut a été trouvée significativement plus faible (moins de 35%) que dans le cas d'un coude relié à une conduite verticale vers le bas.

I.5.3 Modèle DEOBOLD (1962)

DEOBOLD (1962) a procédé à une étude exhaustive de la chute de pression d'abord dans le cas d'un écoulement monophasique eau, puis un écoulement diphasique air-eau pour différentes géométries, à savoir, horizontale-coude – verticale / verticale-coude –horizontale. Leurs résultats ont montré que le modèle est le mieux adapté pour l'étude de la chute de pression.

I.5.4 Modèle de FITZIMMONS (1964)

FITZIMMONS a étudié la variation de la pression en présence de singularité. Dès lors, un modèle de la chute de pression à travers un rétrécissement brusque qui intègre les effets des paramètres à l'instar du multiplicateur du LOCKHART et MARTINELLI ($Ø^2_{GB}$), ainsi que la longueur et le diamètre de la conduite a été développé.

I.5.5 Modèle de SEKODA et al (1969)

SEKODA a fait également une référence à la perte de pression de liquide monophasique dans

le coude ($Ø^2_{LB}$) la chute de pression dans l'écoulement diphasique s'est avérée être indépendantes du diamètre du tube et dépendante de R/d dans une manière similaire à celle trouvée pour l'écoulement monophasique.

R/d : (R : Rayon, d : diamètre).

I.5.6 Modèle de BRUCE (1971)

BRUCE (1971) étudié expérimentalement l'écoulement diphasique des fluides frigorigènes dans des conduites circulaires de diamètres différentes. Les résultats de mesures ont été comparés avec les corrélations disponibles dans la littérature, là aussi le modèle homogène semble le mieux adapté.

I.5.7 Modèle de CHISHLM (1983)

L'étude de Chisholm (1983), basée là aussi sur les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, a été menée dans le but de déterminer la chute de pression singulière. Cette dernière est donnée selon Chisholm (1983) par l'expression suivante :

$$\Delta P_c = \Delta P_{cl}\left[1 + \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1\right)(Bx(1-x) + x^2)\right] \qquad \text{(I.3)}$$

Chisholm (1983) [18] a introduit un coefficient correctif B sous la forme

$$\mathbf{B=} \qquad \frac{\left\{\frac{1}{K_0}\left(\frac{1}{(\sigma_A C_c)^2} - 1\right) - \frac{2}{(K_0 C_c \sigma_A^2)} + \frac{2}{(\sigma_A^2 K_0^{0.28})}\right\}}{\frac{1}{(\sigma_A C_c)^2} - 1 - \frac{2}{(C_c \sigma_A^2)} + \frac{2}{\sigma_A^2}} \qquad \mathbf{(1.4)}$$

Où ΔP_{cl} est la chute de pression singulière du liquide à travers la même contraction, et k_o est donnée par la relation : $k_o = \left(1 + x\left(\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1\right)\right)^{0.5}$ pour $x > 1\left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.25}$

Pour $x < 1$

Où x est le coefficient de Lockhart-Martinelli.

I.6 Tableau de l'écoulement diphasique dans le tube courbé et les coudes

Auteur	Géométrie	Diamètre (m)	R/d	Type de fluide	Ecoulement	Corrélation
CHENOWTH et MARTIN (1955)	180°	0.078	7.5	Air-eau	Horizontal	$Ø^2_{LA}$ contre Q_L/Q_T
FITZMMONS (1964)	Coude 90°	0.0488	1 ; 1.5 ; 5.2	Eau-vapeur	Horizontal	$Ø^2_{GB}$ contre l_e/d
SKODA (1969)	Coude 90°	0.018 ; 0.0257	2.36 5.02	Air-eau	Horizontal	$Ø'_{LB}$
BRUCE (1971)	Coude 90°	0.019	4.6 10.5	Air-eau	Horizontal	$Ø^2_{LB}$
FREESTON et DOLE (1977)	Coudes 45° ,90°,180°	0.01	0.75 4.5	Eau-vapeur	Horizontal	l_e/d contre V_L
NOERSTEBOE (1986)	Coude 90° Virage180°	0.0223 ; 0.0825 ; 0.12	1.3 1.4	R_{12} R_{717}	Horizontal	DP_{TP} -DP_{LA} / DP_{GA}-DP_{LA}
DEOBOLD (1962)	Coude 90° (bobine carrée)	0.0266	1.5	Eau-vapeur	Horizontal en haut et vertical vers le bas	$Ø^2_L$
TAKAHASHI J.HAYASHID S. ARAMAKI M.SODA(1970	Coude 90°	0.201	1.5	Eau-vapeur	Vertical en haut et horizontal vers le bas	$Ø^2_L$ contre W_G/W_L
C.MADDOCK (1974)	Coudes (30°,45°,60 °,90°)	0.0254	1 ; 5; 10	Air-eau	En haut	Data

Tableau I.1 Ecoulement diphasique dans le tube courbé et les coudes

Toutefois, l'examen de la littérature révèle que peu d'efforts ont été faits (au meilleur de notre connaissance) pour arriver à une simulation numérique des écoulements diphasiques en présence de singularité (Belgacem et al 2016, Belgacem et al 2017).

I.7 Conclusion

Vu l'importance que revêt la connaissance de la structure de l'écoulement et son comportement hydrodynamique dans les cas où il y a des géométries un peu compliquées comme le coude à 90°, il apparaît certain que d'autres études sont nécessaires pour aboutir à des modèles englobant notamment d'autres régimes d'écoulement.

La présente étude se propose donc d'étudier numériquement le comportement d'un écoulement diphasique gaz-liquide en présence d'un coude pour participer aux efforts dans ce domaine.

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre II. Revue bibliographique sur les écoulements diphasiques adiabatiques dans les conduites capillaires

II.1 Introduction

Les écoulements diphasiques aux macro-échelles ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche et développements depuis plusieurs décennies. Ils ont permis de faire des avancées spectaculaires pour le dimensionnement des circuits thermohydrauliques de centrales nucléaires et thermique pour la production d'énergie électrique, des réacteurs diphasiques et polyphasiques en génie chimique et pétrochimie pour la transformation de la matière, etc. (Natividad et al., 2004 ; Hoek et al., 2004).

Boelter et Kepner (1939) avaient noté que l'introduction d'une petite quantité de liquide dans un écoulement monophasique gazeux dans une conduite a comme conséquence un écoulement diphasique gaz-liquide. La réduction de la zone d'occupation de chaque phase dans la conduite entraine une augmentation significative de la chute de pression du mélange diphasique. L'augmentation progressive de la quantité de liquide va engendrer des structures d'écoulements qui vont changer suivant les propriétés d'écoulements, de la géométrie de la conduite et des conditions opératoires.

Dans les conduites de faible diamètre hydraulique, les interactions entre les fluides et les parois du tube deviennent importantes et peuvent de ce fait modifier les écoulements diphasiques par rapport à des conduites de grande section. De nombreux travaux ont été réalisés au cours de cette dernière décennie afin de mieux comprendre le comportement de ces écoulements diphasiques lorsque le confinement devient de plus en plus important (Triplett et al., 1999 ; Zhao et Bi, 2001 ; Yang et Shieh 2001 ; Kawahara et al., 2002 ; Serizawa et al., 2002 ; Chen et al., 2002 ; Chung et Kawaji, 2004 ; Cubaud et Ho, 2004).

Chinnov et Kabov (2006), Saisorn et Wongwises (2008) et Shao et al. (2009) ont été les premiers auteurs à réaliser des revues bibliographiques sur les écoulements diphasiques en conduites.

Chinnov et Kabov (2006) ont passé en revue les travaux relatifs aux cartes d'écoulements pour les différentes géométries de conduites (circulaire, rectangulaire, triangulaire) et de

diamètres hydrauliques (20 µm< d_h < 255mm) pour les écoulements diphasiques adiabatiques et en ébullition convective.

Saisorn et Wongwises (2008) ont réalisé une revue sur les écoulements diphasiques adiabatiques (air-eau) dans les microcanaux de différentes géométries et de diamètres hydrauliques allant de 20µm à 5.58 mm. Ils ont essentiellement analysé les caractéristiques des écoulements diphasiques et plus particulièrement celles relatives aux lois de pertes de pression.

Shao et al. (2009) ont passé en revue les travaux pour les écoulements diphasiques adiabatiques à faible diamètre hydraulique (0.05 mm < d_h < 5.5 mm). Outre l'influence du diamètre et de la géométrie du canal, ils ont analysé l'influence des propriétés physiques des fluides, de l'orientation de la conduite vis à vis de la gravité et du mouillage de la paroi sur les cartes d'écoulements. Ils comparent les résultats expérimentaux aux modèles existants dans la littérature. Ces auteurs mentionnent le nombre limité d'études sur l'influence des conditions d'entrée sur les structures d'écoulements.

D'une manière générale tous ces auteurs concluent que l'état de l'art n'est pas suffisamment développé pour la compréhension des écoulements diphasiques, l'établissement des cartes d'écoulements et la prédiction des lois d'écoulements diphasiques. Ils montrent que les lois établies pour les macroconduites ne sont pas applicables pour les microcanaux. Shao et al. (2009) et Chinnov et Kabov (2006) concluent qu'il n'existe pas de carte d'écoulement universelle capable de prédire les structures d'écoulements diphasiques dans les conduites. L'influence des différents paramètres géométriques, des propriétés du fluide, et des conditions opératoires n'est pas bien comprise à l'heure actuelle. Ils suggèrent que la meilleure représentation de ces cartes reste encore celle établie dans les coordonnées des vitesses apparentes des phases (U_{Ls}, U_{Gs}).

Dans ces trois revues (Chinnov et Kabov, 2006 ; Saisorn et Wongwises, 2008 et Shao et al., 2009) ces auteurs ont examiné un nombre important de paramètres influençant les écoulements diphasiques. Ils ont comparé les résultats des auteurs qui ont réalisé des expériences dans des situations analogues et parfois très différentes. Par exemple les cartes d'écoulements et les caractéristiques associées engendrées en présence de changement de phase (ébullition ou condensation convective) peuvent conduire à des structures

qualitativement semblables avec des caractéristiques d'écoulements très différentes. En effet la génération de vapeur à la paroi modifie le frottement pariétal et par conséquent les lois d'écoulement diphasique et sans doute les structures engendrées.

La complexité des écoulements diphasiques et la diversité des situations (conditions opératoires, fluides, changement de phase, …) ne permettent pas de réaliser une comparaison quantitative entre les différents résultats des travaux publiés par de nombreux auteurs. Pour ces différentes raisons, nous réalisons cette recherche bibliographique des différents travaux limités à un nombre réduits de paramètres influençant les caractéristiques des écoulements diphasiques.

L'objet de ce chapitre est de passer en revue les travaux réalisés dans le domaine des écoulements diphasiques dans les conduites horizontales de petites dimensions. Cet état de l'art sera focalisé sur les travaux portant sur les écoulements diphasiques gaz-liquide, sans transferts de chaleur et en absence de changement de phase, dans des conduites circulaires. Nous analyserons plus précisément les caractéristiques des écoulements diphasiques comprenant à la fois les structures d'écoulements observées et les cartes d'écoulements.

Après avoir défini et discuté la notion de macro et micro-canaux et des mécanismes mis en jeu associés, nous rappellerons dans la première partie de ce chapitre, les résultats majeurs obtenus dans ce domaine en mettant en évidence les paramètres dominants de ces écoulements diphasiques. Nous déduirons de cette analyse un organigramme détaillant l'ensemble des paramètres influençant les caractéristiques des structures d'écoulements diphasiques et en conséquence les cartes d'écoulement.

Nous passerons ensuite à la revue des différents travaux sur les caractéristiques de ces écoulements dans la configuration simplifiée retenue (écoulement gaz-liquide adiabatique dans les conduites circulaires de faible diamètre). Nous analyserons plus particulièrement l'influence des conditions d'entrées sur les cartes d'écoulements.

La dernière partie sera consacrée à la discussion et l'analyse de ces différents travaux. Cette analyse portera sur la comparaison des résultats expérimentaux obtenus aux différents modèles de la littérature. Sur cette base nous conclurons sur les avancées déjà obtenues dans le domaine et les lacunes nécessaires à combler pour une meilleure compréhension de ces écoulements diphasiques adiabatiques dans les conduites circulaires.

II.2 Macro et micro canaux et phénomènes mis en jeu

Dans la littérature les auteurs distinguent maintenant les écoulements diphasiques suivant qu'ils ont lieu dans des macro, mini ou micro canaux. Cette distinction n'est pas actuellement claire et plusieurs auteurs se sont saisis de la question pour apporter une classification. La première classification consiste à distinguer ces écoulements suivant une échelle métrique de la conduite. Basée sur ce principe, Kandlikar et al. (2006) ont proposé une distinction entre macro, mini et microcanaux suivant le diamètre hydraulique du canal:

Macro-Canaux	$D_h > 3mm$
Minicanaux	$200\ \mu m < D_h < 3000\mu m$
Microcanaux	$10\ \mu m < D_h < 200\ \mu m$
Nanocanaux	$D_h < 0.1\ \mu m$

Triplett et al. (1999) suggèrent une transition d'un écoulement dominé par la gravité vers un écoulement dominé par la tension superficielle pour un diamètre de conduite compris entre 1 et 2 mm ; tandis que Chen et al. (2006) proposent une valeur de 2 mm pour cette transition.
La réduction du diamètre de la conduite va modifier le comportement de ces écoulements car les effets de confinement et de frottements pariétaux vont devenir de plus en plus importants au fur et à mesure que le diamètre de la conduite diminue. L'augmentation du rapport surface latérale de la conduite sur le volume occupé par le fluide ($S/V = 4/D_h$) conduit également à une diminution des degrés de liberté de l'écoulement diphasique. Les effets tridimensionnels de ces écoulements s'amenuisent à mesure que le diamètre de la conduite diminue.
Une classification de ces écoulements doit donc prendre en considération en plus du diamètre hydraulique les dimensions caractéristiques des effets existants dans ces écoulements diphasiques.
C'est pourquoi plusieurs auteurs ont introduit des grandeurs adimensionnelles pour caractériser le comportement de ces écoulements diphasiques (régime, stabilité, effets prépondérants).

Kew et Cornwell (1997) ont proposé le nombre de confinement C_0 pour distinguer la transition de la macro-échelle vers la micro-échelle d'un écoulement diphasique :

$$C_0 = \frac{1}{D_h}\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)}} \qquad (1)$$

Ce nombre compare la longueur capillaire l_{cap} au diamètre hydraulique de la conduite D_h. Ces auteurs proposent une valeur de transition pour un nombre de confinement égal à 0.5.

Brauner et Ullmann (2006) qui ont également étudié l'effet du diamètre du canal sur les mécanismes contrôlant les transitions dans des structures d'écoulements diphasiques ont proposé le nombre d'Eötvös *Eö* pour caractériser cette transition. Comme pour le nombre de confinement, ce nombre compare les effets de tension superficielle aux effets de gravité entre phases. Il est défini par la relation suivante :

$$Eö = \frac{g(\rho_L - \rho_G)D_h^{\,2}}{\sigma} \qquad (2)$$

Ces auteurs proposent une transition s'opérant pour une valeur seuil d'Eötvos $Eö \approx 0.2$. Il est à noter que ces deux nombres *Co* et *Eo* sont analogues car ils comparent les effets de gravité aux effets de tension superficielle. Ces nombres adimensionnels sont liés par la relation suivante :

$$Eö = \frac{1}{Co^2} \qquad (3)$$

Li et Wang (2003) ont effectué une investigation expérimentale pour déterminer les effets de la taille du canal sur les structures d'écoulements diphasiques pour la condensation dans un tube horizontal. Ils ont étudié les effets de la gravité sur la transition de l'écoulement asymétrique vers l'écoulement symétrique. Ils ont défini un diamètre seuil et un diamètre critique pour caractériser l'importance relative entre ces deux effets. Ils proposent une gamme de transition où les deux effets ont une importance comparable :

$$0.57 < C_0 < 4.46 \qquad (4)$$

En dehors de cette gamme c'est l'un ou l'autre de ces effets qui conditionne la répartition des phases dans le canal. Pour $C_0 > 4.46$ les effets de tension superficielle sont dominants et l'écoulement diphasique est symétrique. Pour $C_0 < 0.57$ les effets de la gravité sont plus importants et l'écoulement est asymétrique.

Pour délimiter l'influence de la taille du canal, ces auteurs ont comparé le diamètre hydraulique à la longueur capillaire. Aucune autre longueur caractéristique n'a été à ce jour comparée au diamètre hydraulique.

Lorsque l'écoulement diphasique s'opère dans un canal horizontal cette comparaison n'est pertinente que pour évaluer les effets de stratification des phases. En revanche Suivant le sens de l'écoulement la force de gravité est absente. Le nombre de confinement n'est pas déterminant sur la structure d'écoulement.

Une classification générale suivant le diamètre doit donc prendre en compte les mécanismes physiques mis en jeu suivant la situation de l'écoulement diphasique considérée.

Par conséquent, d'autres longueurs caractéristiques doivent être prises en considération. En effet dans un *écoulement diphasique, les forces d'inertie, de frottement pariétal, de surface et de gravité interviennent. Ces forces sont regroupées dans le Tableau (II. 1) suivant :*

Effet physique	***Phase gazeuse***	***Interaction entre phases***	***Phase liquide***	***Mélange diphasique***
Inertie	$F_{I-G} = \frac{1}{2}\rho_G U_{GS}^2$		$F_{I-L} = \frac{1}{2}\rho_L U_{LS}^2$	$F_{I-M} = \frac{1}{2}\rho_M U_{MS}^2$
Tension superficielle		$F_\sigma = \frac{4\sigma}{D_h}$		
viscosité	$F_{v-G-paroi} = \frac{\mu_G U_{GS}}{D_h} S$ Si le gaz est mouillant	$F_{v-LG} = (\mu_L \frac{U_{LS} - U_I}{D_h} - \mu_G \frac{U_{GS} - U_I}{D_h})S$	$F_{v-L-paroi} = \frac{\mu_L U_{LS}}{D_h} S$ Si le liquide est mouillant	$F_{v-M-paroi} = \frac{\mu_M U_{MS}}{D_h}$ S
gravité	$F_{g-G} = \rho_G g V_G$	$F_{g-LG} = (\rho_L - \rho_G) g V_L$	$F_{g-L} = \rho_L g V_L$	$F_{g-M} = \rho_M g V_M$

Les nombres associés comparant ces différents effets sont donnés dans le Tableau (II. 2) ci-dessous.

Interaction entre effet physique	**Nombre adimensionnel**	**Formule**				**Nombre de confinement**
		Gaz	**Interaction entre phase**	**Liquide**	**Mélange**	
Inertie-Tension supeficielle	*We*	$We_{GS} = \frac{\rho_{GS} U_{GS}^2 D_h}{\sigma}$		$We_{LS} = \frac{\rho_L U_{LS}^2 D_h}{\sigma}$	$We_{LS} = \frac{\rho_L U_{LS}^2 D_h}{\sigma}$	$Co_{c,i} = \frac{1}{We}$
Gravité-tension superfielle	*Eo*	$Eo = \frac{g(\rho_L - \rho_G) D_h^2}{\sigma}$				$Co_{c,g} = \frac{1}{D_h}\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)}} = \frac{1}{\sqrt{Eo}}$
Viscosité-tension superficielle	*Ca*	$Ca = \frac{U_{GS}\mu_G}{\sigma}$	$C_{aI} = \frac{1}{\sigma}(\mu_L \frac{U_{LS} - U_I}{D_h} - \mu_G \frac{U_{GS} - U_I}{D_h})$	$Ca = \frac{U_{LS}\mu_L}{\sigma}$	$Ca = \frac{U_{MS}\mu_M}{\sigma}$	
Inertie-Viscosité	*Re*	$Re_G = \frac{\rho_G U_{GS} D_h}{\mu_G}$	$Re_I = \frac{(\rho_L U_{LS}^2 - \rho_{GS} U_{GS}^2) D_h}{\mu_L (U_{LS} - U_I) - \mu_G (U_{GS} - U_I)}$	$Re_L = \frac{\rho_L U_{LS} D_h}{\mu_L}$	$Re_M = \frac{\rho_M U_{MS} D_h}{\mu_M}$	$Co_{v,i} = \frac{1}{Re}$
Gravité-viscosité	*Je*	$Je_G = \frac{g\rho_L D_h^2}{\mu_G U_{GS}}$	$Je_G = \frac{g(\rho_L - \rho_G) D_h^2}{\mu_L (U_{LS} - U_I) - \mu_G (U_{GS} - U_I)}$	$Je_L = \frac{g\rho_L D_h^2}{\mu_L U_{LS}}$	$Je_M = \frac{g\rho_M D_h^2}{\mu_M U_{MS}}$	$Co_{gv} = \frac{1}{D_h}\sqrt{\frac{\mu U}{\rho g}} = \frac{1}{\sqrt{Je}}$
Inertie-gravité	*Fr*	$Fr_G = \frac{U_{GS}^2}{D_h g}$	$Fr_I = \frac{U_{LS}^2 - U_{GS}^2}{2 D_h g}$	$Fr_G = \frac{U_{LS}^2}{D_h g}$	$Fr_M = \sqrt{\frac{\rho_M}{(\rho_L - \rho_G)}} \frac{U_{MS}}{\sqrt{g D_h}}$	$Co_{g,i} = \frac{1}{Fr}$

We : Weber number, Eo : Eötvos number, Ca : Capillary number, Re : Reynolds number, Je : Jeffreys number et Fr: Froude number.

Comme nous venons de le remarquer, suivant la situation de l'écoulement diphasique, l'importance de ces effets peut différer notablement pour un même diamètre hydraulique. Par ailleurs une description plus fine de ces écoulements doit prendre en compte les nombres adimensionnels associés à chacune des phases.

Comme nous pouvons le constater la distinction de l'écoulement diphasique suivant le diamètre hydraulique demeure encore très sommaire. En effet si cette distinction n'est faite que par le diamètre hydraulique elle n'est pas suffisante. Celle proposée par les effets physiques n'a pas encore atteint une bonne maturité et nécessite davantage de développements.

Pour les écoulements monophasiques, la taille du canal n'affecte pas la nature des écoulements exceptés pour les gaz. En effet les glissements à la paroi apparaissent lorsque le diamètre hydraulique devient comparable au libre parcours moyen des molécules (Colin et al. 2002).

Pour les écoulements diphasiques la diminution du diamètre hydraulique conduit à une réduction des degrés de liberté de l'écoulement diphasique. Les mouvements transversaux seront notablement réduits.

II.3. Structures d'écoulements et paramètres influents

Dans ce paragraphe nous focalisons notre recherche bibliographique sur les écoulements gaz-liquide sans transfert de chaleur ni changement de phase. Nous analyserons les travaux relatifs aux cartes d'écoulements obtenues dans des conduites circulaires de diamètre allant de 1 mm à 6 mm.

De nombreuses structures ont été observées, c'est essentiellement dans la finesse de la description qu'elles diffèrent selon les auteurs. Dans la majorité des cas l'ensemble des auteurs identifient les mêmes structures, elles sont morphologiquement semblables dans les conduites à petite échelle comme à grand échelle (Kawaji and Chung, 2004) (Fig. II. 1).

Cependant la terminologie adoptée diffère d'un auteur à un autre. En effet, les appellations écoulement à poche (slug flow)(Galbiati et Andreini, 1994), écoulement de Taylor (Taylor flow) (Amador et al., 2004), écoulement à poche (Plug flow) (Damianides et Westwater, 1988) et écoulement à train de bulles (bubble train flow) (Thulasidas et al., 1997) se rapportent à la même structure. Il en est de même pour l'écoulement séparé (separated flow) (Fukano et Kariyasaki, 1993) et l'écoulement stratifié (stratified flow)(Colman et Garimella, 1999).

Inversement, il n'est pas rare que le même nom soit employé pour décrire des structures différentes. Par exemple, la terminologie d'écoulement à poche (slug flow) (Damianides et Westwater, 1988 ; Barajas and Panton, 1993) a été employée pour décrire l'écoulement de Taylor (Taylor flow) (Galbiati et Andreini, 1994 ; Triplett et al., 1999), ainsi que pour l'écoulement ondulé-annulaire (wavy-annular flow) (Yang et Shieh, 2001). En raison de ce manque d'uniformité de terminologie, il est devenu difficile d'obtenir un classement cohérent des structures observées par les différents auteurs.

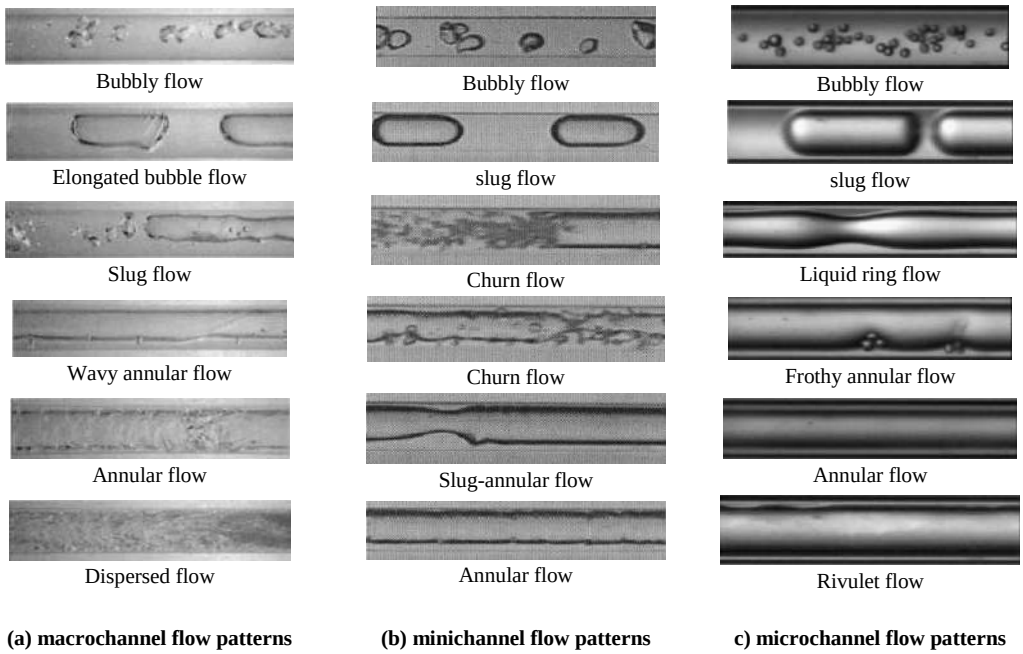


FIG.I I. 1 Comparaison des structures diphasiques en position horizontale (a) Structures en macrocanal ID: 5.5mm, Coleman and Garimella, 1999 (b) Structure en minicanal ID: 1.097mm, Triplett et al., 1999 and (c) Structures en microcanal ID: 100µm, Serizawa et al., 2002.

Certains auteurs comme Fukano et Kariyasaki (1993) utilisent la terminologie d'écoulement intermittent tandis que d'autres (Daminainides et Westwater, 1988) la dénomme plug et/ou slug et pseudo slug. Ces auteurs expliquent que ces structures d'écoulements peuvent apparaitre alternativement.

A des fins d'établissement d'un classement des structures d'écoulements, nous considérons tout d'abord les structures principales et structures secondaires qui correspondent aux transitions entre les structures principales. D'une manière générale on dénombre quatre structures principales : Bulle (Bubbly flow), poche (Plug or Slug flow), annulaire (Annular

flow), dispersé (Dispersed flow). Pour les écoulements diphasiques horizontaux, une cinquième structure apparait pour les grands diamètres de conduites structure d'écoulement stratifiée (stratified flow).

La structure à bulles correspond à un ensemble de bulles généralement distinctes de forme sphériques ou déformées suivant leurs tailles en écoulement dans une phase liquide continue. Suivant la taille des conduites, une ou plusieurs bulles peuvent occuper une portion de la section droite de la conduite.

La structure à « poche » ou « poche-bouchon » (Slug flow) apparait lorsque la bulle occupe toute la section droite de la conduite. Pour cette structure, le diamètre équivalent de la bulle est supérieur au diamètre de la section droite de la conduite. La bulle, confinée dans la direction transversale, s'allonge alors dans la direction axiale. Les bouchons de liquide séparent les poches de gaz tandis que, dépendant de la mouillabilité du canal, un film liquide s'intercale entre la paroi et la poche.

La structure annulaire est caractérisée par l'apparition de la phase gazeuse s'écoulant au cœur de la conduite entourée d'un film liquide en écoulement en contact avec la paroi. Suivant les forces de cisaillement à l'interface gaz-liquide, celle-ci peut être lisse ou ondulée.

La structure dispersée est représentée par une phase continue gazeuse occupant toute la section droite du tube dans laquelle sont entrainées de fines gouttelettes de liquide à des vitesses apparentes du gaz et du liquide très élevées.

La structure stratifiée apparait dans des conduites horizontale pour des conduites de grandes tailles et à des faibles vitesses apparentes du liquide. La phase gazeuse se retrouve dans la partie supérieure de la conduite et la phase liquide occupe la partie inférieure de la conduite. Les deux phases sont séparées par une interface continue lisse ou ondulée.

Les structures secondaires apparaissent lors des transitions d'une structure principale à une autre. Il s'agit des structures bulle-poche (bubbly-slug), poche-annulaire (Slug-annular), annulaire-dispersée et bulle-dispersée.

La structure bulle-poche (bubbly-slug) se manifeste par l'apparition successive de bulles et de poches. Ces poches résultent soit de la coalescence des bulles ou de la formation de poches à l'entrée de la conduite.

La structure de transition poche-annulaire (Slug-annular) se produit de la même façon que la transition bulle-poche. Il y a soit une formation de poches qui peuvent ou non coalescer

soit une formation successive de poches suivi d'une structure annulaire dès l'entrée de la conduite.

La structure annulaire-dispersée apparait à des vitesses élevées des phases liquide et gaz. Les gouttelettes se forment par arrachement de liquide à l'interface gaz-liquide.

La structure bulle-dispersée a lieu à vitesse de liquide élevée, en augmentant la vitesse du gaz. La structure à bulle peut transiter vers une structure dispersée. La phase gazeuse se présentant sous forme de bulle devient une phase continue et inversement pour la phase liquide qui se présente sous forme dispersée.

II. 3. 1 Les cartes d'écoulements dimensionnelles

Inventaire des travaux expérimentaux :

Les études réalisées par de nombreux auteurs ont conduit à l'établissement de plusieurs cartes de structures d'écoulements en utilisant comme coordonnées les vitesses apparentes du gaz U_{GS} et du liquide U_{LS}.

Les premières cartes dimensionnelles en macro-conduites ont été proposées par Baker (1954) ; Hewitt et Roberts (1969). Les cartes des structures d'écoulements ont été établies à partir d'observations à l'œil nu ou par camera. Des modèles théoriques ont également été proposés (Taitel et Dukler, 1976 ; Weisman et al., 1979).

Depuis de nombreux travaux ont été effectués sur les écoulements diphasiques adiabatiques gaz-liquide pour des tubes circulaires de faibles diamètres (Barnea et al., 1983 ; Damianides et Westwater , 1988 ; Kariyasaki et al., 1992 ; Fukano et Kariyasaki, 1993 ; Triplett et al., 1999 ; Wölk et al., 2000 ; Yang et Shieh 2001 ; Chen et al., 2002 ; Kawahara et al., 2002 ; Serizawa et al., 2002 ; Chung et Kawaji, 2004 ; Ide et al., 2007 ; Saisorn et Wongwises, 2008, 2009 et 2010). Ces auteurs ont établi des cartes d'écoulements pour différentes conditions opératoires (vitesses apparentes des phases gaz et liquide), diamètres des conduites et l'orientation du canal vis-à-vis de la gravité.

Le Tableau II. 3 regroupe et synthétise l'ensemble des travaux réalisés sur les cartes d'écoulement dimensionnelles pour des mini et micro-conduites circulaires en écoulement gaz-liquide adiabatique et sur l'influence du diamètre sur les structures, respectivement. Nous avons reporté sur ce tableau les auteurs, l'année des travaux, les conditions d'introduction des phases à l'entrée du canal, l'orientation de l'écoulement diphasique vis-à-vis de la gravité, les fluides utilisés, les conditions opératoires, le diamètre du canal, la nature des canaux utilisés, les gammes des vitesses apparentes des phases et les structures observées

Tableau II. 3 : Inventaire des travaux expérimentaux sur les cartes dimensionnelles et les caractéristiques d'écoulements diphasiques adiabatique gaz/liquide dans des conduites circulaires à faible diamètre allant 0.02mm à 6mm en positions horizontale, verticale ascendant et descendant :

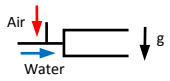
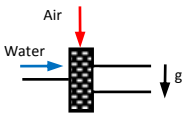
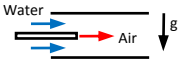
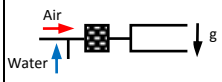
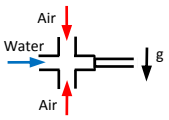
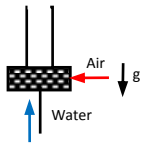
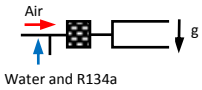
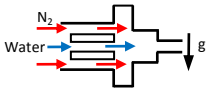
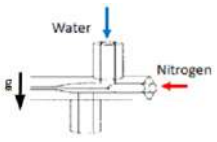
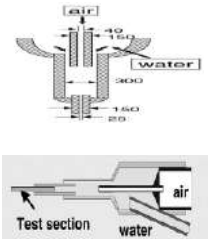
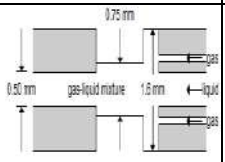
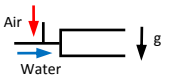
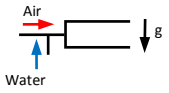
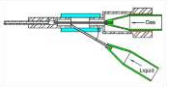
Auteurs	Schéma descriptif conditions d'entrée	Section d'essai	Structures d'écoulements
Damianides and Westwater, 1988		H, co-current, Pyrex glass, circular, d = 1 à 5mm, U_{GS} = 0.015–125.3 m/s; U_{LS} = 0.0024–5.72 m/s	Bubbly, dispersed, Taylor (elongated bubble/plug flow and slug flow), Taylor–annular (wavy–annular), churn (slug), wavy, annular
Fukano and Kariyasaki, 1993		H, V upward, V Downward, circular Acrylic glass, d = 1, 2.4, 4.9 et 26mm; U_{GS} = 0.1–30 m/s; U_{LS} = 0.02–2 m/s.	Bubbly, intermittent, annular
Mishima et al., 1996		V, Pyrex glass and Al, circular, d = 1–4mm; U_{GS} = 0.1–50m/s; U_{LS} = 0.02–2m/s; air nozzle OD 0.5mm	Bubbly, Taylor,churn, annular and dispersed (annular mist)
Coleman et Garimella, 1999		H, co-current, Pyrex glass, circular and rectangular, d_h = 1.3, 1.75, 2.6, 5.5mm; U_{GS} = 0.1–100 m/s; U_{LS} = 0.01–10 m/s	Bubbly, dispersed,Taylor (elongated bubble/plug flow and slug flow), Taylor–annular (wavy–annular), churn (slug), wavy, annular
Triplett et al., 1999		H, circular, d = 1.1 and 1.45 mm (Pyrex); semi- triangular, d_h = 1.09 (acrylic) and 1.49 mm (polycarbonated rod); U_{GS} = 0.02–80 m/s; U_{LS} = 0.02–8 m/s	Similar for all the test sections. Bubbly, churn, Taylor (slug), Taylor–annular (slug–annular), annular
Wölk et al., 2000		VU, Circular, d = 5.9mm; U_{GS} = 0.15–5m/s; U_{LS} = 0.36–4m/s.	Dispersed bubble to slug flow, from dispersed bubble to churn flow and from slug to churn flow
Yang and Shieh, 2001		H, Pyrex glass, circular, d = 1 to 3 mm; U_{GS} = 0.016–91.5m/s; U_{LS} = 0.006–2.1m/s	Bubbly, Taylor (plug), wavy stratified, wavy–annular (slug), dispersed, annular
Kawahara et al., 2002		H, fused silica circular, d = 100 µm; U_{GS} = 0.1–60 m/s; U_{LS} = 0.02–4m/s; T-junction inlet design	Taylor and Taylor–annular flow (gas core flows with a smooth or ring-shaped film and a serpentine-like gas core surrounded by a deformed liquid film)
Chen et al., 2002		H and V, glass circular, d = 1 and 1.5mm; U_{GS} = 0.502–11 m/s; U_{LS} = 0.399–3.53 m/s; Needle injection for gas	Bubbly, Taylor (slug and bubble–train slug), churn, annular

Tableau II. 3 (suite)

Auteurs	Schéma descriptif conditions d'entrée	Section d'essai	Structures d'écoulements
Serizawa et al., 2002		H, Silica or quartz capillary, circular, d = 20, 25 and 100 µm for air and 50 µm for steam; U_{GS} = 0.0022–295.3 m/s; U_{LS} = 0.0032–17.5 m/s; two designs of inlet mixing zone.	Bubbly, Taylor(slug), Taylor–annular (liquid ring, frothy annular), churn (liquid lump),annular (liquid droplet flow or annular-mist, rivulet)
Chung and Kawaji, 2004	 Nitrogen/Water	H, circular, d = 530, 250, 100 and 50µm; U_{GS} = 0.02–72.98 m/s; U_{LS} = 0.01–5.77 m/s; gas–liquid mixer as inlet	For 530 and 250µm, bubbly, Taylor (slug), churn, Taylor–annular (slug–annular) and annular
Ide et al., 2007		VU, H, VD, circular, d = 1, 2.4 et 4.9mm ; U_{GS} = 0.1 – 30m/s ; U_{LS} = 0.03 – 2.3m/s, gas–liquid mixer as inlet.	Separated, Slug, Slug-Annular, Annular
Lee and Lee, 2008		H, circular, glass (d = 1.46mm and 1.8mm; U_{GS} = 0.5–50 m/s; U_{LS} = 0.004–0.4 m/s); Teflon (d = 1.59mm; U_{GS} = 0.4–47 m/s; U_{LS} = 0.02–0.8 m/s); polyurethane (d = 2mm; U_{GS} = 0.3–53 m/s; U_{LS} = 0.007–0.4 m/s); gas–liquid mixer before the testing channel	Taylor (plug), Taylor–annular (slug), annular (annular for wet condition and rivulet for dry condition), stratified(wavy)
Shao et al., 2008a	T-junction,Y-junction and two cross flow layouts made in PEEK, with hole sizes of 0.5mm, 1mm and 1.25mm.	H, circular, Polyphenylsulfone (d = 0.5mm and 0.75mm; U_{GS} = 0.1–17 m/s; U_{LS} = 0.07–4.2 m/s).	bubbly, Slug, Slug-annular, churn and annular.
Saisorn et Wongwises, 2008, 2009 et 2010		H, circular, glass (d = 0.15mm, 0.22mm and 0.53mm; U_{GS} = –m/s; U_{LS} =–m/s);	

H, V : Horizontal et vertical : Test tube : Mixing chamber : Calming chamber : T and Y junction

La revue bibliographique montre que la plus grande partie des cartes de structures d'écoulements gaz-liquide construites en conditions adiabatiques, sont réalisées pour des écoulements dans des tubes en position horizontale.

Peu de travaux existent sur les cartes d'écoulement en position verticale ascendante aussi bien en macro-conduite (Zubir and Zainon, 2011 ; Jones. Jr. O. C and N. Zuber, 1975) qu'en micro-conduite (Barnea et al., 1983 ; Kariyasaki et al., 1992 ; Fukano et Kariyasaki, 1993 ; Wölk et al., 2000 ; Ide et al., 2007). Les gammes de vitesses apparentes du gaz et du liquide qui couvrent l'ensemble des investigations expérimentales réalisées, par les différents

auteurs, se situent dans un intervalle allant de 2.2 x 10^{-3} m/s à 295.3 m/s pour la phase gazeuse et de 3.2 x 10^{-3} m/s à 17.5 m/s, pour la phase liquide.

Il est important de noter que différentes configurations géométriques ont été utilisées pour réaliser le mélange gaz-liquide. Certains auteurs mélangent les phases liquide et gazeuse dans une chambre avant l'introduction dans la conduite (Fukano and Kariyasaki 1993 ; Triplett et al., 1999 ; Serizawa et al., 2002), d'autres utilisent une chambre de détente pour le liquide avant de le mélanger avec la phase gazeuse (Chen et al., 2002). Cette chambre de mélange est parfois instrumentée d'un milieu poreux pour intensifier le mélange (Zhao and Bi 2001). D'autres auteurs utilisent des jonctions en T ou en Y soit pour déboucher dans une chambre de mélange ou directement dans le tube de test (Saisorn et al., 2008, Shao et al. 2008a). Certains auteurs réalisent le contact entre phases dans le tube de test en amenant la phase gazeuse par une aiguille d'injection au centre du canal et la phase liquide en écoulement annulaire à l'aiguille (Chen et al., 2002 ; Amador et al 2004). Comme les conditions d'entrée influencent notablement la formation des structures d'écoulements diphasiques dans les canaux, les différences observées sur les cartes d'écoulements entre les auteurs peuvent également provenir de cet effet. Nous analyserons ce point dans le paragraphe suivant.

L'écoulement gaz-liquide dans un canal horizontal de petite taille a été étudié pour la première fois par Suo et Griffith (1964). Ces auteurs ont déterminé les frontières entre les structures d'écoulements diphasiques dans une conduite de 1.59 mm de diamètre intérieur et les zones correspondant aux structures d'écoulement : bulle, poche et annulaire.

Cartes d'écoulement :

D'une manière générale, les structures d'écoulements sont répertoriées sur la représentation schématique de la figure (II.2). Ces zones sont conditionnées par les effets physiques gouvernant ces structures. Le passage d'une structure à une autre se produit de façon progressive caractéristique d'une zone de transition.

En absence de gravité, la structure à bulle est observée pour des vitesses apparentes de liquide élevées et de gaz faibles. La qualité du mélange est faible, la phase continue est le liquide. La taille des bulles est générée par la compétition entre les forces de cisaillement et de tension superficielle. La diminution des forces de cisaillement par la réduction de la vitesse de la phase liquide entraine des bulles de tailles de plus en plus grandes jusqu'à l'obtention d'une structure à poche. En partant de cette structure, pour une vitesse de liquide constante, l'augmentation de la vitesse du gaz engendre une force d'inertie de la phase gazeuse de plus

en plus importante. Lorsqu'elle devient prépondérante devant la force de tension superficielle, la structure à poche transite vers une structure annulaire.

Dans cette situation une augmentation de la vitesse du liquide à vitesse du gaz fixée, la structure d'écoulement, où les deux phases initialement continues séparées par une interface, transite vers une structure dispersée. La phase liquide se présente sous forme de gouttelettes tandis que la phase gazeuse est sous forme continue. Ces gouttelettes apparaissent par cisaillement à l'interface gaz-liquide. A grandes vitesses des phases du liquide et du gaz, l'interface se déforme et la force de cisaillement arrache le liquide sous forme de fines gouttelettes.

En partant de la structure à bulle, l'augmentation de la vitesse de la phase gazeuse à vitesse de liquide fixée peut engendrer deux types de transitions. A vitesse de liquide modérée, la structure à bulle transite vers une structure à poche puis une structure annulaire.

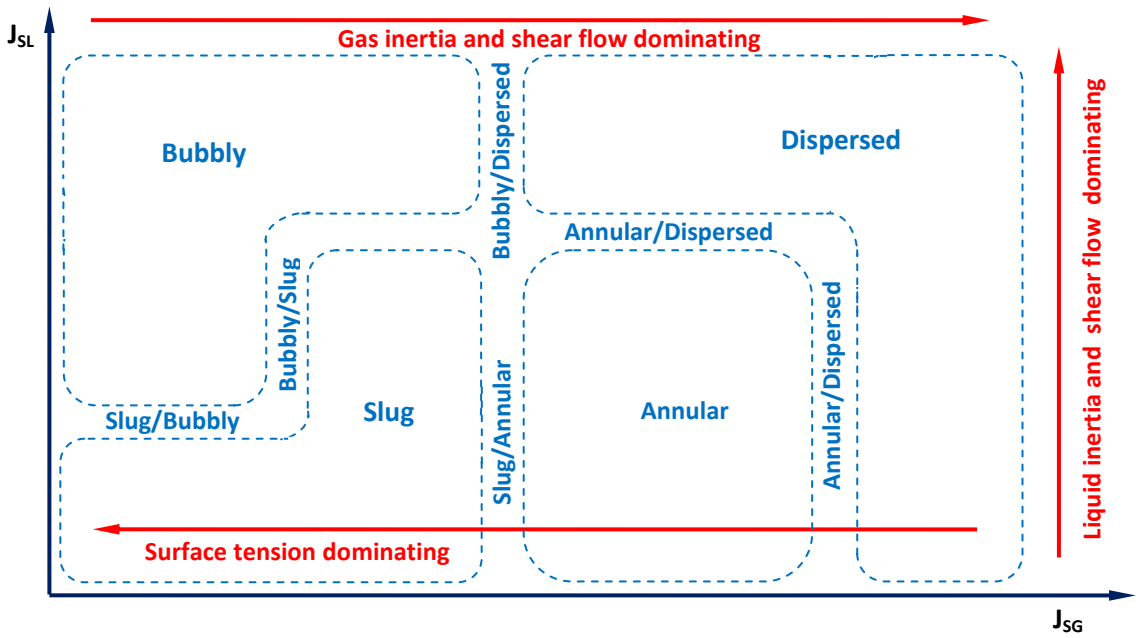


FIG. II. 2. Représentation schématique de la carte des structures d'écoulements diphasiques gaz-liquide.

A vitesse de liquide élevée et avec l'augmentation de la vitesse de l'air, la structure à bulle peut transiter vers une structure dispersée. La phase gazeuse se présentant sous forme de bulle devient une phase continue et inversement pour la phase liquide qui se présente sous forme dispersée. Cette transition se caractérise par un changement profond de l'écoulement diphasique. Il y a une inversion radicale de la topologie des interfaces. Les phénomènes

physiques lors de cette inversion de structures sont peu connus. Damianides et Westwater (1988) ont réalisé des observations lors de cette transition. Elle a lieu lorsque les deux phases sont en écoulement turbulent avec une augmentation significative de la densité de bulles. Les interfaces gaz-liquide ainsi générées donnent lieu à une phase dispersée liquide en écoulement dans une phase continue gazeuse.

En se basant sur l'importance relative entre les forces de tension superficielle vis-à-vis des forces d'inertie, et de frottement interfacial, quatre structures d'écoulements globales sont identifiées : les structures dominées par la tension superficielle (surface tension flow pattern dominated), structures dominées les forces d'inertie et de viscosités de la phase liquide (liquid inertia and shear flow pattern dominated), celles dominées par les forces d'inertie de la phase gazeuse (gas inertia and shear flow patterns dominated).

En présence de gravité la carte d'écoulement peut être modifiée avec l'apparition de nouvelles structures comme la stratification de l'écoulement diphasique pour les écoulements horizontaux, la persistance de la structure à bulles dispersées pour les écoulements diphasiques verticaux ascendants.

Influence des paramètres sur les structures d'écoulement diphasiques

Le mélange entre phase, leur dynamiques de contact, et l'influence sur les cartes de structure d'écoulements diphasique est un sujet très complexe et jusqu'à présent n'est pas bien assimiler. L'orientation de l'écoulement vis-à-vis de la gravité, la taille du canal, la géométrie du canal (circulaire, rectangulaire, triangulaire,…etc.), les propriétés de la paroi (mouillage de la paroi de la conduite, rugosité), propriétés physiques et interfaciales des fluides gaz/liquide et les conditions d'entrée ont été identifiés par plusieurs auteurs lors des études antérieures comme étant les principaux paramètres influant sur les structures d'écoulements diphasiques (Shao et al., 2009). La Figure (II.3) regroupe de façon schématique l'ensemble des paramètres influant sur les structures d'écoulements diphasiques en conduite circulaire à faible diamètre en condition adiabatique. Ce diagramme est divisé en trois facteurs principaux : (1) les facteurs géométriques (taille et géométrie du canal, propriétés du canal, conditions d'entrée qui se résume sur la géométrie de la configuration de mélange avec les prises d'alimentation du gaz et du liquide) ; (2) les conditions opératoires (débit du gaz et du liquide, orientation de l'écoulement vis-à-vis de la gravité) ; (3) les propriétés physiques du gaz et du liquide et interfaciales. En complément sont mentionnés le nombre de travaux publiés par les différents auteurs pour chaque paramètre.

Tous les travaux actualisés sur chaque paramètre sont regroupés et répertoriés séparément dans le tableau récapitulatif (II. 4). Nous avons reporté sur ce tableau les auteurs, l'année des travaux réalisés relatifs de chaque paramètre, les paramètres, identifiés par les auteurs, influençant les structures d'écoulement.

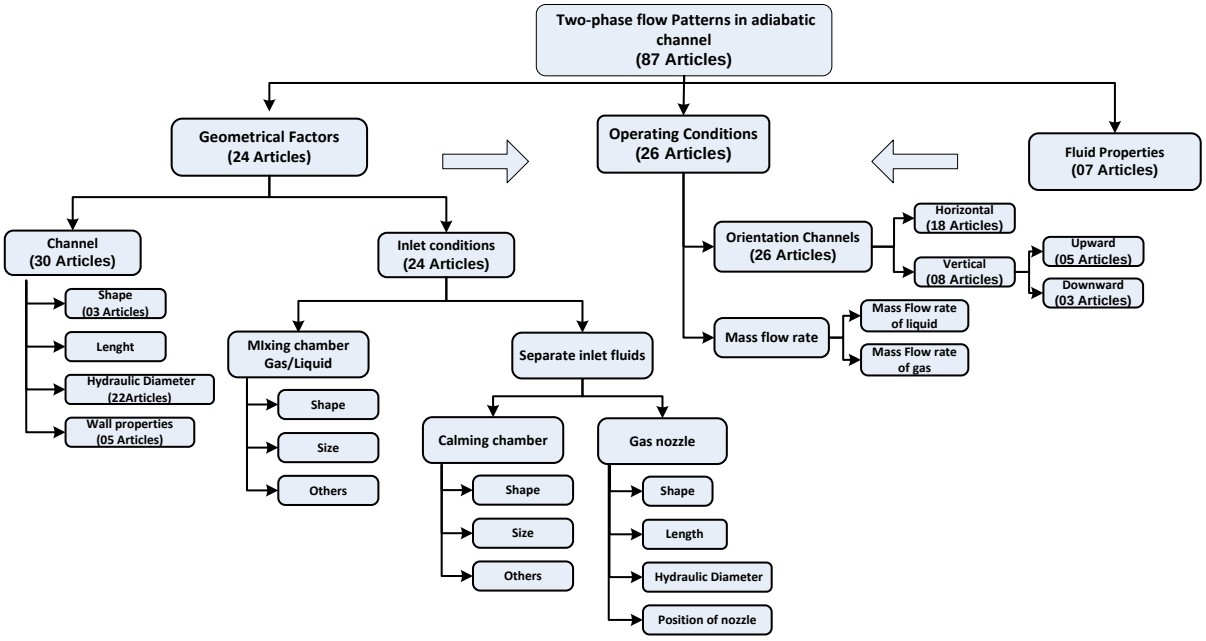


FIG. II. 3 Facteurs influant sur les structures d'écoulements diphasiques dans un canal circulaire en condition adiabatique.

L'influence de certains paramètres ne seront pas analysés dans cette revue, géométrie de la conduite (nous considérons que le cas circulaire), les propriétés de surface de la paroi de la conduite, des fluides de travail du gaz et du liquide et de la tension superficielle. Tous les autres paramètres seront analysés séparément afin de vérifier ceux qui ont la plus grande influence sur la formation des structures d'écoulements et les lignes de transitions.

Cette partie sera focalisée sur les travaux portant sur les cartes de structures d'écoulement dimensionnelles et adimensionnelles établies par plusieurs auteurs dans une gamme de diamètre de tube de test allant de 0.050mm à 6mm en position horizontale et verticale ascendante. Nous procèderons en premier lieu à une analyse distincte de ces cartes en se basant sur l'influence du diamètre de la conduite, de l'orientation de l'écoulement vis-à-vis de la gravité selon les auteurs. L'influence des conditions d'entrée sur les structures d'écoulements sera abordée dans un paragraphe dédié.

Nous comparons les cartes établies par plusieurs auteurs dans des conditions semblables afin de noter les points communs et les différences entre les cartes proposées par tous les auteurs. Nous achèverons cette partie par une synthèse qui compare tous ces résultats sur les cartes de structures d'écoulements diphasiques dimensionnelles et adimensionnelles. Les transitions des structures d'écoulements diphasiques observées par différents auteurs et comportement de ces lignes de transitions en passant d'une carte dimensionnelle (U_{GS}, U_{LS}) vers une carte adimensionnelle (We_{GS}, We_{LS}) seront examinées ultérieurement.

Comme nous l'avions mentionné précédemment, la majorité des travaux ont été réalisés en position horizontale. Nous passons donc en revue l'ensemble de ces travaux où a été effectuée l'influence du diamètre de la conduite. Nous poursuivrons la suite par une revue des travaux en position verticale ascendante.

Ecoulement diphasique horizontal

Conduite verticale $d \geq 1$ mm

Les cartes de structures d'écoulements diphasiques air-eau en position horizontale pour des conduites circulaires en verre de diamètre allant de 1 mm à 5.5 mm établies par Damianides et Westwater 1988, Barajas et Panton 1993, Colman et Garimella 1999, Triplett et al. 1999, Yang et Shieh 2001 sont regroupées sur la figure (II.4).

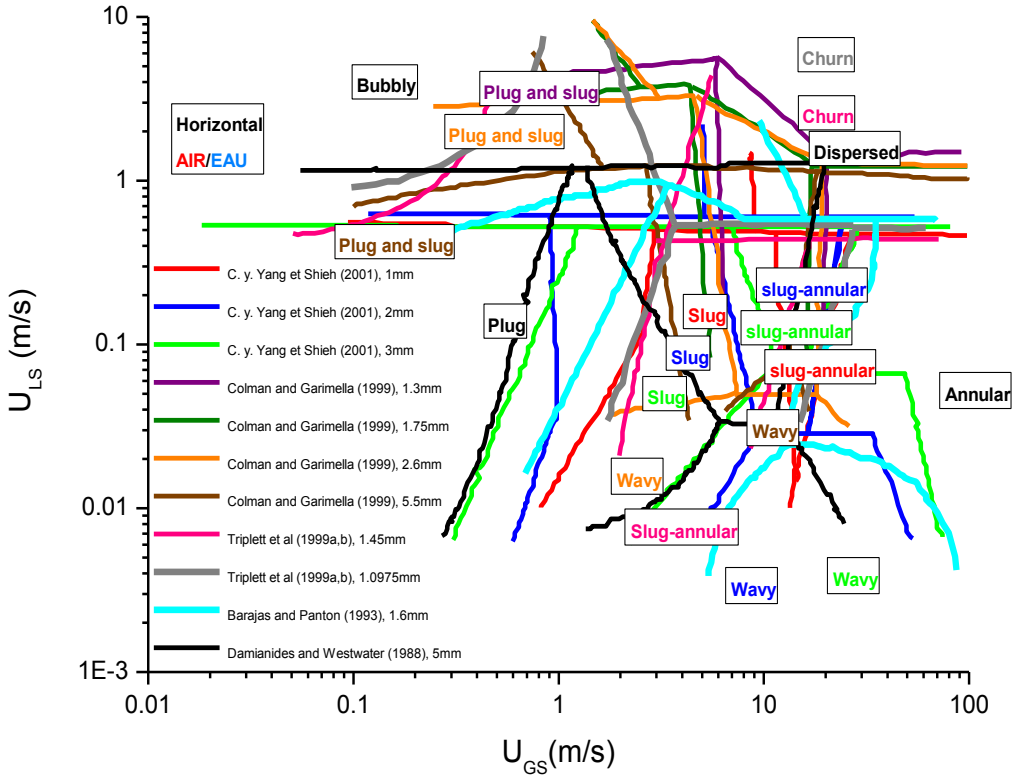


FIG. II. 4 Cartes de structures d'écoulements air/eau adiabatiques dans des conduites circulaires à faible diamètre de position horizontale (1mm ≤ d ≤ 5.5mm) obtenues par différents auteurs.

Toutes les cartes présentent la même allure avec dans l'ensemble les mêmes structures d'écoulements diphasiques : bulle, bulle/poche, poche, poche/annulaire, annulaire, annulaire ondulé et stratifié. Néanmoins, les zones de transition diffèrent notablement selon le diamètre de la conduite pour un même auteur et d'un auteur à un autre pour un même diamètre. Quand la taille du tube diminue, l'aire de la zone relative à la structure d'écoulement stratifié sur les cartes diminue, jusqu'à ce qu'elle disparaisse complètement pour le tube de 1mm.

L'enchevêtrement entre les différentes cartes ne permet pas d'analyser ces résultats. Pour des raisons de clarté, nous analyserons distinctement l'influence du diamètre selon les auteurs.

Influence du diamètre de la conduite :

Damianides et Westwater (1988) ont étudié l'influence du diamètre de la conduite sur les structures d'écoulements gaz-liquide et sur leurs frontières de transition (Fig. II. 5). Pour les diamètres de conduite allant de 1 à 3 mm, les transitions de poche à bulle et annulaire à dispersé se situent approximativement pour la même vitesse apparente du liquide. Il en est de même pour les diamètres de 4 et 5 mm. Pour ces deux groupes de diamètres, la vitesse de transition du liquide est plus petite pour les diamètres de 1,2 et 3 mm. Les lignes de transition pour les structures bulle-dispersé et celles de transition bulle-poche et poche-annulaire se décalent dans le sens croissant des vitesses apparentes du gaz.

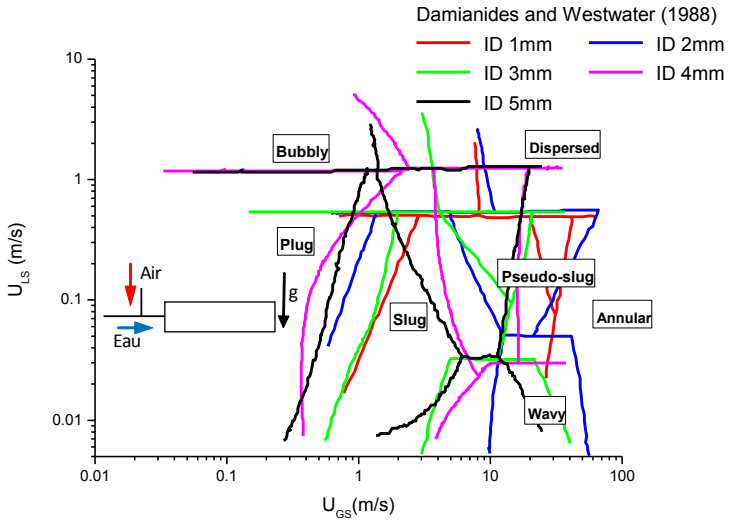


FIG. II. 5 Cartes de structures d'écoulements air/eau adiabatiques dans des conduites circulaires à faible diamètre en position horizontale (1mm ≤ d ≤ 5mm), Damianides et Westwater, 1988.

Coleman et Garimella (1999) ont également étudié l'influence du diamètre sur les structures d'écoulements pour des diamètres de conduites allant de 1.3 à 5.5mm dans des conditions opératoires semblables à celles de Daminades et Westwater (1988) (Fig. I. 6). Ces auteurs ont mis en évidence une influence sensiblement analogue du diamètre pour la transition annulaire-dispersé. Par contre pour les autres transitions, l'influence du diamètre présente des comportements différents. En particulier, l'influence du diamètre a un comportement contradictoire pour la transition bulle-poche. Pour Coleman et Garimella (1999), la ligne de transition poche-bulle se décale à des vitesses de la phase liquide plus élevées lorsque le diamètre de la conduite diminue. Damianides

et Westwater (1988) obtiennent un résultat opposé. La ligne de transition se décale pour des vitesses de liquide plus élevées en augmentant le diamètre de la conduite.

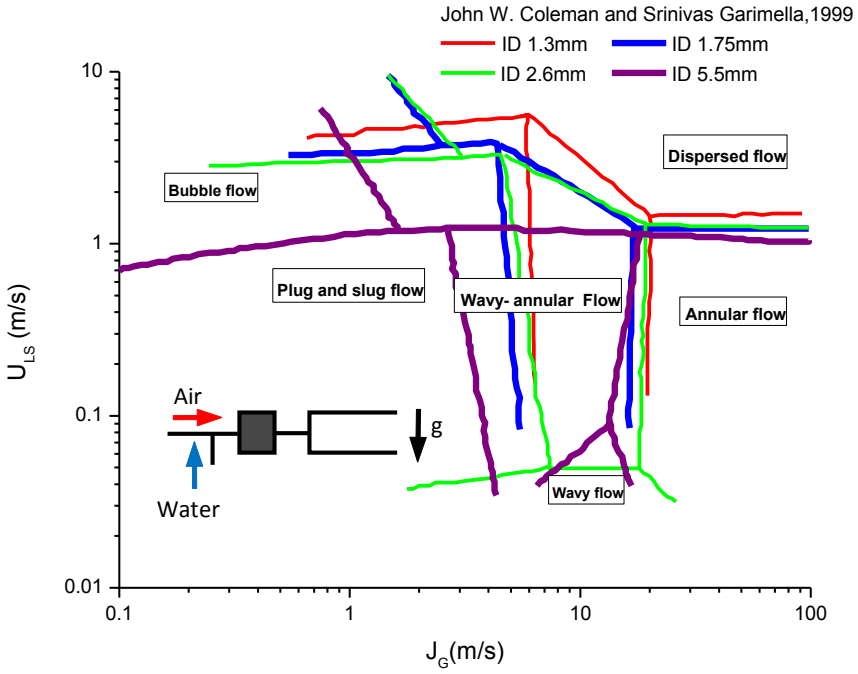


FIG. II. 6 Cartes de structures d'écoulements air/eau adiabatiques dans des conduites circulaire à faible diamètre en position horizontale (1.3mm ≤ d ≤ 5.5mm), Coleman et Garimella, 1999.

Ces différences de comportements peuvent s'expliquer par les conditions opératoires et les propriétés des fluides et des matériaux différentes suivant les auteurs. Tous les auteurs considérés dans ce paragraphe utilisent le couple air-eau et des conduites circulaires en verre de pyrex. Ces paramètres sont donc semblables pour toutes ces expériences. En revanche, les conditions d'entrées de phases gazeuse et liquide dans le tube de test sont différentes suivant les auteurs (voir Tableau II. 3).

A présent, nous comparons les cartes établies dans des conditions expérimentales semblables. Une analyse comparative entre les cartes de Damianides et Westwater (1988) pour un diamètre de 1mm et 3mm avec celles de Yang et Shieh (2001) (ID : 1mm et 3mm) et de Fukano et Kariyasaki (1993) pour un diamètre de 1mm, a révélé des comportements semblables pour certaines transitions et différents pour d'autres (Fig. II. 7).

Sur les cartes de Damianides et Westwater (1988) et celles de Yang et Shieh (2001), les lignes de transition bulle-poche, annulaire-dispersé et bulle-dispersé sont quasiment analogues pour les deux auteurs (Figs. II. 7a, 7b).

En revanche, ces auteurs mentionnent des lignes de transition entre le régime à plug et slug et poche-annulaire. Ces lignes de transition diffèrent selon les auteurs essentiellement par leur décalage dans le sens des vitesses apparentes croissantes du gaz. L'augmentation du confinement due à la diminution du diamètre, engendre des lignes de transitions qui se décalent vers les plus grandes vitesses de la phase gazeuse. Les lignes de transition bulle-poche ne sont pas influencées par la modification du diamètre du tube dans la gamme 1 à 3 mm. Pour des diamètres supérieurs, les lignes de transition bulle-poche se décalent vers des vitesses apparentes du gaz plus élevées.

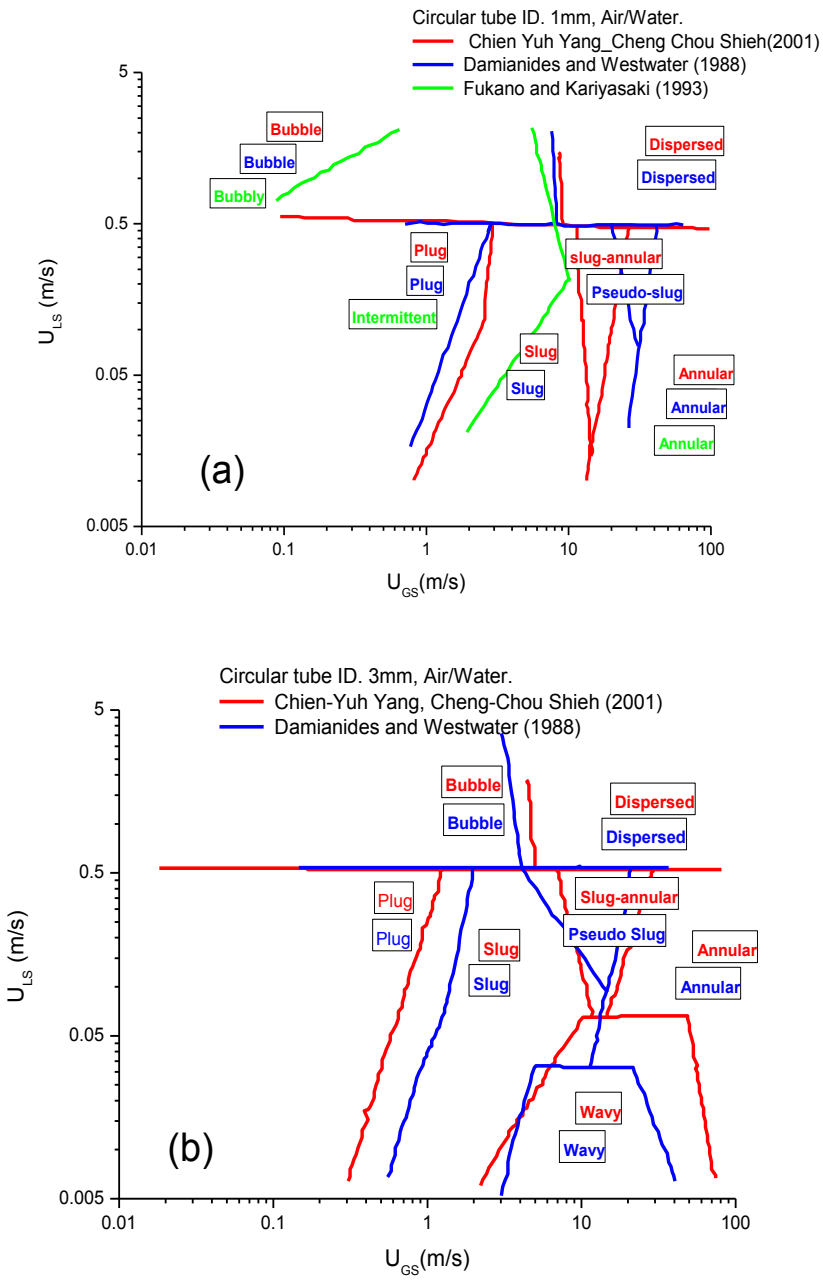


FIG. II. 7 Comparaison entre les cartes structures d'écoulements adiabatiques air/eau (Damianides et Westwater, 1988 ; Fukano et Kariyasaki 1993 ; Yang et Sieh 2001) pour des conduites circulaires horizontales à faible diamètre.

Fukano et Kariyasaki (1993) ont mis en évidence des lignes de transition différentes entre les structures d'écoulement et n'observent pas de structure dispersée. Ceci est sans doute du aux gammes de vitesses apparentes investiguées. Ces auteurs n'excédent pas des vitesses supérieures à 30 m/s pour l'air et 2 m/s pour l'eau. Par ailleurs, ces auteurs

mentionnent des structures intermittentes dans les zones qualifiées, de type plug, slug et transition slug-annular, par Damianides et Westwater. Ces derniers attribuent également à ces structures des comportements intermittents.

CHAPITRE III. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Chapitre III. Dispositif expérimental

III. 1 Introduction

Les travaux expérimentaux en microfluidique diphasique ou polyphasique durant ces dernières décennies ont connus un essor important, mais les outils de mesure utilisés été rudimentaires (Colin et al., 2002). Maîtriser les débits peut sembler élémentaire avec des systèmes d'écoulements monophasiques macroscopiques, mais c'est loin d'être aussi évident pour des systèmes d'écoulements diphasiques, lorsque les débits sont très faibles. Aussi, le rôle de l'expérience apparaît prépondérant, et le besoin de disposer de données fiables et précises n'est pas actuellement satisfait, même pour les systèmes de base classique qui sont celles des écoulements diphasiques en macro conduites.

Le manque de précision sur les données expérimentaux est dû à plusieurs sources d'erreurs ou d'incertitudes et qui peuvent être réparties en trois classes : les incertitudes inhérentes aux propriétés du fluide (masse volumique, viscosité, humidité pour le gaz ou quantité de l'air dissous dans le liquide, …) et à leur dépendance vis-à-vis des paramètres d'expérience (pression, température) ; les incertitudes relatives aux dimensions géométriques du canal (dimension des sections, état de surface, …) et les incertitudes liées à la mesure de débit (métrologie de mesure, fuites, conditions opératoires, …).

Un bilan global de ces incertitudes est généralement difficile à mener. Il convient pour le moins d'identifier celles dont le rôle est prépondérant.

Sur les dispositifs expérimentaux conçus antérieurement par plusieurs expérimentateurs, durant le déroulement des expériences il apparait souvent un phénomène de perte de débit du liquide à l'entrée du tube de test. Celles-ci sont détectés à partir des données de débit mesurées par différentes techniques (débitmètre indicateur de débit, ou par la méthode de la pesée,…..etc). Ces pertes s'intensifient au fur et à mesure que le débit du gaz augmente. Elles sont dues à la prédominance progressive de la pression du gaz vis-à-vis de la pression du liquide à l'entrée de la conduite au niveau de la zone de mélange. Ceci va engendrer une pression de retour dans le circuit du liquide, qui va produire des instabilités sur le régime d'écoulements de la phase liquide. En conséquence, ces variations engendrent l'apparition de

plusieurs structures diphasiques intermittentes sous des conditions opératoires identiques (Damianides et Westwater 1988, Fukano and Kariyasaki 1993).

Alors dans le but d'éliminer ces instabilités et de réduire les erreurs de mesures, nous avons conçu un dispositif expérimental en vue de réaliser un écoulement diphasique gaz-liquide avec des conditions d'entrée et de débits parfaitement contrôlées.

III. 2 Principe de l'expérience

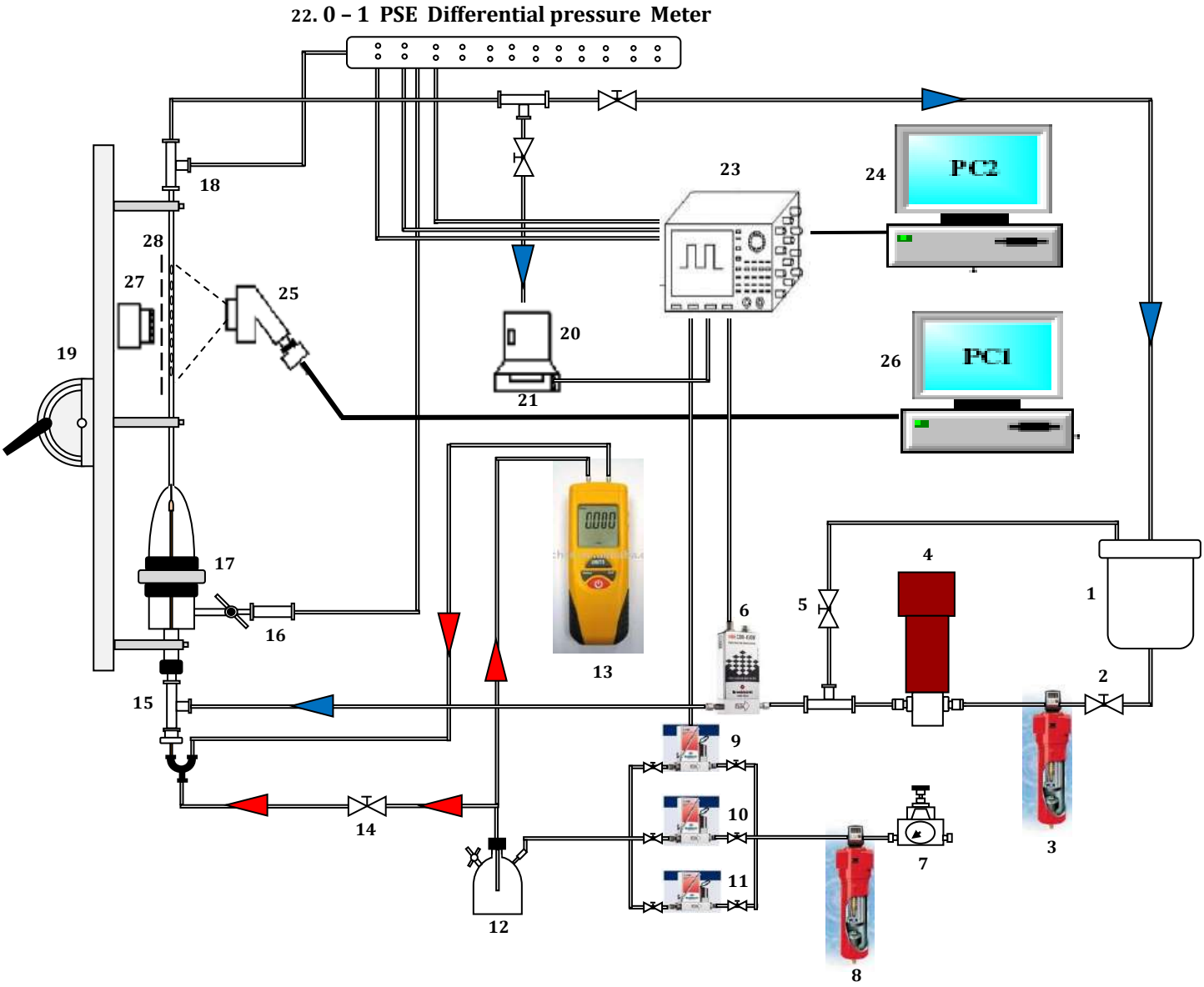
Le principe de l'expérience consiste à créer un écoulement diphasique gaz-liquide dans une conduite où les vitesses apparentes des phases sont parfaitement contrôlées.

Comme nous l'avons rappelé précédemment, il existe plusieurs manières d'introduire le mélange diphasique. Pour des raisons de simplicité et de meilleur contrôle des phénomènes physiques, nous choisissons de créer le mélange diphasique de façon parfaitement contrôlé. Pour cela nous mettons en contact la phase gazeuse avec la phase liquide à l'entrée de la conduite grâce à un système d'injection air/eau conçu au laboratoire, le gaz est amené par une aiguille dans l'axe de la conduite et la phase du liquide en écoulement annulaire.

Concevoir un dispositif capable de faire piloter la camera rapide afin de visualiser ces structures d'écoulements gaz-liquide en tout point de la conduite de test. Etudier les caractéristiques de cet écoulement le long d'un canal de petit diamètre hydraulique (0.8 mm $\leq$ $D_h \leq$ 3 mm) sous des conditions opératoires parfaitement maîtrisées. Par conséquence, cela va nous permettre d'analyser l'influence des paramètres géométriques et opératoires sur les structures d'écoulement diphasiques et leurs lignes de transition.

III. 3 Description du dispositif expérimental

Le dispositif est une boucle fluide dans laquelle est insérée la conduite d'étude. Cette boucle permet de véhiculer les fluides vers l'entrée de la veine d'essai et de les récupérer en sortie dans un réservoir tampon pour les séparer à nouveau afin de réaliser un écoulement diphasique permanent. Cette boucle est composée de plusieurs éléments pour assurer le contrôle de l'écoulement des phases liquide et gaz (Fig. III. 1).



1. Water tank and separator
2. Valve
3. Water filter
4. Pump
5. By pass valve
6. Water controller flowmeter
7. Pressure reducer valve
8. Air filter
9. 10. 11 Air controller flowmeters
12. Separator
13. Manometer (air pressure Pa_1)
14. Valve
15. Air/water injector system
16. Sensor pressure P_1
17. Calming chamber
18. Sensor pressure P_2
19. Rotating system
20. Container
21. Electrical balance
22. 0 – 1 PSE différential pressure
23. Data acquisition
24. PC2
25. Speed camera at high resolution
26. PC1
27. Light source
28. Diaphragm

Schéma de principe du dispositif expérimental (Sketch of the experimental set up).

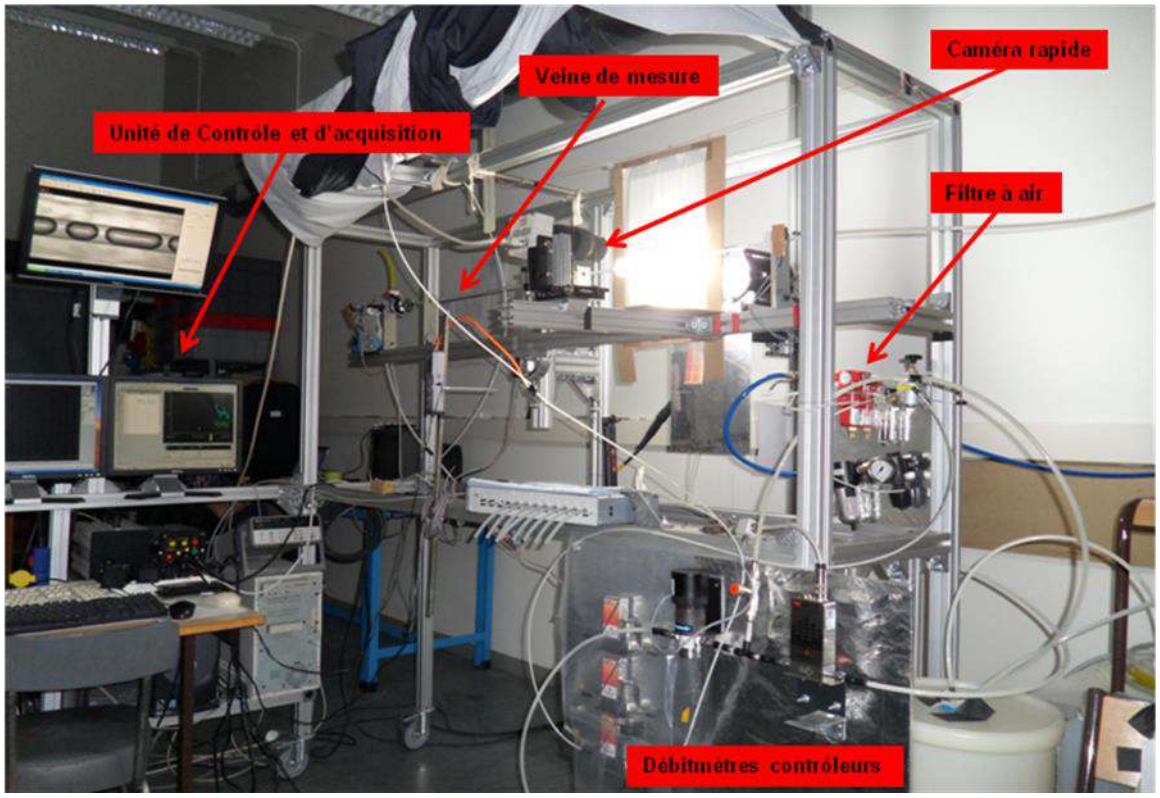


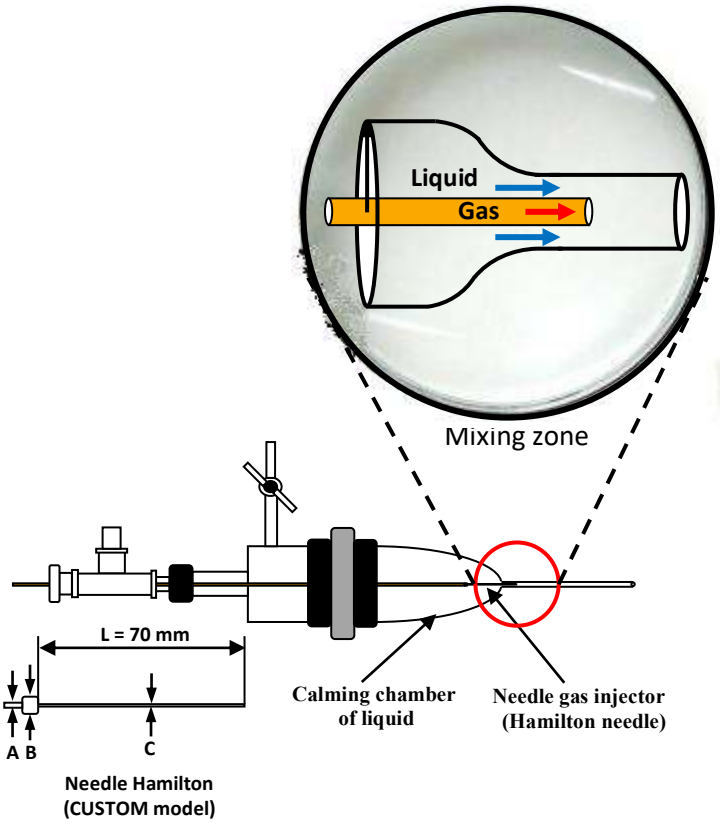
Photo du dispositif expérimental

FIG. III. 1 Dispositif expérimental.

III. 4 Veine de mesure

La veine de mesure orientable allant de 0 à 180° réalisée en laboratoire est constituée d'une chambre de tranquillisation pour le liquide de forme convergente de 210 mm de longueur solidaire à une conduite circulaire de diamètre 3mm et de 1500 mm de longueur (Fig. III. 2). Elle est équipée d'une métrologie permettant de mesurer les grandeurs dynamiques de l'écoulement (débit du gaz et du liquide, pression diphasique à l'entrée et à la sortie du tube de test). La veine de mesure est en verre transparent. Le volume intérieur de la chambre de détente est rempli de liquide (eau). Cette veine de mesure est conçue pour être

étanche dans la gamme de pression allant de 1 à 15 bars. L'air est injecté axialement sous pression dans le tube de test par une aiguille de section circulaire de 70mm de longueur et de diamètre intérieur de 0.11 mm (compagnie de Hamilton, Etats-Unis).



(a) Air/Water system injection: Calming chamber with the entrance tube when the two phase flow is created, (b) Zone of the entrance test tube.

FIG. III. 2 Veine de mesure et système d'injection air/eau.

III. 5 Système d'amenée et boucles des fluides

Un système d'injection d'air composé d'un tube capillaire en laiton assemblé par frettage (montage forcé par dilation thermique) avec une aiguille à ras (en bec droit) en acier inoxydable permet l'amenée de l'air à l'entrée de la conduite. Le bec de l'aiguille est positionné à 30 mm à partir de l'entrée du tube de test pour s'assurer que le liquide est en écoulement développé quand il atteint le bec de l'aiguille. Une tuyauterie en plastique rigide est mise en place pour assurer les raccordements hydrauliques entre le compresseur et le tube

capillaire en laiton afin de réduire tous les effets provoqués par les expansions flexibles du tube en matière plastique (Fig. III. 2). Le liquide alimente la veine de mesure par un tube rigide latéral attenant le canal principal à 90° avant la chambre de tranquillisation. La figure (III. 1) représente une vue synoptique du dispositif expérimental.

L'extrémité de la sortie de tube de test est raccordée au moyen d'un tube rigide avec un réservoir séparateur des deux phases du gaz et du liquide afin que la structure d'écoulement dans le tube de test soit plus régulière. Lorsque la sortie de tube de test est ouverte à la pression atmosphérique, nous avons mis en évidence des fluctuations de pression. Celles ci sont provoquées par l'éclatement des poches lorsqu'elles sortent du tube et peuvent affecter le mouvement des autres poches (Slugs) dans le tube.
Pour éviter ces fluctuations, l'extrémité du tube rigide purgeant l'écoulement diphasique à la sortie de tube de test est immergée dans le liquide contenu dans le réservoir. Cette configuration permet de réduire de façon conséquente ces fluctuations et de réduire notablement les perturbations de l'écoulement diphasique dans la conduite.

III. 6 Protocole expérimental

Un protocole expérimental précis a été établi de manière à assurer la reproductibilité systématique des résultats expérimentaux. Il comprend essentiellement trois étapes. La première est destinée à la préparation du dispositif, la seconde l'écoulement des phases du liquide et du gaz dans la veine de mesure et la troisième aux expérimentations proprement dites.

III. 6. 1 Description général

Avant de procéder aux expériences, la veine de mesure est nettoyée avec de l'alcool de manière à éliminer toutes impuretés éventuelles et séchée à l'air sec.

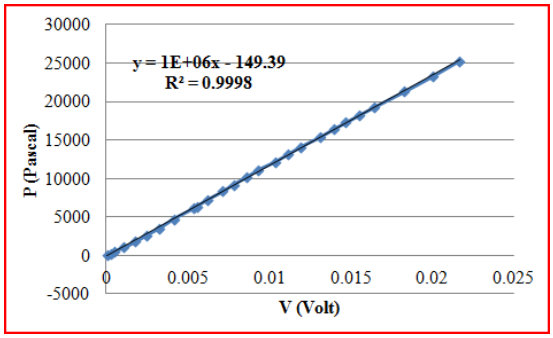
La boucle fluide est remplie à l'eau distillée au moyen d'une pompe à engrenages à partir d'un réservoir à pression atmosphérique et à température ambiante de 23°C. L'air piégé à l'intérieur de la chambre de tranquillisation est évacué facilement par le système de purge. La durée de remplissage de la veine de mesure en eau distillée dépend de la valeur du débit de consigne choisie.

Le débit du liquide est mesuré et contrôlé par un débitmètre (Sc Bronkhorst High-Tech B.V) dans une gamme allant de 2 g/h jusqu'à 2000 g/h avec une incertitude de 0.2%. La

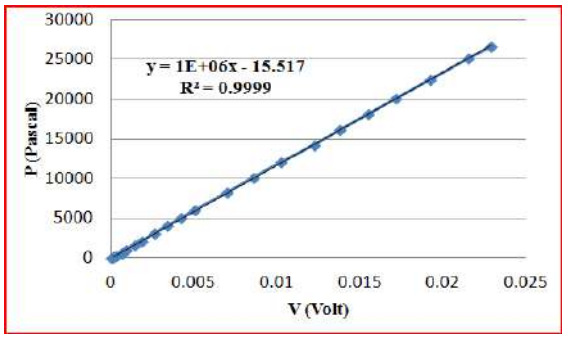
mesure et le contrôle du débit d'eau est piloté par un ordinateur avec des logiciels dédiés (*flowDDE, flow view et flow plot)* de la société Bronkhorst High-Tech B.V (Fig. III. 1).

Pour une consigne donnée du débit de liquide, la pompe produit progressivement une pression suffisante au point de refoulement de l'eau jusqu'à ce que le débit fourni par la pompe (débit mesuré) converge vers le débit consigne. Une fois la convergence atteinte entre le débit de consigne et celui mesuré avec le débitmètre, le débit de l'eau est maintenu constant pour les conditions opératoires désirées. Nous procédons ensuite à l'injection de la phase gazeuse à travers l'aiguille. L'air est fourni à partir d'un compresseur à usage autonome (sc Powerlite AKHL1230E) afin d'éviter toute perturbation extérieure éventuelle. Ce compresseur délivre de l'air à une pression allant de 1 à 34 bars ajustable à la température de la pièce de 23°C. L'air est filtré avant de traverser le débitmètre contrôleur à gaz (sc Bronkhorst High-Tech B.V). Comme pour l'eau, ce capteur permet une mesure précise du débit d'air indépendamment des fluctuations de la température et de la pression avec une précision de 1%. Cet instrument est équipé d'un système de contrôle commande géré par quatre logiciels (*flowtune, flowDDE, flow view et flow plot)* de la société Bronkhorst High-Tech B.V. Afin de couvrir une large gamme de débit d'air (14 x 10^{-4} mln/min jusqu'à 1500 mln/min). Nous utilisons trois débitmètres contrôleurs couvrant chacun une gamme de 14 x 10^{-4} mln/min – 5 mln/min, 1.6 mln/min – 200 mln/min et 8 mln/min – 1500 mln/min. L''air est injecté axialement sous pression par une aiguille de diamètre intérieur de 110µm et 260µm selon les expériences réalisées.

Les pressions à l'entrée et à la sortie de la conduite de test sont mesurées avec deux capteurs de pression différentiels Sensym SCX100DN fonctionnant dans une gamme de 0-100 kPa avec une sensibilité de 7Pa/µV. L'incertitude du dispositif électrique est de 40 µV qui équivaut à 300 Pa. Les capteurs de pression sont calibrés entre 1 et 100 kPa avec une centrale d'étalonnage DPI605 Druck 20 bars. Les courbes d'étalonnages sont représentées sur la Figure III. 3. Une carte PCI HP 34970A est employée pour l'acquisition de données gérée par un logiciel Benchlik Agilent.



Courbe d'étalonnage de la pression à l'entrée de la conduite



Courbe d'étalonnage de la pression à la sortie de la conduite

FIG. III. 3 Courbes d'étalonnage des capteurs de pression.

Les visualisations des structures d'écoulements diphasiques sont réalisées dans la zone de mélange à l'entrée du tube de test (L/D=10) et à 1280 mm (L/D=420) au moyen d'une caméra rapide à grande résolution (Ultima-FASTCAM 1024). Les films sont réalisés avec une résolution de 1024 pixels x 512 pixels, un agrandissement de 150 fois, une vitesse de 1000 i/s et d'une ouverture du diaphragme de 1/10000s. La caméra est fixée sur une table à déplacement tridimensionnel de précision micrométrique permettant le positionnement et l'étalonnage des images formées par la caméra. L'éclairage utilisé pour la visualisation est fourni par une source lumineuse froide réglable (Sc Dedeolight) sous la zone de test. Afin que l'éclairage soit uniforme sur l'ensemble du champ visualisé par la caméra rapide, un diffuseur optique est intercalé entre la lampe froide et la zone de test visualisée (voir Fig. III. 4). Cette étape de préparation est achevée par la fixation de l'orientation du tube de test vis-à-vis de la gravité au moyen d'un niveau électronique avec une précision de 0.05°. Toutes les investigations sont réalisées ici pour un écoulement diphasique gaz-liquide en position horizontale et verticale ascendante.

Afin de minimiser les distorsions optiques de l'objectif dues à la circularité du tube de test, une chambre de correction optique (chambre à iso-indice) de forme parallélépipédique et de section rectangulaire (42 mm × 37 mm × 167 mm) en verre est placée autour de la zone de visualisation. Cette chambre de correction optique est remplie d'un fluide visqueux (Triton X-100 d'indice de réfraction n_{Triton} = 1.473 presque égal à l'indice de réfraction du verre n_{verre} = 1.5) (Fig. II. 4).

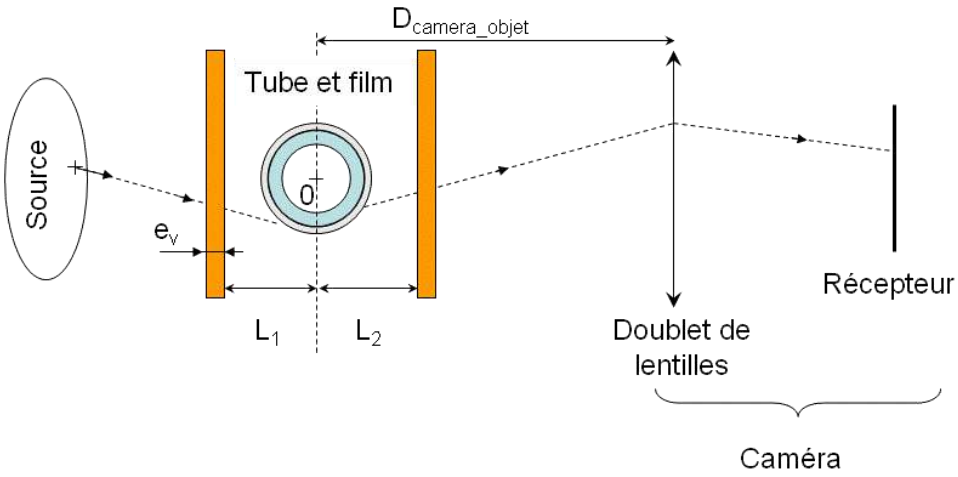


FIG. III. 4 Chambre de correction optique iso-indice

Nous abordons dans le paragraphe suivant un descriptif du scénario de réalisation d'une expérience et de l'acquisition des données.

III. 6. 2 Description d'un scénario d'expérience et de mesure

La visualisation de la structure d'écoulement diphasique, la mesure des pressions à l'entrée et à la sortie du tube de test, la mesure des débits massiques du gaz et du liquide, sont les principales données d'exploitation du dispositif expérimental. Elles sont effectuées à travers plusieurs étapes.

La figure (III. 5) présente les différentes étapes du scénario d'expérience. Elles sont répertoriées en étapes opératoires, d'acquisition et de traitement des données mesurées.

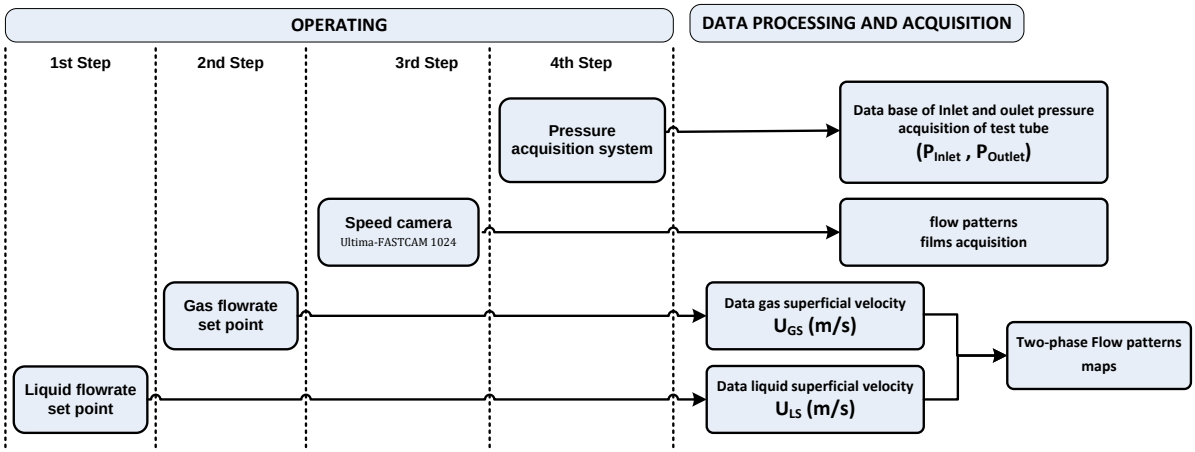
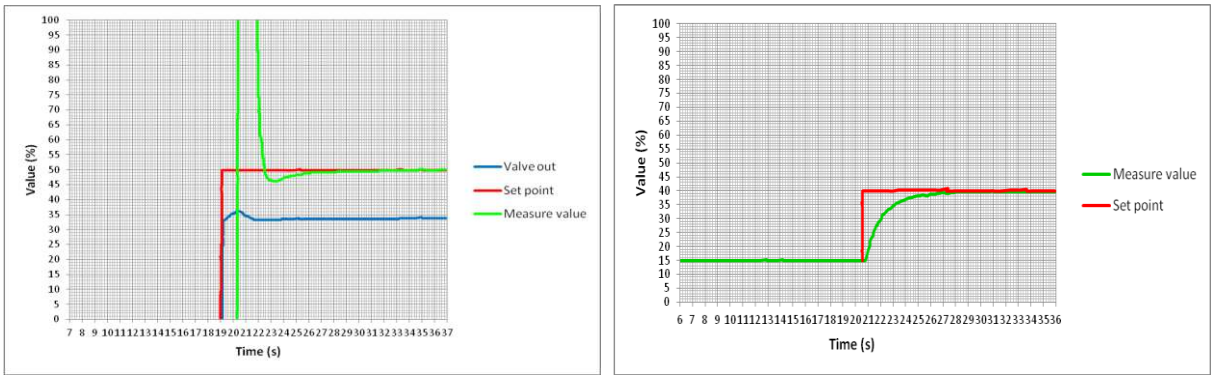


FIG. III. 5 Représentation schématique d'un scenario experimental

et du processus d'acquisition de données.

Dans l'étape opératoire, on commence par choisir une valeur du débit de consigne du liquide $\dot{m}_L$ (Fig. III. 6. a). Cette valeur est saisie sur le logiciel pilotant le débitmètre à eau (étape 1 Fig. III. 5). Dès que la convergence entre la valeur mesurée et la valeur du débit de consigne d'eau est atteinte on passe à la seconde étape. Elle consiste en la saisie de la valeur consigne du débit d'air $\dot{m}_G$ (Fig. III. 6. b). Le processus de convergence est similaire à la mesure du débit d'eau. L'écoulement diphasique est maintenu dans ces conditions jusqu'à se stabiliser.



(a) Débit de la phase gazeuse (b) Débit de la phase liquide

Fig. III. 6 Schéma représentatif de la convergence du débit mesuré (courbe verte) vers le débit consigne (courbe rouge)du gaz et du liquide sur l'interface du logiciel pilote des débitmètres contrôleurs air et eau (Sc Bronkhorst Hight-tech B.V).

Afin d'identifier la stabilité des écoulements de ces deux phases, pour un point de consigne donné on utilise comme agents indicateurs l'évolution temporelle graphique régulière des pressions de l'écoulement diphasique à l'entrée et la sortie de tube de test affichée sur l'interface du logiciel Benchlink Agiletn (Fig. III. 7). Une fois que ces indicateurs ont atteint un régime stable la procédure d'acquisition des données expérimentales est lancée. Ce processus est répété pour chaque condition opératoire (débits du liquide et du gaz fixés).

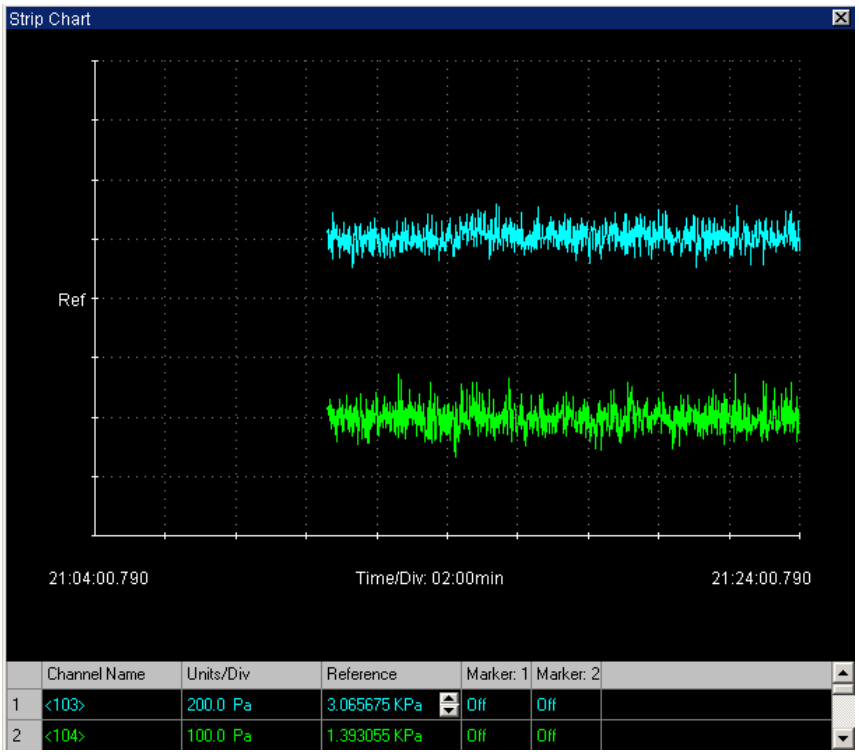


Fig. III. 7 Schéma représentatif de l'historique graphique de la pression de l'écoulement diphasique air-eau à l'entrée (courbe bleu) et à la sortie (courbe verte) du tube de test sur l'interface du logiciel Benchlink Agilent (Sc HP), pour des débits d'air et d'eau de 141,5 mln/min, 200 g/h, respectivement.

L'acquisition des données instantanées de pression à l'entrée et à la sortie de la conduite est fixées à quelques minutes au moyen d'une mini station HP HEWLETT PACKARD 34970A, ces données sont enregistrées et répertoriées dans un tableau (Fig. III. 5).

Les mesures de pression à l'entrée et à la sortie de la conduite permettent d'évaluer la perte de pression pour chaque condition opératoire et utiliser également dans ce travail comme agent indicateur de l'établissement de l'écoulement diphasique. Les données saisis de la chute de pression seront exploitées dans un autre travail ultérieur.

La dernière étape de ce scénario expérimental s'achève par le traitement des données expérimentales.

Une fois l'ensemble des conditions opératoires réalisées une carte des structures d'écoulement diphasique est construite. Cette carte est une représentation graphique dimensionnelle des domaines d'existence des différentes structures en fonction des vitesses

apparentes des phases liquide et gazeuse. Ces coordonnées ont été choisies en absence d'un système de coordonnées adimensionnelles (Chinov et Kabov 2006 ; Shao et al., 2009). Les zones imprégnées par chaque type de structure d'écoulement seront délimitées par des frontières, caractérisant le passage d'une structure principale à une autre qui se produit de manière progressive. Dans la littérature, la quasi-totalité des cartes établies sont construites en échelle logarithmiques. Cette représentation ne permet pas une délimitation précise des structures d'écoulements. C'est pourquoi nous conserverons une représentation linéaire.

CHAPITRE IV. RESULTATS : STRUCTURES D'ECOULEMENTS DIPHASIQUES DANS UNE CONDUITE HORIZONTALE

Chapitre IV. Résultats

Structures d'écoulements diphasiques dans une conduite horizontale

IV. 1 Introduction

Le travail expérimental mené a pour objectif d'étudier les écoulements diphasiques gaz-liquide dans une conduite de 3mm de diamètre intérieur sans changement de phase ni transfert de chaleur. La veine de mesure est orientable vis-à-vis de la gravité avec un système de pivotement parfaitement contrôlé. Dans cette expérience, nous positionnons la veine de mesure en permanence en position horizontale. La vitesse apparente du liquide et du gaz varie de 0.78 x 10^{-3} m/s à 79 x 10^{-3} m/s et de 2.3 x 10^{-3} m/s à 3.54 m/s.

Nous étudierons les structures dans la zone de formation du mélange diphasique (L/D = 10) ~~et~~ à 1280mm de l'entrée du tube de test (L/D = 420), ainsi que l'influence du diamètre de l'aiguille d'injection du gaz sur les structures et leur lignes de transition.

Il est important de noter, qu'on a rencontré des difficultés d'instrumentation de la métrologie adoptée étant donnée la taille de la conduite.

Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence les différentes structures et de construire des cartes d'écoulement bidimensionnelles délimitant le domaine d'existence de chaque type de structure d'écoulement visualisée.

Zone de test expérimentale :

Dans la majorité des travaux expérimentaux réalisés pour l'établissement des cartes de structures d'écoulements diphasiques, les auteurs ont opéré dans une zone délimitée par les gammes de vitesses allant de 50 x 10^{-3} m/s à 100 m/s pour le gaz et de 6 x 10^{-3} m/s à 10m/s pour le liquide (voir Fig. IV. 1). Dans l'ensemble, les auteurs observent les mêmes structures d'écoulement. Elles sont morphologiquement semblables aussi bien dans les conduites à faible ou celle à grande taille (Kawaji and Chung 2004). Selon les auteurs, c'est dans la précision et la finesse de la description qu'elles diffèrent. Différentes terminologies ont été utilisées par certains auteurs pour une même structure (Galbiati et Andreini 1994 ; Amador et al., 2004 ; Damianides et Westwater 1988. Thulasidas et al., 1997). Inversement, il n'est pas rare que la même terminologie soit employée par d'autres auteurs pour décrire des structures différentes (Barajas et Panton 1993 ; Triplett et al., 1999a ; Yang et Shieh 2001). En raison de ce manque d'uniformité de terminologie, il est devenu difficile d'obtenir un classement cohérent des structures observées.

Par ailleurs les gammes de vitesses considérées par de nombreux auteurs correspondent à des écoulements pouvant engendrer des interfaces fortement « perturbées ».

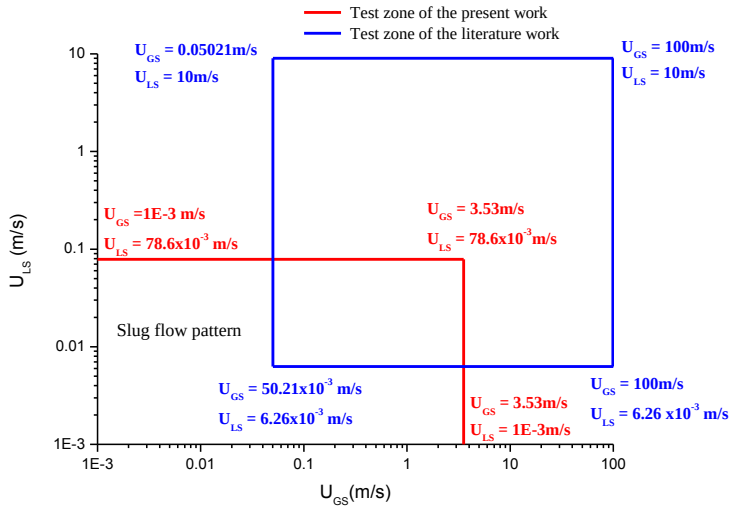


FIG. IV. 1 Zone de test expérimental du présent travail.

La zone de test correspondant à nos expériences est différente de celles usuellement investiguées par les autres auteurs. Cette zone est encadrée par les gammes de vitesses apparentes du gaz allant de 2.3 x 10^{-3} m/s à 3.54 m/s et de 0.78 x 10^{-3} m/s à 79 x 10^{-3} m/s pour le liquide (Fig. IV. 1). Ces gammes de vitesses ont été retenues pour étudier les écoulements diphasiques "laminaires" avec des interfaces gaz-liquide lisses. Les nombres de Reynolds ($Re_{LS}= \rho_L U_{LS} D/\mu_L$, $Re_{GS}= \rho_G U_{GS} D/\mu_G$) associés à ces vitesses apparentes varient de 0,2 à 710 pour la phase gazeuse et de 2,3 à 230 pour la phase liquide. Pour la grande majorité des régimes étudiés dans la littérature, les nombres de Reynolds varient de 20 à 30.000 pour la phase liquide et de 10 à 20.000 pour la phase gazeuse. Dans ce cas, les interfaces gaz-liquide sont perturbées.

L'extrapolation des cartes d'écoulement proposées par les différents auteurs pour les gammes de vitesses explorées dans le cadre de cette investigation conduit à une structure à poche. Nos explorations nous permettent de mettre en évidence trois structures de base (bulles, poches, et annulaire) qui peuvent, suivant les régimes d'écoulement, évoluer le long de la conduite.

Nous étudierons les structures d'écoulement au niveau de la zone de formation du mélange diphasique à l'entrée de la conduite à L/D = 10 et dans la conduite à L/D = 420 de l'entrée. Les résultats obtenus permettront de mettre en évidence les différentes structures et proposer ainsi des cartes d'écoulement bidimensionnelles délimitant le domaine d'existence de chaque type de structure d'écoulement visualisée.

IV. 2 Visualisation des structures d'écoulements diphasiques

Interprétation des visualisations

La figure (IV. 2) présente une vue longitudinale de la conduite. Du fait de la courbure de la paroi, les zones proches de la paroi interne sont éclairées différemment selon les propriétés optiques des fluides en présence. La largeur des bandes sombres dépend de la différence d'indice de réfraction entre le fluide contenu dans la conduite et le verre par rapport au chemin optique. En présence d'un écoulement, où les phases liquide et gazeuse sont simultanément présentes, les courbures des interfaces gaz-liquide engendrent des modifications importantes des chemins optiques permettant ainsi de distinguer la distribution des phases. La phase gazeuse s'identifie par la bande foncée délimitant l'air à l'intérieur, alors que la phase liquide s'identifie par la bande claire. L'interface séparant les deux phases est marquée par une bande noire dont l'épaisseur est fonction de la courbure de l'interface (Fig. IV. 2).

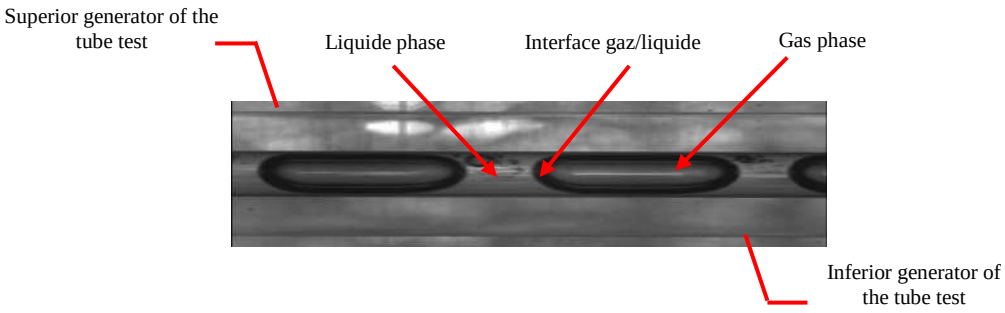


FIG. IV. 2 Analyse d'une image d'un ''écoulement diphasique'': distinction entre la phase liquide et la phase gazeuse.

La traversée, par un rayon lumineux, de milieux d'indices de réfraction différents présentant des interfaces courbes, rend difficile la mesure de l'épaisseur du film liquide intercalé entre la poche de gaz et la paroi intérieure de la conduite.

Nous présentons dans cette partie les structures d'écoulements visualisées dans deux zones différentes de la conduite de test (Fig. III. 1) en position horizontale:

- Une première zone Z1 à l'entrée du tube de test où est crée le mélange diphasique à L/D = 10. Ce mélange est obtenu en injectant l'air au centre de la conduite par une aiguille de 110 µm de diamètre intérieur et le liquide en écoulement annulaire à partir de la chambre de tranquillisation (Fig. III. 1).
- Une seconde zone Z2 située à 1280 mm (L/D = 420) à partir de l'entrée du tube de test.

Dans les présentes expériences, les gammes opératoires ont été considérablement étendues afin d'explorer attentivement les structures d'écoulements diphasiques possibles à L/D = 10 et à L/D = 420 de la conduite.

Afin de montrer l'influence du débit de liquide et de gaz sur les structures d'écoulements, trois vitesses apparentes du liquide distinctes seront discutées dans cette partie : faible vitesses apparente U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s, vitesse apparente modérée U_{LS} = 29 x 10^{-3} m/s et vitesse apparente élevée U_{LS} = 59 x 10^{-3} m/s et avec un balayage de la vitesse apparente du gaz allant de 2.3 x 10^{-3} m/s à 3.53 m/s.

IV. 2. 1 Dans la zone de création du mélange diphasique à L/D = 10

La visualisation des structures d'écoulements dans la zone de mélange est accomplie sans la chambre de correction optique par suite de son incompatibilité géométrique avec la chambre de tranquillisation de forme convergente (Fig. III. 2). Nous avons mis en évidence trois structures principales : bulle, poche et annulaire. Les structures secondaires apparaissent clairement lors des transitions d'une structure principale à une autre, à la différence des études expérimentales antérieures exceptées celles de Yang et Shieh (2001). Ces auteurs ont indiqué avec précision les frontières pour un écoulement diphasique du réfrigérant R134a et air-eau. Il s'agit des structures bulle-poche (bubbly-slug), poche-annulaire (slug-annular).

a- Très faible vitesse du liquide (U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s, Re_{LS} = 2.34)

Aux très faibles vitesses apparentes du gaz U_{GS} = 3.8 x 10^{-3} m/s, il y' a formation d'une poche d'air stationnaire à l'entrée du tube de test (Fig. IV. 3). Du fait de la très faible vitesse de l'eau dans la conduite, l'effet d'entrainement de l'air est très faible. Il y' a accumulation d'air dans cette zone qui donne naissance à la grande poche de gaz. La formation de cette poche stationnaire a désaxé remarquablement le bec de l'aiguille (de nature flexible) du centre de tube jusqu'à une position proche de la paroi intérieure. Cela a eu pour conséquence, d'engendrer la formation de petites bulles d'air dans le film liquide entre la poche stationnaire et la paroi. Dans cette configuration, l'injection de l'air génère des bulles distinctes de très petites tailles collées les unes aux autres en écoulement dans une phase liquide continue donnant une structure d'écoulement à bulles dispersées (Dispersed bubbly flow). Les bulles occupent la majeure partie de la section droite de la conduite (Fig. IV . 3. a).

Pour une vitesse apparente du gaz plus élevée U_{GS} = 4 x 10^{-3} m/s, la structure bulle/poche se manifeste par l'apparition successive de bulles dispersées et de poches. Ces poches résultent de la coalescence des petites bulles ou de la formation de poches au niveau du bec de la buse d'injection d'air positionné à 3cm de l'entrée de la conduite (Fig. IV. 3. b).

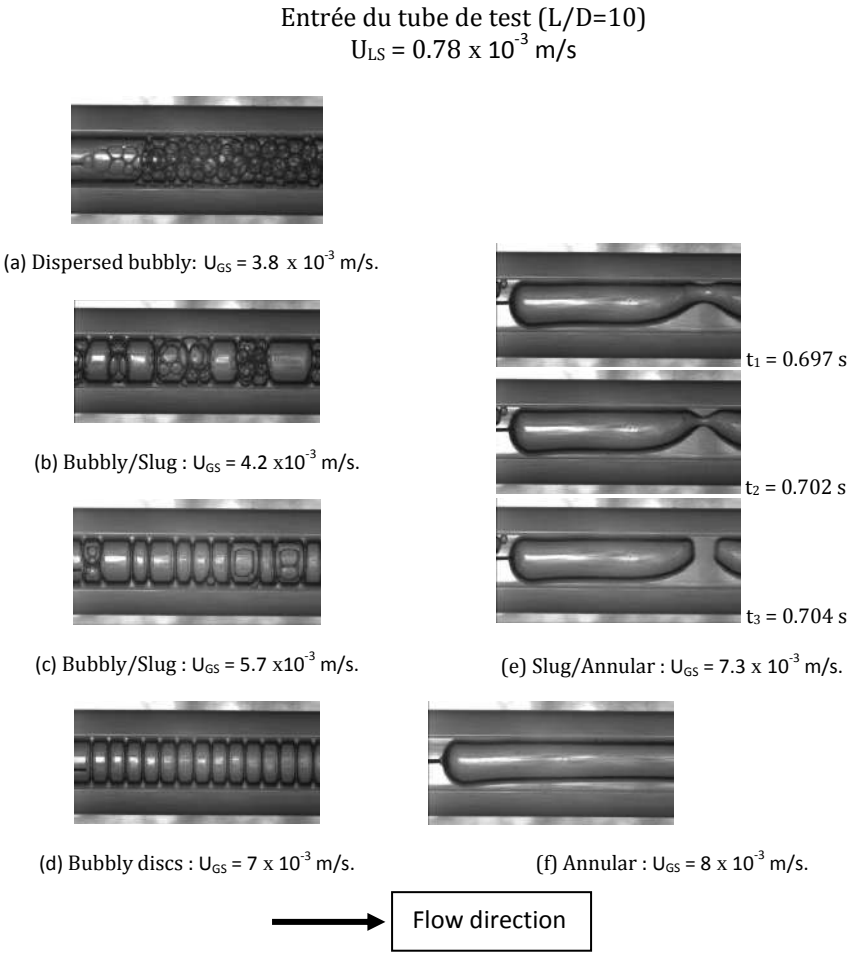


FIG. IV. 3 Ecoulement typique observé à l'entrée du tube de test (ID3mm) à très faible vitesse apparente du liquide (U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s).

En augmentant encore la vitesse apparente du gaz U_{GS} = 6 x 10^{-3} m/s, une structure d'écoulement à bulle de gaz aplatie (Bubbly discs flow pattern) apparait. Cette structure est un empilement de disques de gaz réguliers (Fig. IV. 3. d). Pour cette structure, le diamètre des disques est égal au diamètre de la section droite de la conduite et d'épaisseur inférieur. La bulle est confinée dans la direction transversale, du fait que le débit du liquide est très faible. Les bouchons du liquide se réduisent à un mince film liquide séparant les disques du gaz entassés les uns aux autres suivant la direction axiale donnant ainsi un aspect aplati de la bulle.

Formation de la structure à disques

La formation de la structure d'écoulement à bulle de gaz aplatie (Bubbly discs flow pattern) est réalisée dans les conditions expérimentales suivantes: le bec de l'aiguille positionné entre la poche stationnaire et la paroi de la conduite pour une vitesse apparente du gaz comprise entre 6 x 10^{-3} m/s – 7 x 10^{-3} m/s.

Le processus débute par la formation de bulle dans le film liquide intercalé entre la paroi et la grosse poche de gaz. La bulle grossit en s'allongeant le long de la paroi dans le film liquide. La bulle poursuit son grossissement suivant la direction transversale jusqu'à atteindre le diamètre de la conduite, et longitudinalement jusqu'à atteindre une épaisseur donnée. Cette bulle plaquée sur la paroi latérale grossit et vient s'intercaler entre la poche stationnaire et le disque adjacent. Elle remplit progressivement cette zone par la périphérie et envahit ensuite la partie centrale du tube pour former un disque. Simultanément, il y' a rupture du col au niveau du bec de l'aiguille.

Le processus de création de ce disque se répète de nouveau et de façon périodique, pour engendrer la structure d'écoulement à bulle aplatie (Bubbly discs flow pattern). Pour ce régime, les disques de gaz formés ont sensiblement la même taille et avancent lentement dans la conduite.

Pour une vitesse apparente du gaz suffisamment élevée U_{GS} = 8 x 10^{-3} m/s, il y' a rupture des interfaces entrainant la formation d'un écoulement annulaire. Le gaz circule au cœur de la conduite et le liquide en périphérie (Fig. IV. 3. f).

L'écoulement diphasique présente une structuration annulaire instable (Fig. IV. 3. e). En effet, le cylindre du gaz est entouré d'un film liquide et selon son épaisseur la colonne de gaz peut se rompre pour former des poches de longueurs plus ou moins importantes. Lorsque l'épaisseur du film liquide est suffisamment importante, l'instabilité capillaire se développe pour engendrer la structure à poches. Inversement, lorsque le film liquide est très faible, l'instabilité capillaire ne peut se développer et la structure annulaire persiste tout au long de la conduite (Fig. IV. 3. f).

b- Vitesse de la phase liquide modérée (U_{LS} = 29 x 10^{-3} m/s, Re_{LS} = 88.44)

A faible vitesse apparente du gaz U_{GS} = 3.8 x 10^{-3} m/s, la poche stationnaire entourant l'aiguille d'injection d'air disparaît et laisse place à la formation d'une structure à bulles dispersées (Fig. IV. 4. a). Ces bulles sont polydisperses et occupent la partie supérieure de la conduite. En augmentant la vitesse apparente du gaz U_{GS} = 11 x 10^{-3} m/s, les bulles formées augmentent de taille et se répartissent sous forme d'un train régulier de bulles presque sphériques (Fig. IV. 4. b).

En augmentant encore la vitesse apparente du gaz U_{GS} = 32 x 10^{-3} m/s, la structure de transition bulle/poche apparait. Elle se forme au niveau du bec de l'aiguille ou par coalescence de bulles au niveau de cette zone. Pour une vitesse de gaz élevée (U_{GS} = 40 x 10^{-3}

m/s), la structure à poches (slug flow) se développe préférentiellement au niveau de la buse d'injection avec la formation de bulles satellites (Fig. IV. 4. d).

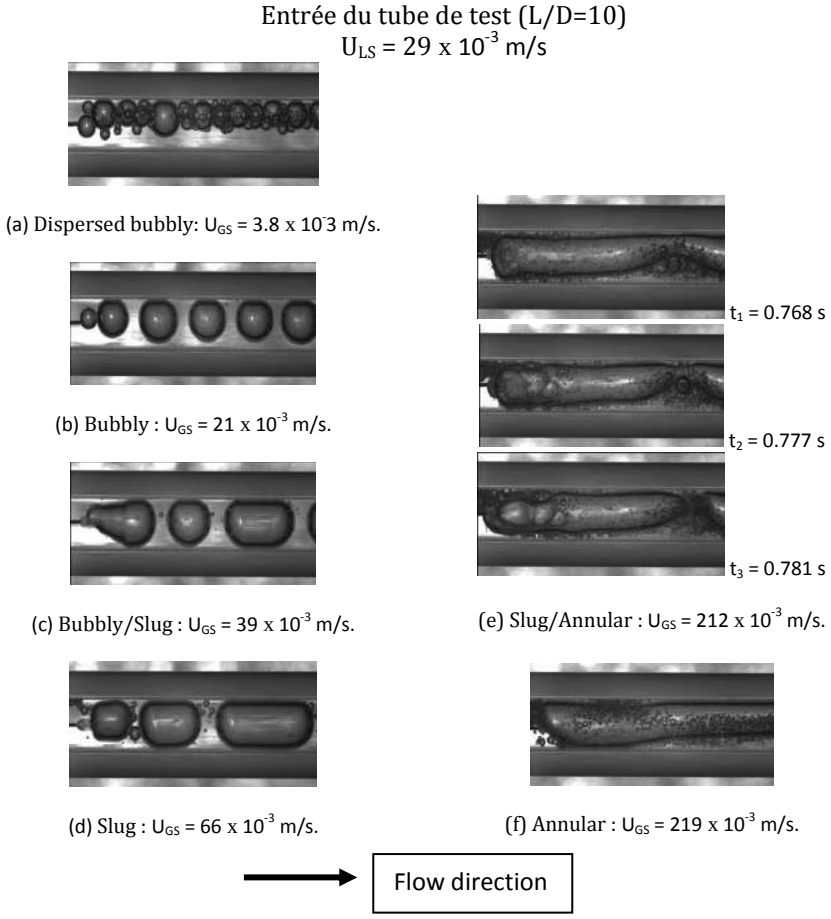


FIG. IV. 4 Ecoulement typique observé à l'entrée du tube de test (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide modérée (U_{LS} = *29* x *10^{-3} m/s*).

Pour des vitesses apparentes du gaz encore plus élevées U_{GS} = 212 x 10^{-3} m/s, un écoulement annulaire instable se caractérise par une rupture de la structure annulaire en aval de la buse d'injection. Il y a corrélativement la formation de microbulles de gaz. Celles-ci apparaissent par suite des vitesses importantes de la phase gazeuse au niveau du bec d'injection. C'est un mécanisme complexe d'atomisation qui se superpose à la formation de structure annulaire instable (Fig. IV. 4. e).

A force d'augmenter la vitesse apparente du gaz, la zone de rupture se déplace tout au long de notre fenêtre de visualisation (de 21mm de longueur) dans le sens de l'écoulement jusqu'à ce qu'elle s'éclipse complètement du champ de vision. Dans cette situation, la structure annulaire reste instable car comme nous le verrons ultérieurement des poches de gaz en aval de la conduite apparaissent (L/D = 420).

Dés que la vitesse U_{GS} devient supérieure à 220 x 10^{-3} m/s, c'est la structure annulaire stable qui prend place.

c- Vitesse de la phase liquide élevée (U_{LS} = 59 x 10^{-3} m/s, Re_{LS} = 176.7)

En augmentant la vitesse apparente du gaz par de petits incréments, les structures principales (bulles, poches et annulaire) et de transitions (bulle-poche, poche-annulaire) observées sont semblables aux résultats obtenus au cas précédent où la vitesse de la phase liquide est modérée avec quelques différences de comportement.

Pour ce cas à très basse vitesse apparente du gaz, les bulles formées ont une taille régulière et sont localisées dans la partie supérieure de la conduite (Fig. IV. 5. a). Pour des vitesses supérieures, la taille des bulles croit (Fig. IV. 5. b) jusqu'à transiter vers la structure à poches (Fig. IV. 5. d).

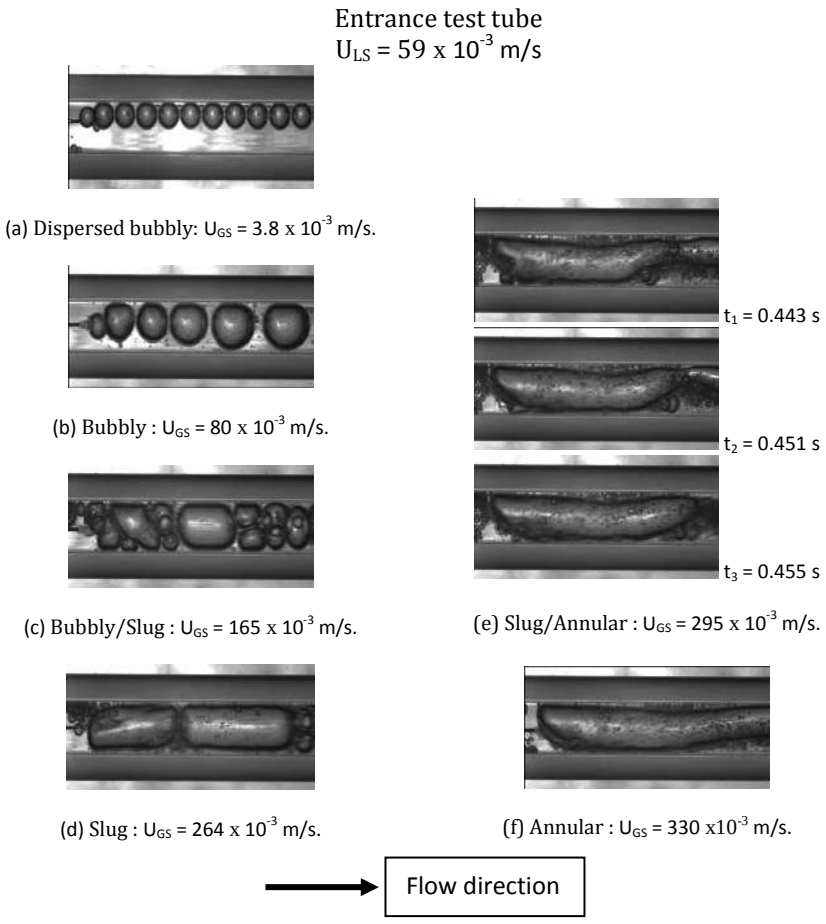


FIG. IV. 5 Ecoulement typique observé à l'entrée du tube de test (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide élevée (U_{LS} = 59 x 10^{-3} m/s).

La structure de transition bulle-poche se manifeste de la même manière que le cas précédent avec une production plus intense de microbulles de gaz entourant les structures principales à poches (Fig. IV. 5. c). ou annulaire instable ou stable (Fig. IV. 5. e. f).

IV. 2. 2 Dans la zone à L/D = 420 de la conduite

Nous présentons les résultats d'observations obtenus à 1280mm (L/D = 420) à partir de l'entrée de la conduite horizontale en utilisant une chambre de correction optique.

A des conditions d'écoulements données, on a observé différentes structures d'écoulement selon les vitesses des phases.

a- Très faible vitesse du liquide (U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s, Re_{LS} = 2.34)

La structure à poches fait son apparition aux faibles vitesses du gaz (U_{GS} = 2.35 x 10^{-3} m/s) (Fig. IV. 6.a). Cette structure est caractérisée par des bulles de gaz cylindriques allongées axialement épousant la majeure partie de la conduite et avec des interfaces lisses. En augmentant la vitesse apparente du gaz par de petits incréments, on obtient successivement la structure de transition poche/annulaire, et la structure annulaire avec l'apparition d'ondulations sur l'écoulement annulaire (Wavy annulaire flow) et ce pour des vitesses du gaz plus élevées (Fig. IV. 6.b.c.d). Dans ce dernier cas, les ondulations d'interfaces peuvent être générées sans doute par des effets capillaires.

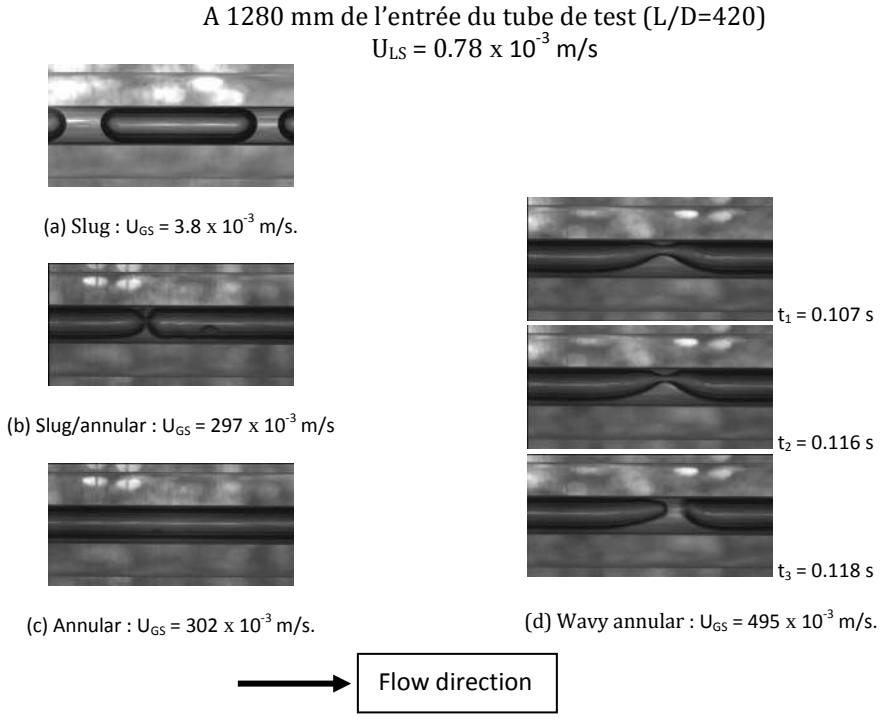


FIG. IV. 6 Ecoulement typique observé à 1280 mm de l'entrée du tube de test (ID 3mm), à très faible vitesse apparente du liquide (U_{LS} = *0.78* x 10^{-3} *m/s*).

b- Vitesse de liquide modérée (U_{LS} = 29 x 10^{-3} m/s, Re_{LS} = 88.44) et élevée (U_{LS} = 59 x 10^{-3} m/s, Re_{LS} = 176.7)

L'augmentation de la vitesse apparente de la phase gazeuse, révèle successivement des structures de bulles dispersées, bulles, poche-bouchon, annulaire (Fig. IV. 7).

En effectuant un balayage sur la gamme de vitesse apparente du gaz, nous avons obtenus des structures d'écoulements analogues au cas de la vitesse modérée du liquide. Il est à noter que la structure annulaire n'a pas été observée, car les vitesses élevées n'ont pas été atteintes pour des raisons de sécurité. En effet, les débits de gaz engendrés pour des pressions d'injection supérieures à 15 bars n'ont pas fait l'objet d'investigation par précaution et préservation du dispositif expérimental.

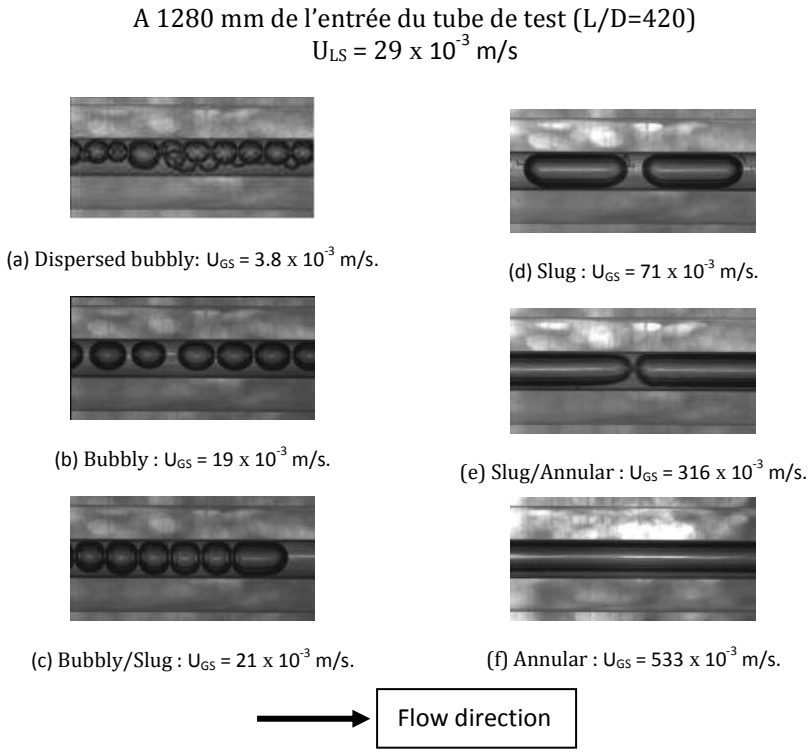


FIG.IV.7 Ecoulement typique observé à 1280 mm de l'entrée du tube de test (ID 3mm), vitesse apparente du liquide élevée (U_{LS} = *29* x 10^{-5} *m/s*).

IV.2.3 Comparaison des structures observées à L/D = 10 et à L/D = 420 du tube de test

Toutes les données expérimentales des structures d'écoulements acquises à deux positions de la conduite ont été synthétisées dans le tableau IV. 1. Ce tableau présente les structures observées par caméra rapide à L/D=10 de l'entrée de la conduite et à L/D=420 pour les diverses conditions opératoires. A partir des résultats obtenus, nous pouvons faire plusieurs remarques suivant les vitesses apparentes des phases du liquide et du gaz.

A très faible vitesse apparente du liquide $U_{LS} = 0.78 \times 10^{-3}$ m/s et à un balayage de la phase gazeuse dans la gamme 3.8×10^{-3} m/s $\leq U_{GS} \leq 278.37 \times 10^{-3}$ m/s, nous observons plusieurs structures d'écoulement au niveau de la zone de formation du mélange (L/D=10) par la technique utilisée (voir Tableau IV. 1.a). En effet, on passe de la structure à bulles à la structure annulaire. La structure à bulles est observée aux très faibles vitesses apparentes de l'air avec un mécanisme de formation particulier. En effet, dans cette structure, les bulles se forment dans le film liquide plaqué sur la paroi du tube. Dans ces conditions, les bulles sont de très petite taille. L'augmentation de la vitesse apparente du gaz entraine une augmentation de la taille des bulles qui se forment toujours dans le film liquide. Dans ces conditions, il apparait une structure atypique formée de bulles aplaties en forme de disque en aval de la buse d'injection. Pour une vitesse apparente d'air donnée, la bulle formée à la sortie de la buse d'injection est de taille suffisamment importante pour rompre l'interface entre le film liquide et la poche stationnaire. Il y a alors un recentrage de la buse d'injection dans le tube avec la formation d'une structure annulaire. Cette structure peut être instable, elle est conditionnée par l'épaisseur du film liquide le long du tube de test. Dans la position horizontale considérée, le film liquide est asymétrique par suite des effets de gravité. Il est plus épais dans la partie inférieure. Lorsque le débit de gaz croit, l'épaisseur du film liquide décroit. La structure annulaire tend vers une structure stable tout le long de la conduite.

A L/D=420, la structure de l'écoulement diphasique est de type poche-bouchon. Les tailles respectives des poches et des bouchons diffèrent selon le débit de gaz. Aux faibles vitesses de gaz, les poches de gaz sont issues de la coalescence des bulles formées dans la zone de mélange. Lorsque le débit de gaz croit, les poches s'allongent et leur taille devient de plus en plus importante. La taille des bouchons ne subit pas de modifications importantes malgré les différences de formation de la phase dispersée au niveau de la zone d'entrée. Pour des vitesses de gaz élevées, la structure annulaire devient stable.

A vitesse apparente de liquide modérée 29×10^{-3} m/s, il y' a formation de bulles dans la zone de mélange des phases. La taille des bulles formées croit au fur et à mesure que la vitesse apparente du gaz croit dans la gamme 3.77×10^{-3} m/s $\leq U_{GS} \leq 30.7 \times 10^{-3}$ m/s. Dans cette gamme de vitesses apparentes du gaz, la structure d'écoulement à L/D = 420 évolue de la structure à bulle jusqu'à la structure à poche-bouchon. Les bulles formées à l'entrée (L/D = 10) coalescent tout au long de la conduite sous l'effet du confinement. A L/D = 420, les bulles apparaissent sous forme ovale de diamètre inférieur au diamètre de la conduite.

Pour la gamme de vitesse apparente du gaz 31.85 x 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 306.67 x 10^{-3} m/s, il y' a formation d'une structure poche-bouchon dans la zone d'entrée (L/D = 10). Cette structure évolue vers une structure annulaire au fur et à mesure que la vitesse du gaz croit. Dans cette zone, il y a formation de microbulles secondaires entourant les structures poche/annulaire et annulaire, à une vitesse du gaz élevée au niveau de la buse d'injection.

Dans cette gamme de vitesse apparente du gaz, la structure observée à L/D = 420 est de type poche-bouchon. A mesure que la vitesse apparente du gaz augmente, les poches de gaz deviennent de plus en plus longues. Cette situation est similaire au cas précédent à faible vitesse apparente du liquide U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s.

Pour des vitesses apparentes du gaz allant de 316 x 10^{-3} m/s à 778.48 x 10^{-3} m/s, la structure de transition poche/annulaire prend place pour se substituer à la structure annulaire pour des vitesses plus élevées.

Pour une vitesse apparente du liquide élevée 59 x 10^{-3} m/s, on constate que l'évolution morphologique des structures d'écoulements à L/D = 10 et à L/D = 420 est identique au cas observé à moyenne vitesse apparente du liquide. Les seules différences sont observées à L/D = 10 où l'effet d'atomisation de la phase gazeuse s'intensifie à force d'augmenter la vitesse apparente du gaz dans la gamme de vitesse de gaz allant de 3.77 x 10^{-3} m/s à 778.48 x 10^{-3} m/s.

L'augmentation de la vitesse apparente du liquide va engendrer une réduction de la taille des bouchons liquide à L/D =10 qui s'estompe à L/D = 420. Ce résultat nous amène à penser que la vitesse apparente de l'eau dans la gamme (29 x 10^{-3} m/s < U_{LS} < 59 x 10^{-3} m/s) à peu d'influence sur les structures d'écoulement.

Pour résumer, on observe de nombreuses structures d'écoulement dans la zone de formation du mélange diphasique (bulles, poches aplaties sous forme de disque, annulaires avec des bulles satellites formées par atomisation) ; Loin de la zone de mélange, les structures observées sont bulles, poche-bouchon et annulaire. Nous constatons une simplification des structures d'écoulement liée à l'établissement du régime d'écoulement diphasique. Cette simplification se traduit par une coalescence des bulles engendrant des bulles de tailles plus importantes ou des poches loin de la zone d'entrée.

Tableau (IV. 1) : Comparaison des structures des structures visualisées en position horizontale entre la zone de mélange à L/D = 10 et à L/D = 420 mm.

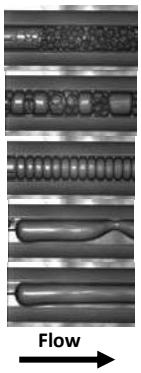
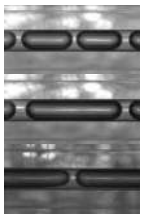
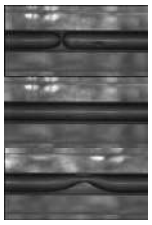
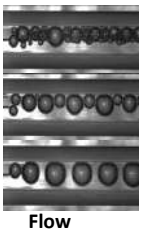
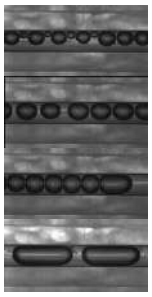
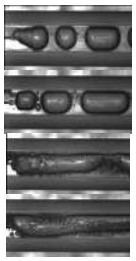
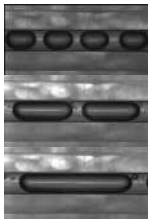
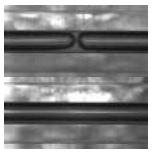
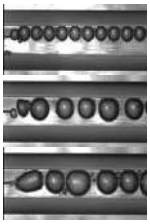
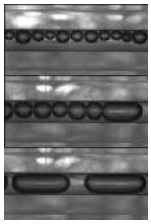
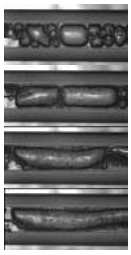
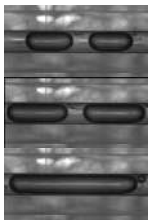
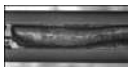
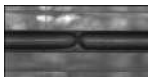
	Entrance without correction chamber (L/D = 10)		Entrance with correction chamber (L/D = 420)	
	Pattern	Superficial gas velocity	Pattern	Superficial gas velocity
(a) Low superficial velocity $U_{LS} = 0.78 \times 10^{-3}$ m/s	 Flow	$3.77\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $4.13\ 10^{-3}$ m/s ➔ Bubbly $4.25\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $5.66\ 10^{-3}$ m/s ➔ Bubbly/Slug $6.13\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $7.08\ 10^{-3}$ m/s ➔ Multi discs $7.08\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $7.31\ 10^{-3}$ m/s ➔ Unst annular $7.55\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $278.37\ 10^{-3}$ m/s ➔ Annular	 Flow	$3.77\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $278.37\ 10^{-3}$ ➔ Slug with different sizes.
	 Flow	$283.08\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $778.48\ 10^{-3}$ m/s ➔ Annular	 Flow	$283.08\ 10^{-3}$m/s ≤ U_{GS} ≤ $297.24\ 10^{-3}$m/s ➔ Slug/Annular $301.96\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $424.63\ 10^{-3}$ m/s➔ Annular $495.39\ 10^{-3}$m/s ≤ U_{GS} ≤ $778.48\ 10^{-3}$m/s ➔ Wavy annular
(b) Moderate superficial velocity $U_{LS} = 29 \times 10^{-3}$ m/s	 Flow	$3.77\ 10^{-3}$m/s ≤ U_{GS} ≤ $30.67\ 10^{-3}$m/s ➔ Bubbly with different sizes.	 Flow	$3.77\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $19.46\ 10^{-3}$ m/s ➔ Bubbly $20.05\ 10^{-3}$m/s ≤ U_{GS} ≤ $28.31\ 10^{-3}$m/s ➔ Bubbly/Slug $29.48\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $30.67\ 10^{-3}$ m/s ➔ Slug
	 Flow	$31.85\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $38.92\ 10^{-3}$ m/s ➔ Bubbly/Slug $40.103\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $66.05\ 10^{-3}$ m/s➔ Slug $70.77\ 10^{-3}$m/s ≤ U_{GS} ≤ $217.03\ 10^{-3}$m/s ➔ Unst annular $219.39\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $306.67\ 10^{-3}$ m/s ➔ Annular	 Flow	$31.85\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $306.67\ 10^{-3}$ m/s ➔ Slug with different sizes.
	 Flow	$316.11\ 10^{-6}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $778.48\ 10^{-6}$ m/s ➔ Annular	 Flow	$316.11\ 10^{-3}$m/s ≤ U_{GS} ≤ $526.07\ 10^{-3}$m/s ➔ Slug/Annular $533.14\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $778.48\ 10^{-3}$ m/s➔ Annular

Tableau (IV. 1) : Comparaison des structures visualisées en position horizontale entre la zone de mélange à L/D = 10 et à L/D = 420 mm (suite)

	Entrance without correction chamber (L/D = 10)		At 1280mm (L/D = 420) of entrance with correction chamber	
	Pattern	Superficial gas velocity	Pattern	Superficial gas velocity
(c) High superficial velocity U_{LS} = 59 x 10^{-3} m/s	 Flow	3.77 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 80.21 10^{-3} m/s ➔ Bubbly with different sizes.	 Flow	3.77 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 35.38 10^{-3} m/s ➔ Bubbly 35.38 10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 70.77 10^{-3}m/s ➔ Bubbly/Slug 77.85 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 80.21 10^{-3} m/s ➔ Slug
	 Flow	82.57 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 254.78 10^{-3} m/s ➔ Bubbly/Slug 259.49 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 264.21 10^{-3} m/s ➔ Slug 268.93 10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 306.67 10^{-3}m/s ➔ Unst annular 311.39 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 320.83 10^{-3} m/s ➔ Annular	 Flow	82.57 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 320.83 10^{-3} m/s ➔ Slug with different sizes.
	 Flow	323.19 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 778.48 10^{-3} m/s ➔ Annular	 Flow	323.2 10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 778.5 10^{-3}m/s ➔ Slug/Annular

IV. 3 Cartes d'écoulements

Les facteurs géométriques (nature, taille et géométrie du canal, conditions d'entrée), les conditions opératoires, les propriétés des fluides et la présence de singularité dans les circuits fluidiques peuvent influencer les structures d'écoulement.

A partir de l'ensemble des résultats obtenus, nous pouvons établir des cartes d'écoulement diphasiques dans les deux zones d'intérêts L/D = 10 et L/D = 420 indiquant les différentes structures observées suivant les vitesses apparentes des fluides correspondantes. Les cartes d'écoulement permettent de définir les différents types de structures d'écoulement mais ne permettent pas de distinguer les modifications produites au sein de chaque type de structure. Nous allons dans ce qui suit, porter une attention particulière à la présentation des résultats obtenus pour la délimitation des types de structures et leurs variations dans la zone de formation du mélange (L/D=10) et en aval de cette zone (L/D=420).

IV.3.1 Carte d'écoulement dans la zone de formation du mélange diphasique à L/D = 10

Les structures d'écoulements visualisées à l'entrée du tube de test sont répertoriées sur la carte de la figure IV. 8. Les courbes délimitent les structures principales observées dans la zone de mélange à L/D = 10: Bulles (Dispersed bubbly flow, bubble train flow), Poches-

bouchon (Slug flow), Annulaire (Annular flow). Pour cette dernière structure, elle peut être stable ou instable comme nous l'avons décrit au paragraphe précédent. Cette représentation ne permet pas une description fine des structures d'écoulement. En effet, pour la structure à bulles par exemple, la taille et la répartition des bulles varient selon les vitesses des phases liquide et gazeuse .

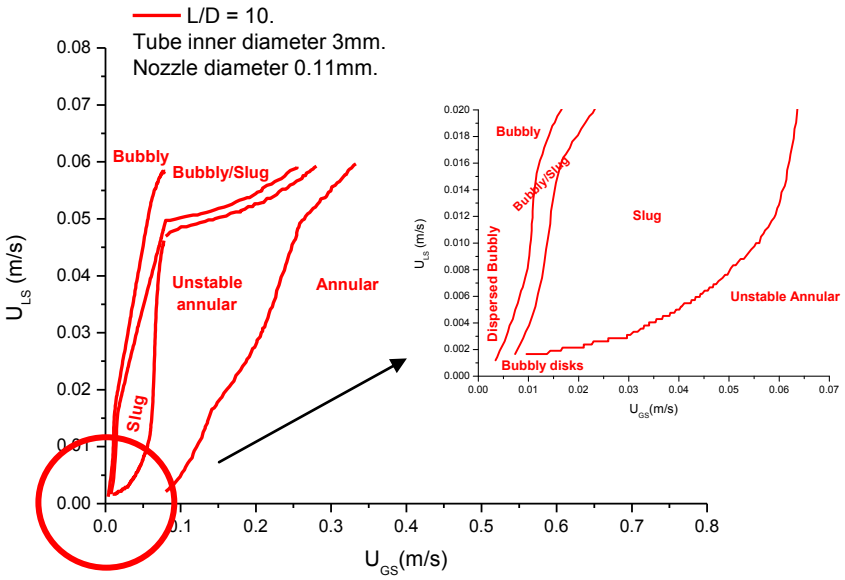


FIG. IV. 8 Carte de structures d'écoulements diphasiques air/eau dans un tube horizontal de 3 mm de diamètre intérieur et avec une aiguille d'injection d'air de 110 µm de diamètre intérieur, établie à la zone où le mélange est effectué.

A très faibles vitesses apparentes du liquide et du gaz, les bulles formées sont de petite taille et occupent toute la section droite du tube. Ce mélange s'écoule lentement le long de la conduite. En augmentant la vitesse de la phase liquide, les bulles formées sont moins nombreuses et s'alignent en train de bulles dont les tailles sont plus uniformes en augmentant la vitesse du liquide.

En augmentant la vitesse apparente du gaz, par de très petits incréments, la structure à bulles dispersées transite vers une structure d'écoulement atypique à multi disques (Bubbly discs flow pattern). Cette structure est un empilement de disques de gaz réguliers. La structure à multi disques se développe jusqu'à une vitesse critique donnée à partir de laquelle il y a formation d'une structure annulaire qui occupe la majorité de la carte d'écoulement dans les gammes de vitesses étudiées. Cette structure annulaire peut-être stable ou instable et ce suivant les vitesses apparentes des deux phases (voir § précédent).

A partir d'une vitesse apparente du liquide critique (U_{LS} = 30 x 10^{-3} m/s dans ce cas), la structure à poche-bouchon (Slug flow) apparaît pour des vitesses apparentes du gaz intermédiaires (U_{GS} = 40.22 x 10^{-3} m /s) (Figure 31). La taille des poches (Slug) varie selon les vitesses des phases. Une augmentation de la vitesse du liquide entraine une diminution de la taille des poches (Slug) tandis que la taille de ces poches (Slug) augmente avec la vitesse apparente du gaz.

Ces trois structures principales sont séparées successivement par des zones de transition bulles/poches-bouchon (Bubbly/Slug) et poche-bouchon /annulaire (Slug/Annular). Ces zones de transition ont été mises en évidence grâce à une bonne maitrise des débits des phases à l'entrée de la conduite et de la technique de visualisation développée (voir par exemple la Fig IV. 3. b).

IV. 3. 2 Carte d'écoulement dans la zone à L/D = 420 et comparaison avec celle dans la zone d'entrée de la conduite L/D = 10 :

La figure (IV. 9) représente la carte d'écoulement dans la zone située à L/D = 420 de l'entrée de la conduite de test. Pour les vitesses apparentes du liquide très faibles U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s, les différentes structures observées à l'entrée de la conduite disparaissent loin de la zone d'entrée de la conduite. Les observations effectuées dans la zone L/D = 420, révèlent une structure à poche-bouchon (Slug flow). Au-delà d'une vitesse apparente du gaz égale à U_{GS} = 297.24 x 10^{-3} m/s, c'est la structure annulaire qui prend place.

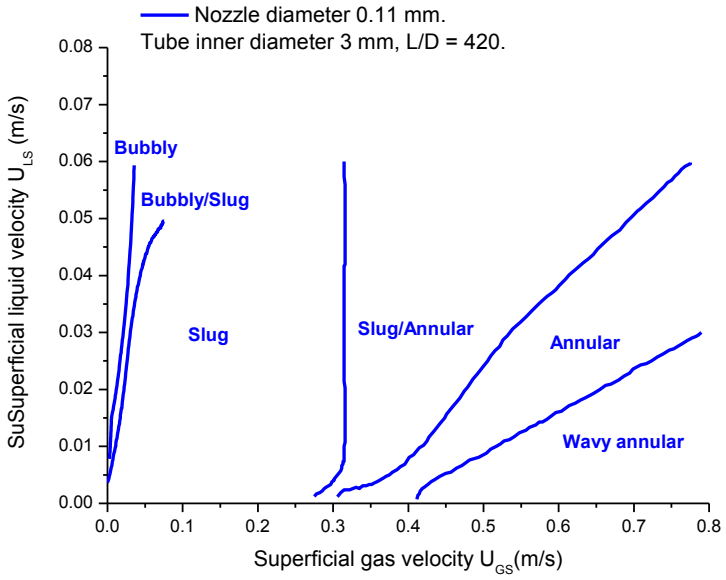


FIG. IV. 9 Carte de structures d'écoulements diphasiques air/eau dans un tube horizontal de 3mm de diamètre intérieur et avec une aiguille d'injection d'air de 110 µm de diamètre intérieur, établie à 128cm à partir de l'entrée de tube de test.

Pour ce régime, les tailles respectives des poches et des bouchons diffèrent selon la vitesse apparente du gaz. Avec l'augmentation de la vitesse du gaz, la taille des poches croit tandis que celle des bouchons décroit.

Au delà d'une vitesse critique de la phase liquide, nous retrouvons les principales structures d'écoulements observées à l'entrée de la conduite ainsi que les zones de transitions associées excepté pour les très faibles vitesses de la phase liquide ($U_{LS} < 0.78 \times 10^{-3}$ m/s).

Pour la structure à bulles, nous observons des trains de mono bulles qui défilent le long de la conduite. La structure à bulles dispersées, observées à l'entrée de la conduite, disparaît dans cette zone par suite de coalescences successives. Comme pour la zone d'entrée, l'augmentation de la vitesse de la phase liquide produit des bulles de taille de plus en plus petites et uniformes.

La zone de transition bulles/poche-bouchon apparaît pour des vitesses de gaz inférieures à celle de la zone d'entrée. Ce comportement s'explique par le phénomène de coalescence qui a commencé à se manifester pour la structure à bulle. L'augmentation de la vitesse de la phase gazeuse engendre de bulles de tailles de plus en plus importantes qui au fur et à mesure qu'elles avancent dans le tube coalescent donnant lieu ainsi à une structure à poche-bouchon (Slug flow).

La structure à Poche-bouchon (Slug flow) apparaît dans une gamme de vitesse apparente de gaz plus importante que dans la zone de formation du mélange. A L/D=420 et pour une vitesse apparente du liquide égale à $U_{LS} = 40 \times 10^{-3}$ m/s, cette zone s'étale dans le sens croissant de vitesse apparente du gaz de $U_{GS} = 42.09 \times 10^{-3}$ m/s à $U_{GS} = 314.44 \times 10^{-3}$ m/s. Pour L/D=10, elle s'étale de $U_{GS} = 59.99 \times 10^{-3}$ m/s à $U_{GS} = 70.89 \times 10^{-3}$ m/s.

Cet étalement résulte d'une structure annulaire instable se formant au niveau de la zone d'entrée à L/D=10. En effet, comme nous l'avions expliqué dans le paragraphe précédent, lorsque l'épaisseur du film liquide est suffisamment importante, les effets capillaires déstabilisent la structure annulaire pour donner lieu à une structure à poche bouchon (Slug flow) qui perdure sur une gamme de vitesses du gaz importante. Au-delà, l'épaisseur du film liquide devient suffisamment fine sur toute la circonférence du tube pour éviter le développement de perturbations induites par les effets capillaires. C'est pour cette raison que la structure annulaire apparaît pour une vitesse apparente du gaz égale à $U_{GS} = 613.72 \times 10^{-3}$ m/s à L/D=420 ; tandis qu'à L/D=10, la structure annulaire apparaît à $U_{GS} = 70.89 \times 10^{-3}$ m/s soit un étalement sur une gamme de vitesse 9 fois supérieure.

Pour conclure, les cartes d'écoulement observées à l'entrée L/D=10 et en aval à L/D=420, diffèrent notablement (Fig. IV. 10). Ces différences de comportement sont attribuées aux contraintes (inertie, cisaillement, interfaciales) qui diffèrent selon la position dans la conduite. A l'entrée de la conduite, les écoulements sont fortement perturbés tandis qu'en aval de cette zone l'écoulement diphasique s'établit pour engendrer un écoulement diphasique « laminaire ».

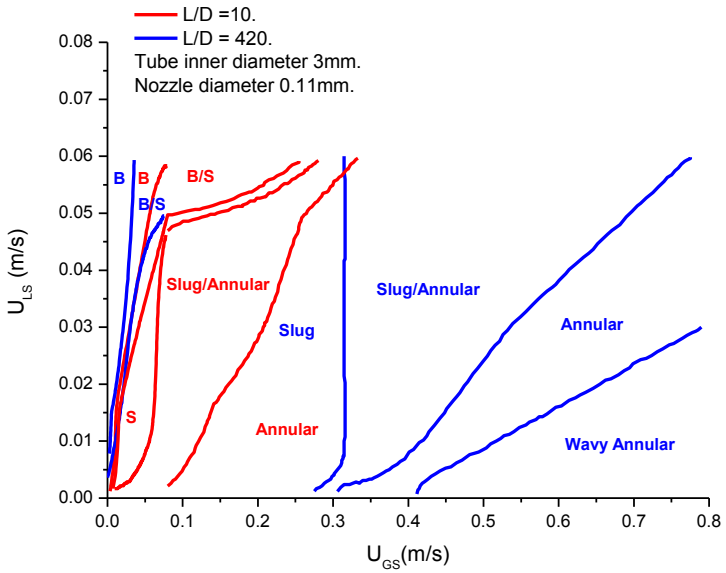


FIG. IV. 10 Comparaison entre les cartes établies au niveau de la zone de mélange et à 1280mm de l'entrée du tube de test de 3mm de diamètre et une aiguille d'injection du gaz à 110 µm diamètre intérieur.

IV. 4 Influence du diamètre de la buse d'injection

Une même série d'expérience a été réalisée avec un tube d'injection de la phase gazeuse de diamètre 260 µm. Les cartes d'écoulement obtenues à L/D=420 sont semblables à celles obtenues pour un diamètre du tube égal à 110 µm (Fig. IV. 11). Les lignes de transition entre les structures principales sont peu modifiées excepté pour la transition de la structure poche-bouchon/annulaire (Slug/Annular). Comme on peut le voir sur la Figure (IV. 11), en remplaçant l'aiguille de 260 µm avec celle de 110 µm, les lignes de transitions sont légèrement déplacées vers les plus faibles vitesses apparentes du gaz. Cette modification est probablement provoquée par deux effets. Le premier est lié à la formation de la phase gazeuse dans la zone de mélange et le second est dû à la modification du film liquide pour ces deux configurations. Une analyse détaillée de ces deux effets est nécessaire pour une meilleure interprétation de l'influence du diamètre de bec sur la carte d'écoulement dans la zone de mélange et au loin.

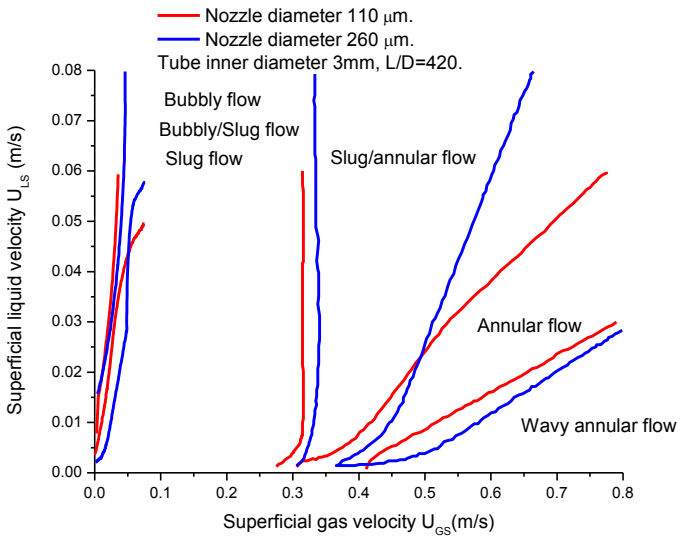


FIG. IV. 11 Comparaison entre les cartes établies avec une conduite de test de 3mm de diamètre et une aiguille d'injection du gaz à 110 μm et 260 μm de diamètre intérieur à 1280mm à partir du tube de test.

Conclusion

Un dispositif expérimental a été conçu et réalisé pour étudier les écoulements diphasiques gaz-liquide dans des conduites de diamètres de tailles millimétriques (3mm – 0.8mm). L'étude expérimentale est effectuée pour analyser les écoulements diphasiques avec des conditions d'entrée les mieux maitrisées possibles.

Nous avons présenté les résultats obtenus des structures d'écoulements diphasiques air-eau dans un tube de diamètre intérieur de 3 mm pour une orientation horizontale. Nous avons présenté les structures des écoulements diphasiques à l'entrée L/D=10 de la conduite où est crée le mélange diphasique et en aval de l'entrée à L/D=420.

Aux très faibles vitesses de la phase liquide, nous avons mis en évidence une structure à empilement de disques de gaz dans la phase liquide s'écoulant en film dans la zone d'entrée de la conduite. Cette structure se substitue à celle d'un écoulement à poche loin de la zone d'entrée.

Pour une vitesse de liquide critique, les structures d'écoulements observées sont analogues à celles déjà rapportées dans la littérature. A la différence des études précédentes, nous avons observé ces structures dans des gammes de vitesses très différentes de celles usuellement étudiées dans la littérature. Ces gammes de vitesses donnent lieu à des écoulements diphasiques ‘’laminaire’’ où les interfaces sont lisses. Ces structures

correspondent à des faibles vitesses des phases contrairement à la majorité des structures d'écoulements observées pour de grandes vitesses et où les interfaces sont ''turbulentes''.

Les cartes d'écoulement établies à l'entrée et loin en aval de la conduite diffèrent notablement par suite des modifications des contraintes suivant la position dans la conduite. Une structure observée à l'entrée de la conduite peut évoluer au fur et à mesure qu'elle se propage le long de la conduite. Pour les structures à bulles crées dans la zone d'entrée, les bulles coalescent pour former de plus grosses bulles voire des poches en aval de la conduite. Pour les structures annulaires formées à l'entrée, celles-ci peuvent être instables si le film liquide est suffisamment épais et donner lieu à des structures poches-bouchon.

Les perspectives à ces travaux consisteront à étudier les écoulements diphasiques par simulations numériques afin d'évaluer les contraintes s'exerçant sur les phases et les épaisseurs du film liquide pour les structure à poche et annulaire. Nous poursuivrons également les investigations expérimentales en étudiant l'influence de l'orientation du tube sur les structures d'écoulement diphasique.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Un dispositif expérimental a été conçu et réalisé par Zeguai et al., 2013 pour étudier les écoulements diphasiques gaz-liquide dans des conduites de diamètres de tailles millimétriques (3mm – 0.8mm). L'étude expérimentale est effectuée pour analyser les écoulements diphasiques avec des conditions d'entrée les mieux maîtrisées possibles.

Nous avons utilisés la base de données de Zeguai et al., 2013 afin de présenté les résultats obtenus des structures d'écoulements diphasiques air-eau dans un tube de diamètre intérieur de 3 mm pour une orientation horizontale. Nous avons présenté les structures des écoulements diphasiques à l'entrée L/D=10 de la conduite où est crée le mélange diphasique et en aval de l'entrée à L/D=420.

Pour une vitesse de liquide critique, les structures d'écoulements observées sont analogues à celles déjà rapportées dans la littérature. A la différence des études précédentes, nous avons observé ces structures dans des gammes de vitesses très différentes de celles usuellement étudiées dans la littérature. Ces gammes de vitesses donnent lieu à des écoulements diphasiques ''laminaire'' où les interfaces sont lisses. Ces structures correspondent à des faibles vitesses des phases contrairement à la majorité des structures d'écoulements observées pour de grandes vitesses et où les interfaces sont ''turbulentes''.

Les cartes d'écoulement établies à l'entrée et loin en aval de la conduite diffèrent notablement par suite des modifications des contraintes suivant la position dans la conduite. Une structure observée à l'entrée de la conduite peut évoluer au fur et à mesure qu'elle se propage le long de la conduite. Pour les structures à bulles crées dans la zone d'entrée, les bulles coalescent pour former de plus grosses bulles voir des poches en aval de la conduite. Pour les structures annulaires formées à l'entrée, celles-ci peuvent être instables si le film liquide est suffisamment épais et donner lieu à des structures poches-bouchon.

La perspectives à ces travaux consisteront à étudier les écoulements diphasiques par simulations numérique afin d'évaluer les contraintes s'exerçant sur les phases et les épaisseurs du film liquide pour les structure à poche et annulaire. Nous poursuivrons également les investigations expérimentales en étudiant l'influence de l'orientation du tube sur les structures d'écoulement diphasique.

REFERENCES

Les Références :

Abiev. R. Sh, 2008. Simulation of the Slug Flow of a Gas–Liquid System in Capillaries. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2008, Vol. 42, No. 2, pp. 105–117.

Abiev. R. Sh, 2008. Simulation of the Slug Flow of a Gas–Liquid System in Capillaries. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2008, Vol. 42, No. 2, pp. 105–117.

Akbar. M.K, Plummer. D.A, Ghiaasiaan. S.M, 2003. On gas–liquid two-phase flow regimes in microchannels. International Journal of Multiphase Flow 29 (2003) 855–865.

Akbar. M.K, Plummer. D.A, Ghiaasiaan. S.M, 2003. On gas–liquid two-phase flow regimes in microchannels. International Journal of Multiphase Flow 29 (2003) 855–865.

Alves, G.E. Co-current liquid–gas flow in a pipe-line contactor, CEP 50 (9) (1954) 449–456.

Amador. C, Salman. W, Sanguanpiyapan. S, Gavriilidis. A, Angeli. P, 2004. Effect of gas-inlet conditions on the mechanism of Taylor flow formation. 5th Inte. Conf on Multiphase flow, ICMF'04, Report SP-515, Yokohama.

Anderson G.H., P.D. Hills, Two phase annular flow in tube bends, in:IChemE. Symp. Ser.,vol. 38, Paper J1, 1974, pp. 1–21.

Andersson. Helene, Van den Berg. Albert, 2003. Microfluidic devices for cellomics: a review. Sensors and Actuators B 92 315–325.

Anduze. Marc, Colin. Stephane, Caen. Robert, Camon. Henri, Conedera. Veronique and Do Conto. Thierry, 2001. Analysis and testing of a fluidic vortex microdiode. J. Micromech. Microeng. 11 108–112.

Baker (1954). (Flux simultané de pétrole et de gaz), oil and gas J.53.PP.183-195. BELGACEM.I, SI-AHMED, E-K and J. LEGRAND. CFD modeling of oil-water annularflow across a sudden contraction in horizontal circular pipe. 66th Canadian Chemical Engineering Conference. 16-19 Octobre 2016, Quebec City, Canada.

Baker. O, 1954. Simultaneous flow of oil and gas. Oil and Gas Journal 53, 185–190.

Balamurugan. S, Lad. Mayank D, Gaikar. Vilas G, Patwardhan. Ashwin W, 2007. Hydrodynamics and mass transfer characteristics of gas–liquid ejectors. Chemical Engineering Journal 131 (2007) 83–103.

Balamurugan. S, Lad. Mayank D, Gaikar. Vilas G, Patwardhan. Ashwin W, 2007. Hydrodynamics and mass transfer characteristics of gas–liquid ejectors. Chemical Engineering Journal 131 (2007) 83–103.

Barajas. A.M, Panton. R.L, 1993. The effects of contact angle on two-phase flow in capillary tubes. Int. J. Multiphase Flow 19, 337–346.

Barnea. D, Luninski. Y, Taitel. Y, 1983. Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes. The Can. J. Chem. Eng. 61, 617–620.

Baroczy C.J, A systematic correlation for two phase pressuredrop, in: Chem. Eng. Prog.Symp. Ser., vol. 62(64), 1966, pp.232–249.

Belgacem.I , Salhi.Y, Si-Ahmed.E-K, Hydrodynamic Study Using CFD Simulations in a Horizontal Two-Phase Flow Through Sudden Contraction, American Journal of Mechanical and Industrial Engineering. Vol. 2, No. 1, 2017, pp. 8-16. doi: 10.11648/j.ajmie.20170201.12

Bercic. G and Pintar. A, 1997. The role of gas bubbles and liquid slug lengths on mass transport in the Taylor flow through capillaries. Chemical engineering science, Vol. 52, Nos. 21, 22, pp. 3709-3719.

Bhagwat. Swanand M, Ghajar. Afshin J, 2012. Similarities and differences in the flow patterns and void fraction in vertical upward and downward two phase flow. Experimental Thermal and Fluid Science 39 213–227.

Bhunia, A., Pais, S.C., Kamotani, Y., Kim, I.H., 1998. Bubble formation in a coflow configuration in normal and reduced gravity. AIChE J. 44, 1495–1509.

Bi. Q.C, Zhao. T.S, 2001. Taylor bubbles in miniaturized circular and noncircular channels. International Journal of Multiphase Flow 27 (2001) 561-570.

Bi. Q.C, Zhao. T.S, 2001. Taylor bubbles in miniaturized circular and noncircular channels. International Journal of Multiphase Flow 27 (2001) 561-570.

Boelter. L.M.K., Kepner. R.H, 1939. Pressure drop accompanying two-component flow through pipes, Ind. and Eng. Chem. 31 (4) 315-323.

Bousman. W. S, McQuillen, Witte. L. C, 1996. Gas-liquid flow patterns in microgravity: Effects of tube diameter, liquid viscosity and surface tension. Int. J. Multiphase flow Vol. 22, N°. 6, pp. 1035-1053.

Bousman. W. S, McQuillen, Witte. L. C, 1996. Gas-liquid flow patterns in microgravity: Effects of tube diameter, liquid viscosity and surface tension. Int. J. Multiphase flow Vol. 22, N°. 6, pp. 1035-1053.

Brauner. N, Barnea. D., 1986. Slug/Churn transition in upward gas-liquid flow. Chemical Engineering Science Vol 41, N0. 1, pp. 159-163.

Brauner. N, Ullmann. A. The Prediction of Flow Boiling Maps in Minichannels. 4th Japanese–European Two-Phase Flow Group Meeting, Kyoto, 2006.

Bruce J.M, Two-phase flow in straight pipe and 90_ bends, Ph.D.Thesis, Univ. Aberdeen,1971.

I. ChemE. Symp. Ser., vol. 38, Paper J2, 1974, pp. 1–22.

Chen. Kuan, Wu. Ye-Ee, 2000. Thermal analysis and simulation of the microchannel flow in miniature thermal conductivity detectors. Sensors and Actuators 79_2000. 211–218.

Chen. L, Tian Y.S, Karayiannis. T.G, 2006. The effect of tube diameter on vertical two-phase

Chen. L, Tian. Y. S, Karayiannis. T. G, 2004. R134a flow patterns in small-diameter tubes. Proc. IMechE Vol. 219 Part E: J. Process Mechanical Engineering.

Chen. L, Tian. Y. S, Karayiannis. T. G, 2004. R134a flow patterns in small-diameter tubes. Proc. IMechE Vol. 219 Part E: J. Process Mechanical Engineering.

Chen. L, Tian. Y. S, Karayiannis. T. G, 2006. The effect of tube diameter on vertical two-phase regimes in small tubes. Int. J. Heat Mass Transfer 49, 4220–4230.

Chen. W.L, Twu. M.C, Pan. C, 2002. Gas–liquid two-phase flow in micro-channels. Int. J. of Multiphase Flow 28 1235–1247.

Chenoweth J.M. Martin., M.W, Turbulent two-phase flow, Pet. Ref.34 (10) (1955) 151–155. Chisholm D, Two-phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers,Godwin, 1983, pp. 154–156. Crawford N.M, G. Cunningham, P.L. Spedding, Prediction of pressure drop for turbulent fluid flow in 90_ bends, Proc. Inst. Mech.Eng. 217E (2003) 1–3.

Chinnov. E. A. and Kabov. O. A., 2006. Two-Phase Flows in Pipes and Capillary Channels. High Temperature. Vol. 44, No. 5, pp. 773–791.

Choi. C, Yu. Dong In, Kim. M, 2011. Surface wettability effect on flow pattern and pressure drop in adiabatic two-phase flows in rectangular microchannels with T-junction mixer. Experimental Thermal and Fluid Science 35 (2011) 1086–1096.

Choi. C, Yu. Dong In, Kim. M, 2011. Surface wettability effect on flow pattern and pressure drop in adiabatic two-phase flows in rectangular microchannels with T-junction mixer. Experimental Thermal and Fluid Science xxx (2011) xxx–xxx.

Chung. P.M.-Y, Kawaji. M, 2004. The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannels. Int. J. of Multiphase Flow 30 735–761.

Coleman. J. W, Garimella. S, 1999. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes. Int. J. Heat Mass Transfer 42, 2869-2881.

Colin. C and Fabre. J, 1995. Gas-liquid pipe flow under microgravity conditions: Influence of tube diameter on flow patterns and pressure drops. A& Space Res. Vol. 16, No. 7. pp. (7)137-(7)142, 1995.

Colin. C and Fabre. J, 1995. Gas-liquid pipe flow under microgravity conditions: Influence of tube diameter on flow patterns and pressure drops. A& Space Res. Vol. 16, No. 7. pp. (7)137-(7)142, 1995.

Colin. S, Anduze. M, Lalonde. P, Caen. R, Baldas. L, 2002. Analysis of gas and liquid flows in micro-ducts: delinking of the experimental uncertainties. Congrès SHF "*Microfluidique*" - Toulouse - décembre 2002.

Collier et Thom (1994).

Collier. J. G & Thome. J. R, 1994. Convective boiling and condensation. Third edn. Oxford Clarendon Press.

Crawford. T. J., Weinberger. C. B, 1985. Two-phase flow patterns and void fraction in downward flow Part I: Steady state flow patterns, Int. J. of Multiphase flow 11 (6) 761-782.

Cubaud. T and Ho. Chih-Ming, 2004. Transport of bubbles in square microchannels. Physics of fluids, Vol. 16, No. 12. Pp. 4575-4585.

Cubaud. T, Ulmanella. U, Ho. Chih-Ming, 2006. Two-phase flow in microchannels with surface modifications. Fluid Dynamics Research 38 (2006) 772–786.

Cubaud. T, Ulmanella. U, Ho. Chih-Ming, 2006. Two-phase flow in microchannels with surface modifications. Fluid Dynamics Research 38 (2006) 772–786.

Cubaud. T, Ulmanella. U, Ho. Chih-Ming, 2006. Two-phase flow in microchannels with surface modifications. Fluid Dynamics Research 38 (2006) 772–786.

Cubaud. T, Ulmanella. U, Ho. Chih-Ming, 2006. Two-phase flow in microchannels with surface modifications. Fluid Dynamics Research 38 (2006) 772–786.

Damianides. C.A, Westwater. J.W, 1988. Two-phase flow patterns in a compact heat exchanger and in small tubes. In: Proceedings of the Second UK National Conference on Heat Transfer, pp. 1257–1268.

Delhaye J.M (1981). M.Giot et Riethmuller .M.L Eds 1981 Thermohydraulics of two phase systems for industrial design and Engineering.Hemesphere/ Mac grow. Hill.

Deobold T.L, An experimental investigation of two-phase pressure losses in pipe elbows,MSc., Univ. Idaho, Chem. Eng., Rept. HW-SA 2564, 1962.

Dutkowski. K, 2009. Two-phase pressure drop of air–water in minichannels. International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 5185–5192.

Dutkowski. K, 2009. Two-phase pressure drop of air–water in minichannels. International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 5185–5192.

Egry. I, Ricci. E, Novakovic. R, Ozawa. S, 2010. Surface tension of liquid metals and alloys — Recent developments. Advances in Colloid and Interface Science 159 (2010) 198–212.

Egry. I, Ricci. E, Novakovic. R, Ozawa. S, 2010. Surface tension of liquid metals and alloys — Recent developments. Advances in Colloid and Interface Science 159 (2010) 198–212.

Fitzsimmons P.E, Two phase pressure drop in pipe components.General Electric Res., ReptHW-80970 Rev 1, 1964.

flow regimes in small tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer 49 (2006) 4220–4230.

Freeston D.H, Duct losses in a geothermal steam water flow, Univ. Auckland, Dept. Mech.Eng., Rept. 78/5, 1978.

Freeston D.H.Dole, H, Duct losses in a two-phase steam water flow, in: Aust. Hydo. FluidMech. Conf., vol. 6, 1977, pp. 210–215.

Fukano. T and Furukawa, 1997. Prediction of the effects of fluid viscosity on interfacial shear stress and frictional pressure drop in vertical upward gas-liquid annular flow. Int. J. Multiphase flow Vol. 24, No. 4, pp. 587-603, 1997.

Fukano. T and Furukawa, 1997. Prediction of the effects of fluid viscosity on interfacial shear stress and frictional pressure drop in vertical upward gas-liquid annular flow. Int. J. Multiphase flow Vol. 24, No. 4, pp. 587-603, 1997.

Fukano. T, Kariyasaki. A, 1993. Characteristics of gas–liquid two-phase flow in a capillary. Nucl. Eng. Des. 141, 59–68.

Furukawa. T, Fukano. T, 2001. Effects of liquid viscosity on flow patterns in vertical upward gas-liquid two-phase flow. Int. J. Multiphase flow 27, , pp. 1109-1126, 2001.

Furukawa. T, Fukano. T, 2001. Effects of liquid viscosity on flow patterns in vertical upward gas-liquid two-phase flow. Int. J. Multiphase flow 27, , pp. 1109-1126, 2001.

G

Galbiati. L, Andreini. P, 1994. Flow pattern transition for horizontal air–water flow in capillary tubes. A microgravity equivalent system simulation. Int. Commun. Heat Mass Transfer 21, 461–468.

Garstecki. P, Fuerstman. Michael J, Stone. Howard A and Whitesides. George M, 2006. Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of break-up. Lab Chip, 2006, 6, 437–446.

Garstecki. P, Fuerstman. Michael J, Stone. Howard A and Whitesides. George M, 2006. Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of break-up. Lab Chip, 2006, 6, 437–446.

Garstecki. P, Ganan-Calvo. A.M, and Whitesides. G.M, 2005. Formation of bubbles and droplets in microfluidic systems. Bulletin of the polish academy of science Vol. 53, No. 4, 2005.

Garstecki. P, Ganan-Calvo. A.M, and Whitesides. G.M, 2005. Formation of bubbles and droplets in microfluidic systems. Bulletin of the polish academy of science Vol. 53, No. 4, 2005.

Garstecki. P, Stone. Howard A, and Whitesides. George M, 2005. Mechanism for Flow-Rate Controlled Breakup in Confined Geometries: A Route to Monodisperse Emulsions. Physical review letters, PRL 94, 164501 (2005).

Garstecki. P, Stone. Howard A, and Whitesides. George M, 2005. Mechanism for Flow-Rate Controlled Breakup in Confined Geometries: A Route to Monodisperse Emulsions. Physical review letters, PRL 94, 164501 (2005).

Gnyloskurenko, S.V., Byakova, A.V., Raychenko, O.I., Nakamura, T., 2003. Influence of wetting conditions on bubble formation at orifice in an inviscid liquid. Transformation of bubble shape and size. Colloid. Surf. A 218, 73–87.

Golan. L, 1968. An Air–Water Study of Vertical Upward and Downward Two Phase Flow. PhD Thesis, Leigh University, 1968.

Govier et Aziz (1972), Govier G.W et Aziz K.1972 The flow of complex mixtures in piper.Van No strand-Reinhold .

Graf .E. Neti S, Two-phase flow pressure drop in right angle bends,J. Fluids Eng. 122 (2000)761–768.

Gu. Z. H. and Fahidy. T. Z., 1985. Visualization of flow patterns in axial flow between horizontal coaxial rotating cylinders. Can. J. Chem. Eng. 63 2, pp. 14–21.

Günther. A and Jensen. Klavs F, 2006. Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis. Lab Chip, 2006, 6, 1487–1503.

Günther. A and Jensen. Klavs F, 2006. Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis. Lab Chip, 2006, 6, 1487–1503 | 1487.

H

Haim. M, Weiss. Y, Kalman. H and Ullmann. A, 2003. The effect of the inlet conditions on the numerical solutions of particle–gas flows. Advanced Powder Technol., Vol. 14, No. 1, pp. 87–110 (2003).

Haim. M, Weiss. Y, Kalman. H and Ullmann. A, 2003. The effect of the inlet conditions on the numerical solutions of particle–gas flows. Advanced Powder Technol., Vol. 14, No. 1, pp. 87–110 (2003).

Han. Y, Shikazono. N, 2009. Measurement of liquid film thickness in micro square channel. Int. J. of Multiphase Flow 35 (2009) 896–903.

Han. Y, Shikazono. N, 2009. Measurement of liquid film thickness in micro square channel. International Journal of Multiphase Flow xxx (2009) xxx–xxx.

Hassan. I., Vaillancourt, M., Pehlivan, K., 2005. Two-phase flow regime transitions in microchannels: a comparative experimental study. Microscale Thermophys. Eng. 9, 165–182.

Haverkamp. V, Hessel. V, Löwe. H, Menges. G, Warnier. Maurice J. F, Rebrov. Evgeny V, de Croon. Mart H. J. M, Schouten. Jaab C, Liauw. Marcel A, 2006. Review Hydrodynamics and Mixer-Induced Bubble Formation in Micro Bubble Columns with Single and Multiple-Channels. Chem. Eng. Technol. 2006, 29, No. 9, 1015–1026.

Haverkamp. V, Hessel. V, Löwe. H, Menges. G, Warnier. Maurice J. F, Rebrov. Evgeny V, de Croon. Mart H. J. M, Schouten. Jaab C, Liauw. Marcel A, 2006. Review Hydrodynamics and Mixer-Induced Bubble Formation in Micro Bubble Columns with Single and Multiple-Channels. Chem. Eng. Technol. 2006, 29, No. 9, 1015–1026.

Hewitt G.F (1982), Flow regimes, pressure drop void fraction handbook of multiphase systems sections 2.1-2.3 Ed G.Hetsruni, New York McGraw. Hill Book Company.

Hewitt. G, Roberts. D. Studies of Two-phase Flow Patterns by Simultaneous Xray and Flash Photography. Technical Report, Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Report No. AERE-M 2159, 1969.

Hoang K, Davies.M.R, Flow structure and pressure loss for two phase flow in return bends, J.Fluids Eng. 106 (1984) 30–37.

Hoek. I, Nijhuis. T.A, Stankiewicz. A.I, Moulijn. J.A, 2004. Performance of the monolithic stirrer reactor: applicability in multi-phase processes. Chemical Engineering Science 59, 4975 – 4981.

Hu. Rui, Feng. Xiaojun, Chen. Pu, Fu. Meng, Chen. Hong, Guo. Lin, Liu. Bi-Feng, 2011. Rapid, highly efficient extraction and purification of membrane proteins using a microfluidic continuous-flow based aqueous two-phase system. Journal of Chromatography A, 1218 171–177.

Ide. H, Kariyasaki. A, Fukano. T, 2007. Fundamental data on the gas–liquid two-phase flow in minichannels. International Journal of Thermal Sciences 46 (2007) 519–530.

Ide. H., Kariyasaki. A., Fukano. T., 2007. Fundamental data on the gas–liquid two-phase flow in minichannels. Int. J. of Therm. Sci. 46, 519–530.

In. Wang Kee, Lee. Sang Yong, 1998. Examination of interfacial shape and onset of slugging of a stratified flow at a combining Y-junction. International Journal of Heat and Fluid Flow 19 (1998) 31-38.

In. Wang Kee, Lee. Sang Yong, 1998. Examination of interfacial shape and onset of slugging of a stratified flow at a combining Y-junction. International Journal of Heat and Fluid Flow 19 (1998) 31-38.

Irandoust. S and Andersson. B, 1988. Mass transfer and liquid-phase reactions in a segmented two-phase flow monolithic catalyst reactor. Chemical engineering science, Vol. 43, No. 8, pp. 1983-1988.

Irandoust. S and Andersson. B, 1989. Simulation of flow and mass transfer in Taylor flow through a capillary. Computer chem. Engng, Vol. 13, No. 4/5, pp. 519-526.

Jones. Jr. O. C and Zuber. N, 1975. The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow. Int. J. Multiphase flow 2 273-306.

K

Kandlikar. Satish G, 2002. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. Experimental Thermal and Fluid Science 26, 389–407.

Kandlikar. Satish G, Garimella. S, Li. D, Colin. S, King. M.R. Heat transfert and fluid flow in minichannels and microchannels. First edition 2006, Elsevier Ltd.

Kariyasaki. A., Fukano. T., Ousaka., A, Kagawa. M., 1992. Isothermal air-water two-phase up and downward flows in a vertical capillary tube (1st report, flow pattern and void fraction). Trans. JSME (Ser. B) 58, 2684-2690, in Japanese.

Kashid. Madhvanand N, Agar. David W, 2007. Hydrodynamics of liquid–liquid slug flow capillary microreactor : Flow regimes, slug size and pressure drop. Chemical Engineering Journal 131 (2007) 1–13.

Kashid. Madhvanand N, Agar. David W, 2007. Hydrodynamics of liquid–liquid slug flow capillary microreactor : Flow regimes, slug size and pressure drop. Chemical Engineering Journal 131 (2007) 1–13.

Kawahara. A, Chung. P.M.-Y, Kawaji. M, 2002. Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel. Int. J. of Multiphase Flow 28 1411–1435.

Kawahara. A, Sadatomi. M, Nei. K, Matsuo. H, 2009. Experimental study on bubble velocity, void fraction and pressure drop for gas–liquid two-phase flow in a circular microchannel. International Journal of Heat and Fluid Flow 30 (2009) 831–841.

Kawahara. A, Sadatomi. M, Nei. K, Matsuo. H, 2009. Experimental study on bubble velocity, void fraction and pressure drop for gas–liquid two-phase flow in a circular microchannel. International Journal of Heat and Fluid Flow xxx (2009) xxx–xxx

Kawaji. M, Chung. P. M.-Y, 2004. Adiabatic gas–liquid flow in microchannels. Microscale Thermophysical Engineering 8 239–257.

Kew. P, Cornwell. K, 1997. Correlations for prediction of flow boiling heat transfer in small-diameter channels, Applied Thermal Engineering 17, 705–715.

Kim, I., Kamotani, Y., Ostrach, S., 1994. Modelling bubble and drop formation in flowing liquids in microgravity. AIChE J. 40, 19–28.

Kimura. Motoaki, Tung. Steve, Lew. James, Ho. Chih-Ming, Jiang. Fukang; Tai. Yu-Chong, 1999. Measurements of wall shear stress of a turbulent boundary layer using a micro-shear-stress imaging chip. Fluid Dynamics Research 24 329-342.

Kreutzer. Michiel T, Kapteijn. F, Moulijn. Jacob A, Heiszwolf. Johan J, 2005. Multiphase monolith reactors: Chemical reaction engineering of segmented flowin microchannels. Chemical Engineering Science 60 (2005) 5895 – 5916.

Kreutzer. Michiel T, Kapteijn. F, Moulijn. Jacob A, Heiszwolf. Johan J, 2005. Multiphase monolith reactors: Chemical reaction engineering of segmented flowin microchannels. Chemical Engineering Science 60 (2005) 5895 – 5916.

Kumar, R., Kuloor, N.R., 1967. Chem. Technol. 19, 733.

Kutateladze S.S, Problems of Heat Transfer and Hydraulics of Twophase Media, Pergamon,Oxford, 1969.

L

Leclerc. A, Philippe. R, Houzelot. V, Schweich. D, de Bellefon. C, 2010. Gas–liquid Taylor flow in square micro-channels: New inlet geometries and interfacial area tuning. Chemical Engineering Journal 165 (2010) 290–300.

Leclerc. A, Philippe. R, Houzelot. V, Schweich. D, de Bellefon. C, 2010. Gas–liquid Taylor flow in square micro-channels: New inlet geometries and interfacial area tuning. Chemical Engineering Journal 165 (2010) 290–300.

Lee. C.-Y., Lee. S.-Y., 2008a. Influence of surface wettability on transition of two-phase flow pattern in round minichannels, Int. J. Multiphase Flow 34, 706–711.

Lee. C.- Y., Lee. S.- Y., 2008b. Pressure drop of two-phase plug flow in round mini-channels: Influence of surface wettability. Experimental Thermal and Fluid Science 32 (2008b) 1716–1722.

Lee. Chi Young, Lee. Sang Yong, 2008. Influence of surface wettability on transition of two-phase flow pattern in round mini-channels. International Journal of Multiphase Flow 34 (2008) 706–711.

Lee. Chi Young, Lee. Sang Yong, 2008a. Influence of surface wettability on transition of two-phase flow pattern in round mini-channels. International Journal of Multiphase Flow 34 (2008a) 706–711.

Lee. Chi Young, Lee. Sang Yong, 2008b. Pressure drop of two-phase plug flow in round mini-channels: Influence of surface wettability. Experimental Thermal and Fluid Science 32 (2008b) 1716–1722.

Lee. Jae Young, Ishii. M, Kim. Nam Seok, 2008. Instantaneous and objective flow regime identification method for the vertical upward and downward co-current two-phase flow. International Journal of Heat and Mass Transfer 51 (2008) 3442–3459.

Lee. Jae Young, Ishii. M, Kim. Nam Seok, 2008. Instantaneous and objective flow regime identification method for the vertical upward and downward co-current two-phase flow. International Journal of Heat and Mass Transfer 51 (2008) 3442–3459.

Li. C, Li. Y.Z, 2011. Investigation of entrainment behavior and characteristics of gas–liquid ejectors based on CFD simulation. Chemical Engineering Science 66 (2011) 405–416.

Li. C, Li. Y.Z, 2011. Investigation of entrainment behavior and characteristics of gas–liquid ejectors based on CFD simulation. Chemical Engineering Science 66 (2011) 405–416.

Li. J, Wang. B, 2003. Size effect on two-phase flow regime for condensation in micro/mini tubes, Heat Transfer – Asian Research 32, 65–71.

Lockhart R.W, Martinelli R.C, Proposed correlation of data for isothermal two-phase twocomponent flow in pipes, Chem. Eng. Prog. 45 (1) (1949) 39–48.

Lowe. D., Rezkallah. K., 1999. Flow regime identification in microgravity two-phase flow using void fraction signals. Int. J. of Multiphase Flow 25, 433–457.

M

Maddock C, P. Lacey M.C, Patrick.M.A, The structure of two phase flow in a curved pipe, in:

Majumder. Subrata Kumar, Kundu. Gautam, Mukherjee. Dibyendu, 2005. Mixing mechanism in a modified co-current downflow bubble column. Chemical Engineering Journal 112 (2005) 45–55.

Majumder. Subrata Kumar, Kundu. Gautam, Mukherjee. Dibyendu, 2005. Mixing mechanism in a modified co-current downflow bubble column. Chemical Engineering Journal 112 (2005) 45–55.

Mandhane et al (1974). A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes.International journal of multiphase flow 1,537-553.

Mishima. K, Hibiki. T, 1996. Some characteristics of air–water two-phase flow in small diameter vertical tubes. Int. J. Multiphase Flow 22, 703–712.

Mukherjee. H, 1979. An experimental Study of inclined two-phase flow. PhD Thesis, The University of Tulsa.

Nahral Henry, K., Kamotani, Y., 2000. Bubble formation from wall orifice in liquid cross-flow under low gravity. Chem. Eng. Sci. 55, 4653–4665.

Nakashima. Yuta, Yasuda. Takashi, 2007. Cell differentiation guidance using chemical stimulation controlled by a microfluidic device. Sensors and Actuators A 139 252–258.

Natividad. R, Kulkarni. R, Nuithitikul. K, Raymahasay. S, Wood. J, Winterbottom. J.M, 2004. Analysis of the performance of single capillary and multiple capillary (monolith)

reactors for the multiphase Pd-catalyzed hydrogenation of 2-Butyne-1,4-Diol. Chemical Engineering Science 59 5431 – 5438.

Nilpueng. K and Wongwises. S, 2006. Flow pattern and pressure drop of vertical upward gas–liquid flow in sinusoidal wavy channels. Experimental Thermal and Fluid Science 30 (2006) 523–534.

Nilpueng. K and Wongwises. S, 2006. Flow pattern and pressure drop of vertical upward gas–liquid flow in sinusoidal wavy channels. Experimental Thermal and Fluid Science 30 (2006) 523–534.

Ohnuki. A and Akimoto. H, 1996. An experimental study on developing air-water two-phase flow along a large vertical pipe: Effect of air injection method. Int. J. Multiphase flow vol 22, N° 6, pp. 1143-1154.

Ohnuki. A and Akimoto. H, 1996. An experimental study on developing air-water two-phase flow along a large vertical pipe: Effect of air injection method. Int. J. Multiphase flow vol 22, N° 6, pp. 1143-1154.

Oshinowo. O, Charles. M.E, 1974. Vertical two-phase flow part I: flow pattern correlations. The Canadian Journal of Chemical Engineering 52 (1974) 25–35.

Ousaka. A, Deendarlianto, Kariyasaki. A, Fukano. T, 2006. Prediction of flooding gas velocity in gas–liquid counter-current two-phase flow in inclined pipes. Nuclear Engineering and Design 236 (2006) 1282–1292.

Ousaka. A, Deendarlianto, Kariyasaki. A, Fukano. T, 2006. Prediction of flooding gas velocity in gas–liquid counter-current two-phase flow in inclined pipes. Nuclear Engineering and Design 236 (2006) 1282–1292.

P

Peshkin. M.A, About the hydraulic resistance of pipe bends to the flow of gas–liquidmixtures, Teploenergetika 8 (6) (1961) 79–80.

Pohorecki. R, Sobieszuk. P, Kula. K, Moniuk. W, Zielinski M, Cyganski P, Gawinski P, 2008. Hydrodynamic regimes of gas–liquid flow in a microreactor channel. Chemical Engineering Journal 135S (2008) S185–S190.

Pohorecki. R, Sobieszuk. P, Kula. K, Moniuk. W, Zielinski M, Cyganski P, Gawinski P, 2008. Hydrodynamic regimes of gas–liquid flow in a microreactor channel. Chemical Engineering Journal 135S (2008) S185–S190.

R

Rezkallah. K., 1996. Weber number based flow-pattern maps for liquid–gas flow in microgravity. Int. J. of Multiphase Flow 22, 1265–1270.

Rippel G.R. Eidt, C.M, H.B. Jordan, Two phase flow in a coiled tube, IEC Process Des. Dev.5 (1966) 32–39.

Saisorn. S., Wongwises. S., 2009. An experimental investigation of two-phase air–water flow through a horizontal circular micro-channel. Experimental Thermal and Fluid Science 33, 306–315.

Saisorn. S., Wongwises. S., 2010. The effects of channel diameter on flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air–water flow in circular micro-channels. Experimental Thermal and Fluid Science 34, 454–462.

Saisorn. Sira, Wongwises. Somchai, 2008. A review of two-phase gas–liquid adiabatic flow characteristics in micro-channels. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 824–838.

Salman. W, Gavriilidis. A, Angeli. P, 2004. A model for predicting axial mixing during gas–liquid Taylor flow in microchannels at low Bodenstein numbers. Chemical Engineering Journal 101 (2004) 391–396.

Salman. W, Gavriilidis. A, Angeli. P, 2004. A model for predicting axial mixing during gas–liquid Taylor flow in microchannels at low Bodenstein numbers. Chemical Engineering Journal 101 (2004) 391–396.

Salman. W, Gavriilidis. A, Angeli. P, 2006. On the formation of Taylor bubbles in small tubes. Chemical Engineering Science 61 (2006) 6653 – 6666.

Salman. W, Gavriilidis. A, Angeli. P, 2006. On the formation of Taylor bubbles in small tubes. Chemical Engineering Science 61 (2006) 6653 – 6666.

Santos. Rafael M, Kawaji. M, 2010. Numerical modeling and experimental investigation of gas–liquid slug formation in a microchannel T-junction. International Journal of Multiphase Flow 36 (2010) 314–323.

Santos. Rafael M, Kawaji. M, 2010. Numerical modeling and experimental investigation of gas–liquid slug formation in a microchannel T-junction. International Journal of Multiphase Flow 36 (2010) 314–323.

Satitchaicharoen. P and Wongwises. S, 2004. Two-phase flow pattern maps for vertical upward gas–liquid flow in mini-gap channels. International Journal of Multiphase Flow 30 (2004) 225–236.

Satitchaicharoen. P and Wongwises. S, 2004. Two-phase flow pattern maps for vertical upward gas–liquid flow in mini-gap channels. International Journal of Multiphase Flow 30 (2004) 225–236.

Serizawa. Akimi, Feng. Ziping, Kawara. Zensaku, 2002. Two-phase flow in microchannels. Experimental Thermal and Fluid Science 26 703–714.

Shao. N, Gavriilidis. A, Angeli. P, 2008a. Effect of inlet conditions in gas-liquid flow regimes in microchannels. *Proceedings of the 1st European Conference on Microfluidics – Microfluidics 2008 – Bologna, December 10-12, 2008.*

Shao. N, Gavriilidis. A, Angeli. P, 2009. Review Flow regimes for adiabatic gas–liquid flow in microchannels. Chemical Engineering Science 64 2749 – 2761.

Shao. N, Gravriilidis. A, Angeli. P, 2008. Effect of inlet conditions on gas-liquid flow regimes in microchannels. Proceeding of the 1st European conference on microfluidics – microfluidics 2008 _ Bologna, December 10 – 12, 2008.

Shao. N, Salman. W, Gavriilidis. A, Angeli. P, 2008. CFD simulations of the effect of inlet conditions on Taylor flow formation. International Journal of Heat and Fluid Flow 29 (2008) 1603–1611.

Shao. N, Salman. W, Gavriilidis. A, Angeli. P, 2008b. CFD Simulations of the effect of inlet conditions on Taylor flow formation. Int. J. Heat and fluid 29, 1603 - 1611.

Shui. Lingling, Eijkel. Jan C.T, Van den Berg. Albert, 2007. Multiphase flow in microfluidic systems – Control and applications of droplets and interfaces. Advances in Colloid and Interface Science 133 35–49.

Suo. M, Griffith. P, 1964. Two-phase flow in capillary tubes. J. Basic Engng. 86, 576-582.

Taitel. Y, 2000. The role of the surface tension in microgravity slug flow. Chemical engineering science, Vol. 51, No. 5, pp. 695-700, 1996.

Taitel. Y, 2000. The role of the surface tension in microgravity slug flow. Chemical engineering science, Vol. 51, No. 5, pp. 695-700, 1996.
Taitel. Y, Dukler. A, 1976. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas–liquid flow, AIChE Journal 22 (1976) 47–55.

Taitel. Y, Sarica.C, Brill. J.P, 2000. Slug flow modeling for downward inclined pipe flow: theoretical considerations. International Journal of Multiphase Flow 26 (2000) 833-844.

Taitel. Y, Sarica.C, Brill. J.P, 2000. Slug flow modeling for downward inclined pipe flow:
Takamasa. T, Hazuku. T, Hibiki. T, 2008. Experimental Study of gas–liquid two-phase flow affected by wall surface wettability. International Journal of Heat and Fluid Flow 29 (2008) 1593–1602.

Takamasa. T, Hazuku. T, Hibiki. T, 2008. Experimental Study of gas–liquid two-phase flow affected by wall surface wettability. International Journal of Heat and Fluid Flow 29 (2008) 1593–1602.

Takeuchi. D. I and Jankowski. D. F., 1981. A numerical and experimental investigation of the stability of spiral Poiseuille flow. J. Fluid Mech. 102, pp. 101–126.

theoretical considerations. International Journal of Multiphase Flow 26 (2000) 833-844.

Thulasidas. T.C, Abraham. M.A, Cerro. R.R, 1997. Dispersion during bubble-train flow in capillaries. Chem. Eng. Sci. 54, 61–76.

Thulasidas. T.C, Abraham. M.A, Cerro. R.R, 1997. Flow patterns in liquid slugs during bubble-train flow inside capillaries. Chem. Eng. Sci. 52, 2947–2962.

Triplett. K.A, Ghiaasiaan. S.M, Abdel-Khalik. S.I, Sadowski. D.L, 1999. Gas-liquid two-phase flow in microchannels Part I: two-phase flow patterns. Int. J. of Multiphase Flow 25 377-394.

Utada. Andrew S, Fernandez-Nieves. Alberto, Gordillo. Jose M, and Weitz. David A, 2008. Absolute Instability of a Liquid Jet in a Coflowing Stream. Physical review letters, PRL 100, 014502 (2008).

Utada. Andrew S, Fernandez-Nieves. Alberto, Gordillo. Jose M, and Weitz. David A, 2008. Absolute Instability of a Liquid Jet in a Coflowing Stream. Physical review letters, PRL 100, 014502 (2008).

Van Baten. J. M and Krishna. R, 2004. Scale effects on the hydrodynamics of bubble columns operating in the heterogeneous flow regime. Chemical engineering research and design, 82 (A8): 1043-1053.

Weisman. J, Duncan. D, Gibson. J, Crawford. T. Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines, Int. J. Multiphase Flow 5 (1979) 437-462.

Weisman. J, Lan. J and Disimile. P, 1996. The effect of fluid properties on two-phase (vapor-liquid) flow patterns in the presence of the helical wire ribs. Int. J. Multiphase flow Vol. 22, No. 3, pp. 613-619, 1996.

Weisman. J, Lan. J and Disimile. P, 1996. The effect of fluid properties on two-phase (vapor-liquid) flow patterns in the presence of the helical wire ribs. Int. J. Multiphase flow Vol. 22, No. 3, pp. 613-619, 1996.

Wölk. G., Dreyer. M., Rath H.J., 2000. Flow patterns in small diameter vertical non-circular channels. Int. J. of Multiphase Flow 26 1037-1061.

Wongwises. S, Pipathattakul. M, 2006. Flow pattern, pressure drop and void fraction of two-phase gas–liquid flow in an inclined narrow annular channel. Experimental Thermal and Fluid Science 30 (2006) 345–354.

Wongwises. S, Pipathattakul. M, 2006. Flow pattern, pressure drop and void fraction of two-phase gas–liquid flow in an inclined narrow annular channel. Experimental Thermal and Fluid Science 30 (2006) 345–354.

Yamazaki. Y., Yamaguchi. K, 1997. Characteristics of two phase downflow in tubes: flow pattern, void fraction and pressure drop. Journal of Nuclear Science and Technology 16 (4) 245–255.

Yang. Chien-Yuh, Shieh. Cheng-Chou, 2001. Flow patterns of air-water and two phase R134a in small circular tubes. Int. J. of Multiphase Flow 27 1163-1177.

Yang. Z.C, Bi. Q.C, Liu. B, Huang. K.X, 2010. Nitrogen/non-Newtonian fluid two-phase upward flow in non-circular microchannels. International Journal of Multiphase Flow 36 (2010) 60–70.

Yang. Z.C, Bi. Q.C, Liu. B, Huang. K.X, 2010. Nitrogen/non-Newtonian fluid two-phase upward flow in non-circular microchannels. International Journal of Multiphase Flow 36 (2010) 60–70.

Yue. J, Luo. L, Gonthier. Y, Chen. G, Yuan. Q, 2008. An experimental investigation of gas–liquid two-phase flowin single microchannel contactors. Chemical Engineering Science 63 (2008) 4189 – 4202.

Yue. J, Luo. L, Gonthier. Y, Chen. G, Yuan. Q. 2008. An experimental investigation of gas–liquid two-phase flowin single microchannel contactors. Chemical Engineering Science 63 (2008) 4189 – 4202.

Yue. J, Luo. L, Gonthier. Y, Chen. G, Yuan. Q. 2008. An experimental investigation of gas–liquid two-phase flowin single microchannel contactors. Chemical Engineering Science 63 (2008) 4189 – 4202.

Zhao. J. F, Xie. J. C, Lin. H, Hu. W.R, Ivanov. A. V, Belyaev. A. Yu, 2001. Experimental studies on two-phase flow patterns aboard Mir space station. International Journal of Multiphase Flow 27 (2001) 1931–1944.

Zhao. J. F, Xie. J. C, Lin. H, Hu. W.R, Ivanov. A. V, Belyaev. A. Yu, 2001. Experimental studies on two-phase flow patterns aboard Mir space station. International Journal of Multiphase Flow 27 (2001) 1931–1944.

Zhao. T. S, Bi. Q. C, 2001. Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels. Int. J. of Multiphase Flow 27 765-782.

Zubir. M. A and Zainon. M. A, 2011. Two-phase flow behavior and pattern in vertical pipes. J. of Applied Sciences 11 (9), 1491 – 1500.

Zughbi. H. D, 2006. Effect of jet protrusion on mixing in pipelines with side-tees. Chemical Engineering Research and Design, 84(A11): 993–1000.

Zughbi. H. D, 2006. Effect of jet protrusion on mixing in pipelines with side-tees. Chemical Engineering Research and Design, 84(A11): 993–1000.