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 MECANIQUE



Mémoire

Présentée pour l'obtention du grade de MASTER

En : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Mécanique - Energétique

Par : AMIEUR Khaled

THEME

SYNTHESE ET CARACTERISATION DES STRUCTURES D'ECOULEMENTS DIPHASIQUES GAZ-LIQUIDE DANS UNE CONDUITE HORIZONTALE ET VERTICALE

Membres de Jury :

Président	TRIKI Zakaria	MCA
Examinateur	ALLICHE Mounir	PR
Encadreur	ZEGUAI Salim	MCA

2022/2023

Résumé

L'étude expérimentale menée a pour objectif d'analyser les écoulements diphasiques air-eau dans une conduite en direction horizontale et verticale en fonction des conditions d'entrée rigoureusement contrôlées. Un dispositif expérimental a été conçu par Zeguai et al., 2013 au laboratoire IUSTI 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 0.78 x 10^{-3} ms^{-1} à 79 x 10^{-3} ms^{-1} et de 2.3 x 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 al ., 2013. Ces auteurs ont mis en évidence des 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, les structures observées par Zeguai et al., 2013 sont les structures de bulles, poches-bouchons 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 et Zeguai et al., 2021, révèlent des réarrangements des structures.

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

Abstract

The carried out experimental study aims at analyzing air–water two-phase flow patterns in a duct in horizontal and vertical orientation for laminar flow with carefully controlled conditions. An experimental test rig has been already setup by Zeguai et al., 2013 in the IUSTI Laboratory 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 2.3x10^{-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. These authors identified the flow patterns in both zones. Within the explored ranges of superficial velocities, several flow patterns were obtained by Zeguai et al., 2013 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 interface far downstream. Flow maps were drawn and proposed by Zeguai et al., 2013 and zeguai et al., 2021 revealed some pattern rearrangements.

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

الملخص:

تهدف الدراسة التجريبية إلى تحليل التدفق ثنائي الطورهواء-ماء في أنبوب في الاتجاهين الأفقي و العمودي وفقًا لشروط الدخول التي يتم التحكم فيها بشكل صارم تم تصميم جهازتجريبي بواسطة زقاي وفريقه.،2013 (Zeguai et al., 2013) في مختبر IUSTI لإنشاء تدفق ثنائي الطورهواء-ماء في أنبوب زجاجي بقطر داخلي يساوي 3 مم، قابل للتوجيه بالنسبة للجاذبية ومجهز بأجهزة قياس. تتراوح السرعة الظاهرية للسائل والغاز على التوالي من 10^{-3}x0.78 متر/الثانية إلى 10^{-3}x179 متر/الثانية ومن 10^{-3}x2.3 متر/الثانية إلى 10^{-3}x3.54 متر/الثانية. قياسات معدلات تدفق الماء والهواء وقياس الضغوط عند المدخل والمخرج مرفقة بالتصوير بواسطة كاميرا سريعة بمعدل 1000 إطار في الثانية أعدت مسبقا من طرف زقاي و فريقه.،2013 (Zeguai et al., 2013). وقد سلط هؤلاء المؤلفون الضوء على الهياكل المختلفة التي تمت ملاحظتها للخليط ثنائي الطورعند مستوى منطقة الخلط عند الطول/القطر=10 (L/D=10) وفي اتجاه مجرى التدفق في أنبوب الاختبارعند الطول/القطر=420 (L/D=420) من المدخل. بالنسبة للأنظمة التي تمت دراستها، فإن الهياكل التي لاحظها زقاي و فريقه هي الهياكل الفقاعية والجيبية والحلقية. اختلفت هذه الهياكل حسب منطقة المراقبة، في منطقة الخلط تكون أكثر تعقيدًا في منطقة التكوين. تتطور هذه الهياكل على طول الأنبوب لتشكل أشكال هندسية مبسطة مع واجهات سلسة وبكميات أقل. تكشف خرائط التدفق ثنائي الطور التي اقترحها زقاي و فريقه (Zeguai et al., 2013) و زقاي و فريقه. 2021 (Zeguai et al., 2021) ، عن إعادة ترتيب هذه الهياكل.

كلمات البحث: الانابيب الصغيرة و الميكرومترية، شروط الإدخال، هياكل التدفق ثنائي الطور، التصور، التجريب.

Dédicaces

Du profond du mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,

A MA CHERE MERE, Aucune dédicace ne serait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien-être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère votre bénédiction m'accompagne toujours. Que modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

A LA MEMOIRE DE MON PERE, Ce travail est dédié à mon père, décédé il y plus de dix ans, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études, j'espère que, du monde qui sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de son âme, Puisse Dieu, le tout puissant, 'voir en sa saint miséricorde.

A MA FEMME, Merci énormément pour ton soutien plus que précieux, Merci pour ton grand cœur toutes vos qualités qui serait trop longue à énumérer, Ma vie ne serait pas aussi magique sont en présence.

A MES CHERS FRERES ET SŒURS, pour leur appui et leur encouragement.

AMIEUR Khaled

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier vivement tout le corps administratif et professoral de la faculté de la science et de la technologie de l'université Yahia Fares de Medéa, et particulièrement le département de génie mécanique pour leurs sympathie et également pour leur importants conseilles et instructions durant mes années éducatives à cet établissement.

Ainsi se présente l'occasion de remercier mon encadreur Dr ZEGUAI Salim pour son accompagnement tout au long de ce travail, pour sa patience, la pertinence de ses conseils et l'extrême richesse de ses expériences dans le domaine de la science et de la technologie.

Comme je souhaité aussi manifester ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont encouragées et aidées à achever ce travail.

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……. 17

I.2 Application……... 17

I.3 Classification d'écoulements diphasiques…… 18

I.3.1 Les écoulements diphasiques selon les combinaisons des phases…… 18

I.3.2 Les écoulements diphasiques selon les structures d'interface…….. 18

I.3.2.1 Phase dispersée……... 18

I.3.2.2 Phase séparées…… 19

I.3.2.3 De transition…….. 19

I.4 Particularités et régimes d'écoulements gaz-liquide……. 19

I.4.1 Régimes d'écoulement dans un canal vertical…… 20

I.4.2 Régimes d'écoulement dans une conduite horizontale…….. 21

I.5 Notions fondamentales des écoulements diphasiques…….. 23

I.5.1 Définition d'une phase……... 23

I.5.2 Phénomènes de surface…….. 23

I.5.2.1 La mouillabilité……... 24

I.5.2.2 La tension superficielle……... 24

I.6 Les paramètres descriptifs des écoulements diphasiques…….. 25

I.7 Cartes de prédiction des régimes d'écoulement diphasique……. 27

Chapitre II. Revue bibliographique sur les écoulements diphasiques adiabatiques dans les conduites capillaires…….....……..…… 31

II. 1 Introduction……..……. 34

II.2 Macro et micro canaux et phénomènes mis en jeu……..…... 34

II.3 Structures d'écoulements et paramètres influents……..…… 38

II.3.1 Les cartes d'écoulements dimensionnelles……..…… 41

- Inventaire des travaux expérimentaux…….. 41

a/- Ecoulement diphasique horizontal……...…….. 44

- Conduite horizontale d ≥ 1 mm……...…….. 44

- Influence du diamètre de la conduite…….. 45

b/- Ecoulement diphasique en direction vertical ascendant……..... 49

- Conduite verticale d ≥ 1 mm…….. 49

Chapitre III. Résultats – I : Structures d'écoulements dans une conduite horizontale….. 53

III. 1Introduction…… 53

III.2 Visualisation des structures d'écoulements diphasiques en position horizontale. 55

III.2.1 Dans la zone de création du mélange diphasique à L/D = 10……. 56

a- Très faible vitesse du liquide (U_{LS} = 78 10-5 m/s, Re_{LS} = 2.34)……. 56

b- Vitesse de la phase liquide modérée (U_{LS} = 2948 10^{-5} m/s, Re_{LS} = 88.44)… 58

c- Vitesse de la phase liquide élevée (U_{LS} = 5890 10^{-5} m/s, Re_{LS} = 176.7)…… 60

III.2.2 Dans la zone à L/D = 420 de la conduite…… 61

a- Très faible vitesse du liquide (U_{LS} = 78 10^{-5} m/s, Re_{LS} = 2.34)……... 61

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)……. 62

III.2.3 Comparaison des structures observées à L/D = 10 et à L/D = 420 du tube de test…….. 62

III.3 Cartes d'écoulements……. 66

III.3.1 Carte d'écoulement dans la zone de formation du mélange diphasique à L/D = 10…….. 66

III.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…… 68

Conclusion…… 85

Conclusion générale et perspectives…….. 70

Chapitre IV. Résultats – II : Structures d'écoulements diphasiques ascendants dans une conduite verticale ……... 73

IV. 1Introduction…….. 73

IV. 2 Visualisation des structures d'écoulements diphasiques ascendantes……. 73

IV. 2. 1 Dans la zone de création du mélange diphasique à L/D = 10…….. 73

a- Très faible vitesse du liquide (U_{LS} = 78 10-5 m/s, Re_{LS} = 2.34)……. 74

b- Vitesse de la phase liquide modérée (U_{LS} = 2948 10^{-5} m/s, Re_{LS} = 88.44)… 76

c- Vitesse de la phase liquide élevée (U_{LS} = 5890 10^{-5} m/s, Re_{LS} = 176.7)…… 78

IV. 2. 2 Dans la zone à L/D = 420 de la conduite …… 79

a- Très faible vitesse du liquide (U_{LS} = 78 10^{-5} m/s, Re_{LS} = 2.34)……... 79

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)……. 80

IV. 2. 3 Comparaison des structures observées à L/D = 10 et à L/D = 420 ……..…… 83

III.3 Cartes d'écoulements……. 87

III.3.1 Carte d'écoulement dans la zone de formation du mélange diphasique à L/D = 10…….. 88

III.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…… 89

Conclusion……. 92

Conclusion générale et perspectives…….. 94

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	Coordonnée verticale de la carte de Taitel et Dukler (1976)
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 [-]
K	Coordonnée verticale de la carte de Taitel et Dukler (1976)
$l_{c,g}$	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 [-]
S	Rapport de glissement [-]
T	Coordonnée verticale de la carte de Taitel et Dukler (1976)
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	*Paramètre Martinelli (Coordonnée horizontale de la carte de Taitel et Dukler (1976))*
x	*Titre massique [-]*

Symboles grecs

α	*Taux de vide [-]*
β	*Fraction vulumique [-]*
θ	*Angle d'inclinaison [rad]*
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

FIG. I.1 (a) écoulement diphasique transitoire avec passage d'un écoulement liquide à un écoulement vapeur ; (b) écoulement diphasique séparé ou séparé avec de grandes régions de gaz ; (c) écoulement diphasique dispersé avec des bulles de gaz (ou des gouttelettes de liquide) dispersées dans un liquide ou des particules ou des gouttelettes solides dispersées dans un gaz. 19

FIG. I.2 Types d'écoulements dans une conduite verticale : (1) Écoulement à bulles, (2) Écoulement avec poche-bouchon, (3) Ecoulement à forte coalescence, (4) Écoulement annulaire, (5) Écoulement annulaire avec brouillard. 21

FIG I.3 Types d'écoulements dans un tube horizontal. 23

FIG I.4 Carte d'écoulement vertical ascendant : Hewitt et Roberts (1969). 28

FIG I.5 Carte d'écoulement vertical : comparaison d'Ishii et Mishima (1984) et Taitel et Dukler (1977). 29

FIG I.6 Carte du régime d'écoulement pour un écoulement diphasique horizontal (Taitel et Dukler, 1976). 30

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. 39

FIG.II.2 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. 45

FIG.II.3 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. 46

FIG. II.4 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. 47

FIG.II.5 Comparaison entre les cartes structures d'écoulements adiabatiques air/eau 48

(Damianides et Westwater, 1988; Fukano et Kariyasaki 1993 ; Yang et Sieh 2001) pour des conduites circulaires horizontales à faible diamètre.

FIG.II.6 Cartes de structures d'écoulements diphasiques air/eau adiabatiques dans des conduites à faible diamètre en position verticale ascendante. 49

Tableaux :

Tableau II. 1 : Les forces qui interviennent dans un écoulement diphasique. 37

Tableau II. 2 : Les nombres associés comparant ces différents effets physiques. 37

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 Zone de test expérimental du présent travail. 54

FIG. III. 2 Analyse d'une image d'un ''écoulement diphasique'': distinction entre la phase liquide et la phase gazeuse. 55

FIG. III. 3 Ecoulement typique observé à l'entrée du tube de test (ID3mm) à très faible vitesse apparente du liquide (ULS = 0.78 x 10-3 m/s). 57

FIG. III. 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). 59

FIG. III. 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). 60

FIG. III. 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*). 61

FIG.III.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*). 62

FIG. III. 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 67

d'air de 110 µm de diamètre intérieur, établie à la zone où le mélange est effectué.

FIG. III. 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. 68

FIG. III. 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. 70

Tableaux :

Tableau (III. 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. 65

Chapitre IV

Figures :

FIG. IV. 1 Structures d'écoulement observées dans la zone d'entrée du tube (ID 3mm) à très faible vitesse apparente du liquide (U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s). 75

FIG. IV. 2 Structures d'écoulement observées dans la zone d'entrée du tube (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide modérée (U_{LS} = 29 x 10^{-3} m/s). 77

FIG. IV. 3 Structures d'écoulement observées dans la zone d'entrée du tube (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide élevée (U_{LS} = 59 x 10^{-3} m/s). 78

FIG. IV. 4 Structures d'écoulement observées à L/D=420 de l'entrée du tube (ID 3mm), à très faible vitesse apparente du liquide (U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s). 80

FIG. IV. 5 Structures d'écoulement observées à L/D=420 de l'entrée du tube (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide modérée (U_{LS} = 29 x 10^{-3} m/s). 81

FIG. IV. 6 Schéma de l'écoulement à bulle hélicoïdal 82

Tableaux :

Tableau IV. 1 : Comparaison des structures d'écoulements en direction verticale ascendante entre la zone de mélange à L/D = 10 et à L/D = 420 mm. 85

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.

L'objet de notre travail 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 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 ce mémoire s'articule, dans une première partie, par des généralités sur les écoulements diphasiques on verra des généralités sur les écoulements diphasiques (principaux paramètres et régimes d'écoulements). En 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.

Nous présenterons, dans le troisième et le quatrième chapitre du mémoire, les résultats expérimentaux déjà obtenue par zeguai et al., 2013 et zeguai et al., 2021 pour des écoulements diphasiques en direction horizontale et verticale ascendante. 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 de faible diamètre hydraulique. Dans le cinquième chapitre, nous présenterons une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus suivant les deux orientations (horizontale, verticale ascendante), afin de mettre en évidence les différences et les similitudes entre ces différentes orientations.

CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES ECOULEMENTS DIPHASIQUES EN CONDUITE

Chapitre I. Généralités sur les écoulements diphasiques

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 de plus l'écoulement diphasique est rencontré dans beaucoup d'applications d'ingénierie. Ce sujet est devenu progressivement important et a besoin d'une meilleure compréhension afin de mener des exploitations sures et une conception optimale.

Dans ce chapitre, on verra des généralités sur les écoulements diphasiques (principaux paramètres et régimes d'écoulements).

I.2 Applications

Les applications les plus importantes et les plus courantes où l'on rencontre les écoulements diphasiques sont mentionnées ci-dessous :

- **Systèmes de transport**

  Le transport par canalisation des mélanges de pétrole et de gaz, des fibres, des boues etc. relatives à l'industrie pétrochimique qui nécessite la maitrise et la modélisation des écoulements diphasiques.

- **Systèmes de procédés**

  Réactions chimiques, milieu poreux, unités d'extraction et de distillation, système de dessalement, séparation de phase atomiseurs, réacteurs agites…etc

- **Systèmes d'alimentations**

  Réactions nucléaires, chaudières et évaporateurs, moteurs à réaction, moteur de combustion…etc

- **Système de transfert de chaleur**

  Evaporateurs, réfrigérateur, échangeurs de chaleur condensateurs, séchoirs, tours de refroidissement.

- **Phénomènes métrologiques**

  Introduction des fleuves, vagues d'océan, formation et mouvement de gouttelettes de pluie, physique des nuages, givrage… etc

I.3 Classification d'écoulements diphasiques

Les écoulements diphasiques peuvent être classifiés selon les combinaisons des phases ou selon la distribution spatiale des interfaces.

I.3.1 Les écoulements diphasiques selon les combinaisons des phases

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).

I.3.2 Les écoulements diphasiques selon les structures d'interface

Un écoulement diphasique peut être classifié selon la distribution géométrique des phases appelée régime ou configuration d'écoulement. Différents régimes sont identifiés par inspection visuelle ou par analyse spectrale des fluctuations de la fraction volumique ou des pressions instables.

Dans les cartes d'écoulement, des configurations d´écoulement pour différents débits de phase sont présentées. Les débits utilisés dépendent de la hauteur et sont généralement les flux de la quantité de mouvement, le débit volumique, ou le débit massique. Dans une carte d'écoulements, les différentes topologies d'écoulement sont délimitées par des frontières correspondant aux zones de transition d'une configuration à l'autre. Il convient de noter que ces graphiques n'ont aucun caractère universel car donnés sous forme dimensionnelle et généralement pour un couple gaz-liquide donné. Ainsi, les transitions qui résultent d'une instabilité peuvent être affectées par les propriétés physiques des fluides, le diamètre de la conduite, la rugosité de la paroi ou encore les conditions d'entrée. Un résumé des configurations typiques d'écoulement est présenté dans les figures suivantes :

I.3.2.1 Phase dispersée

Un ou les deux fluides sont présents sous forme de gouttes, dans toute ou sur une partie de la section de la conduite. On distingue alors deux sous catégories :

- **Régime pleinement dispersé :** les gouttes sont présentes dans toute la section de la conduite de façon plus au moins homogène.

- **Régime dispersé stratifié :** comprenant une zone dispersée plus au moins dense et une ou deux couches continues. Dans certains cas ces régimes dispersés peuvent aussi s'écouler de façon annulaire.

I.3.2.2 Phase séparées

Les fluides s'écoulent de façon stratifiée deux couches continues disposées selon leurs densités et séparées par une interface plus au moins perturbée. Un cas particulier est l'écoulement annulaire, composé de deux couches continues s'écoulant concentriquement.

I.3.2.3 De transition

Les phases s'écoulent sous la forme de grandes poches, ou de bouchon / Ces régimes intermittents apparaissent en général lorsque les différences de masses volumiques des fluides sont faibles.

La figure ci-dessous représente différents régimes d'écoulements diphasiques :

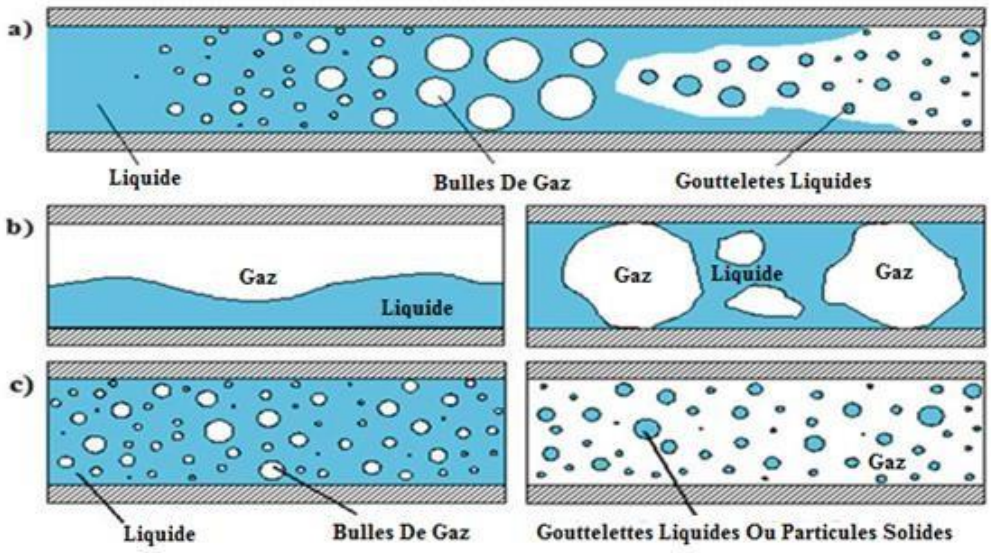


FIG.I.1 (a) écoulement diphasique transitoire avec passage d'un écoulement liquide à un écoulement vapeur ; (b) écoulement diphasique séparé ou séparé avec de grandes régions de gaz ; (c) écoulement diphasique dispersé avec des bulles de gaz (ou des gouttelettes de liquide) dispersées dans un liquide ou des particules ou des gouttelettes solides dispersées dans un gaz.

I.4 Particularités et régimes d'écoulements gaz-liquide

Le plus courant des écoulements diphasiques est évidement l'écoulement gaz-liquide. L'interface gaz-liquide est la représentation typique de la notion d'interface en

écoulement diphasique. Aussi l'aptitude de la formation de bulles de gaz ou de gouttelettes de liquide donne une certaine particularité à ce type d'écoulement. Les configurations et les régimes de l'écoulement diffèrent selon que celui-ci s'effectue dans une conduite horizontale ou verticale.

I.4.1 Régimes d'écoulement dans un canal vertical

L'écoulement diphasique dans une conduite verticale a tendance à être plus symétrique, car les forces de gravité agissent d'une manière identique dans les directions circonférentielles. La force gravitationnelle joue un rôle prédominant dans la phase liquide et donc dans l'ensemble de l'écoulement diphasique. La figure I.2 montre les structures d'écoulements rencontrés dans un écoulement diphasique gaz-liquide vertical ascendant.

- **Écoulement à bulles (Bubbly flow) :** Les bulles de gaz sont dispersées dans la phase liquide continue. La taille des bulles varie largement mais elle est généralement faible par rapport au diamètre du tube.
- **Écoulement avec poche-bouchon (Slug flow) :** A mesure que la taille des bulles augmente et quelles commencent à se consolider, des poches de gaz peuvent être formés. Les poches sont confinées transversalement en épousant la forme de la conduite et allongées longitudinalement dans un écoulement ascendant et peuvent être séparés par des bouchons liquides avec des bulles satellitaires de petites tailles. Ces poches allongées sont communément appelés «Slug flow».
- **Ecoulement à forte coalescence :** également appelé écoulement semi-annulaire. À mesure que les bulles grossissent, elles commencent à se casser conduisant ainsi à un écoulement plus aléatoire et instable. Bien que la phase vapeur s'écoule en continu vers le haut, la phase liquide peut subir des mouvements intermittents vers le haut et vers le bas, car la force de cisaillement de la phase vapeur peut juste équilibrer le gradient de pression imposé et la force de gravité descendante. Ce modèle oscillatoire est appelé l'écoulement à forte coalescence, et c'est un régime intermédiaire entre l'écoulement à bouchons et l'écoulement annulaire. Si le diamètre du tube vertical est petit, le type d'écoulement peut passer directement d'un écoulement à poche-bouchon à un écoulement annulaire sans passer par ce modèle.
- **Écoulement annulaire :** A une valeur de qualité relativement élevée, la mince couche liquide s'écoule le long de la paroi intérieure du tube et le noyau central de

l'écoulement est constitué de la phase vapeur (gaz). L'écoulement annulaire se produit lorsque le cisaillement intefacial sur le film liquide (relatif à la vitesse importante du gaz ou de la vapeur) domine sur la gravité. Le liquide est ensuite expulsé du centre du tube pour former un film liquide sur la paroi de ce dernier. Puisque la vitesse de la phase vapeur (au cœur du tube) est beaucoup plus élevée que la vitesse de la phase liquide, le noyau de vapeur peut onduler la couche liquide et former des vagues au sein du film liquide. Il est également possible qu'une partie de la phase liquide soit entraînée en forme de petites gouttelettes dans le noyau de gaz, ou que certaines bulles peuvent être entraînées dans le film liquide.

- **Écoulement annulaire avec brouillard :** À un des valeurs importantes du débit de liquide, la concentration des gouttelettes dans le noyau de vapeur (gaz) augmente. La fusion de ces gouttelettes liquides peut entraîner des ruptures ou des mèches de liquide dans le noyau de gaz.

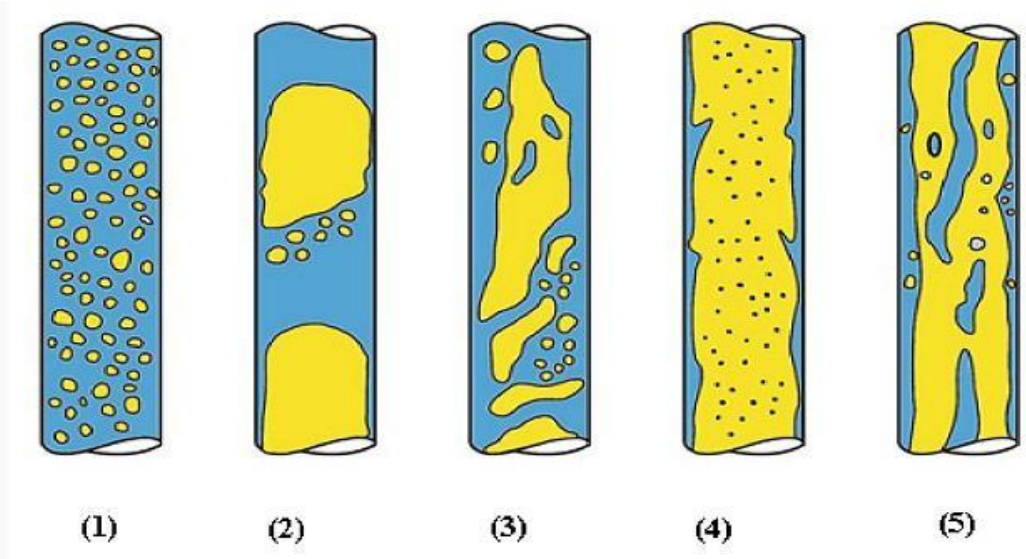


FIG.I.2 Types d'écoulements dans une conduite verticale : (1) Écoulement à bulles, (2) Écoulement avec poche-bouchon, (3) Ecoulement à forte coalescence, (4) Écoulement annulaire, (5) Écoulement annulaire avec brouillard.

I.4.2 Régimes d'écoulement dans une conduite horizontale :

L'écoulement diphasique horizontal présente des configurations d'écoulement différentes de ceux rencontrées dans l'écoulement vertical, en raison des forces de gravité qui agissent perpendiculairement à la direction de l'écoulement. L'écoulement diphasique dans un conduite horizontale est plus complexe par rapport à l'écoulement diphasique vertical, car

l'écoulement n'est pas souvent axisymétrique, en raison des effets de la gravité. Les types d'écoulements rencontrés dans un écoulement diphasique horizontal sont définis comme suit :

- **Ecoulement à bulles dispersées :** La phase vapeur (gaz) apparaît sous forme de bulles distinctes dans la phase liquide continue. Les bulles ont tendance à monter au sommet de l'écoulement en raison des effets de flottabilité. Lorsque la vitesse du liquide est importante, les bulles peuvent être réparties d'une manière uniforme dans le liquide, comme dans le cas d'un écoulement vertical.
- **Écoulement avec bouchons** : Une augmentation en qualité se traduit par une plus grande taille de bulle de vapeur (gaz) et la formation de bouchons en forme de balles, qui ont tendance à rester au sommet du canal en raison des forces de flottabilité.
- **Écoulement stratifié :** Les vitesses de liquide et de vapeur (gaz) dans ce régime sont relativement petites et la qualité est relativement importante. Le liquide s'écoule le long du fond du canal à cause des effets de la gravité tandis que la phase vapeur (gaz) s'écoule en haut. Il est également possible qu'une couche très mince de liquide se forme en haut du canal d'écoulement.
- **Écoulement stratifié avec vagues:** A mesure que la vitesse de la vapeur (gaz) augmente dans l'écoulement stratifié, les forces de cisaillement de la phase vapeur (gaz) provoquent des ondulations en dessus de la phase liquide et entraînent la formation d'ondes (vagues) an niveau de l'interface liquide-vapeur (gaz). Les vagues grimpent sur les côtés du canal et la couche liquide au fond commence à s'étirer et devient mince.
- **Écoulement avec vagues moutonnantes :** L'amplitude des vagues formées augmente au fur et à mesure que le débit du liquide augmente. Les crêtes peuvent ainsi couvrir tout le canal, et un pont commence à se développer, séparant les structures ainsi formées (les bouchons) les unes des autres. Cependant, une quantité importante de la phase liquide reste et la gravité la tire au fond du canal. Le haut du le canal est toujours mouillé par un film de liquide relativement mince.
- **Écoulement annulaire dispersé :** semblable à la configuration de l'écoulement vertical, la couche liquide s'écoule près de la paroi interne du canal et la vapeur (gaz) dans le noyau central. Reste que la couche liquide en bas du canal est plus épaisse que celle au sommet en raison des effets de la gravité.

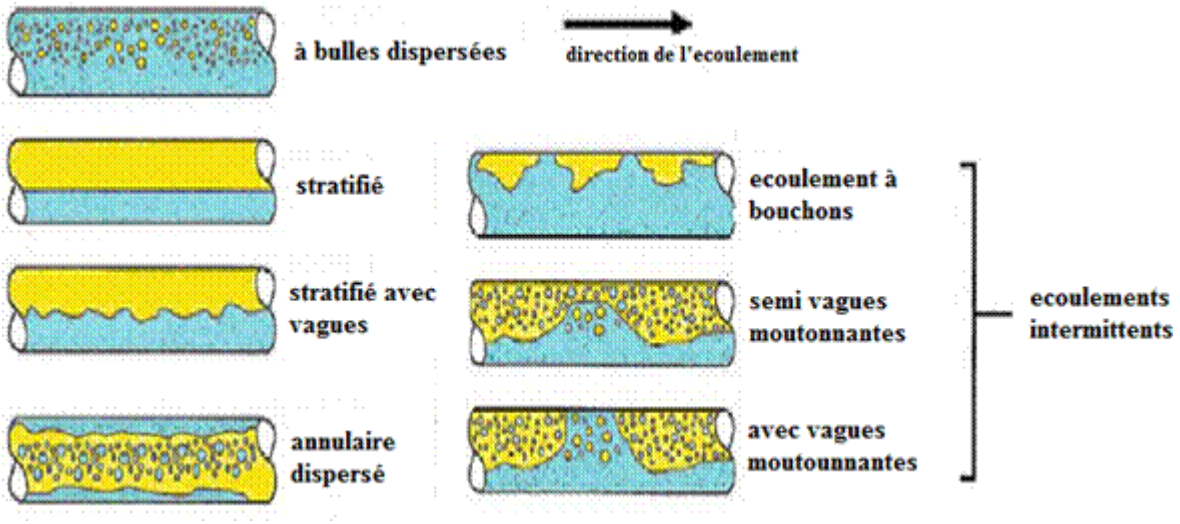


FIG.I.3 Types d'écoulements dans un tube horizontal.

I.5 Notions fondamentales des écoulements diphasiques

On donne une description rapide de quelques notions essentielles pour la compréhension des écoulements diphasique.

I.5.1 Définition d'une phase

Une phase et une définition thermodynamique de l'état de la matière, qui peut être solide, liquide ou gaz. Dans la terminologie générale, une phase est continue su elle occupe continuellement les régions connectées de l'espace et elle est dispersée si elle occupe de régions déconnectées. La phase continue peut être gazeuse ou liquide. La phase dispersée est formée des particules. La particule peut être solide ou fluide, gazeuse ou liquide. Les particules fluides formées par une phase gazeuse sont appelées **bulles,** alors qu'on ne parle de **gouttes** que si les particules fluides sont formées par une phase liquide.

I.5.2 Phénomènes de surface

L'interface est système physique à une dimension d'espace de moins qu'un volume (zone de faible épaisseur). A l'échelle moléculaire, une interface liquide-gaz correspond à une zone de transition où la densité passe progressivement d'une valeur moyenne dans le liquide à une valeur moyenne dans le gaz où les grandeurs physiques (masse surfacique, vitesse surfacique, énergie surfacique, etc.) subiront une discontinuité ou un saut.

Le phénomène de surface dans un écoulement diphasique se réfère aux interactions entre les deux phases (gaz-liquide, liquide-liquide, etc.) qui se produisent à la frontière entre les deux fluides. Les interactions de surface sont importantes car elles peuvent affecter la dynamique globale de l'écoulement, y compris les vitesses, les trajectoires et les échanges de masse, de chaleur et de quantité de mouvement.

Dans les écoulements diphasiques, les interactions de surface peuvent être influencées par des facteurs tels que la tension de surface, la viscosité des phases, la géométrie du canal et les forces gravitationnelles. Les phénomènes de surface courants dans les écoulements diphasiques comprennent la formation de gouttes, la coalescence, la rupture et la formation de films.

I.5.2.1 La mouillabilité

La mouillabilité se réfère à la capacité d'un liquide à se répartir sur une surface solide. Elle est souvent mesurée par l'angle de contact formé entre la surface solide, le liquide et l'interface liquide-air.

L'angle de contact est déterminé par la tension superficielle entre le liquide et l'air, ainsi que par les interactions entre le liquide et la surface solide. Si l'angle de contact est inférieur à 90 degrés, le liquide est dit mouillant, car il s'étend facilement sur la surface solide. Si l'angle de contact est supérieur à 90 degrés, le liquide est dit non mouillant, car il ne se répartit pas facilement sur la surface solide.

I.5.2.2 La tension superficielle

La tension superficielle est un phénomène physique qui se produit à l'interface entre deux phases, généralement un liquide et un gaz. Elle est due à l'attraction moléculaire entre les molécules du liquide à la surface, qui est plus forte que l'attraction entre les molécules du liquide et celles du gaz.

Cela crée une sorte de "peau" ou de film à la surface du liquide, qui a une tension superficielle. Cette tension peut être mesurée en termes de force par unité de longueur, ou en termes d'énergie par unité de surface.

La tension superficielle, notée σ, peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{F}{L} \qquad [Nm^{-1}] \qquad \text{(I.1)}$$

Où F est la force nécessaire pour étirer une surface de liquide donnée et L est la longueur de cette surface.

I.6 Les paramètres descriptifs des écoulements diphasiques

Dans tout ce qui suit, l'indice 'L' se rapporte à la phase liquide et l'indice 'G' se rapporte à la phase gazeuse et l'indice 'M' pour le mélange. Nous définissons les grandeurs utilisées en écoulements diphasiques de la manière suivante :

- **Fraction de vide (α) :** Dans les écoulements diphasiques, la fraction du vide est l'une des paramètres les plus importants à définir. Elle définit la section occupée par chaque phase. Comme elle détermine les vitesses moyennes du liquide est de vapeur, elle représente un paramètre fondamental dans le calcul de la chute de pression et les comportements hydrodynamique de l'écoulement.

$$\alpha = \frac{A_G}{A_{tot}} \quad ; \quad \alpha = \frac{A_L}{A_{tot}} \tag{I.2}$$

- **La masse volumique du mélange diphasique (ρ_M) :** elle est définie comme étant la masse moyenne par unité le volume:

$$\rho_M = \frac{\int_{V_L} \rho_L \ dV + \int_{V_G} \rho_G \, dV}{V_L + V_G} \tag{I.3}$$

Si la masse volumique de chaque phase est considérée constante, la relation suivante peut être obtenue en employant l'expression de α :

$$\rho_M = (1 - \alpha)\rho_L + \alpha\rho_G \tag{I.4}$$

- **La vitesse de la phase (réelle) (V_L, V_G) :** elle représente la vitesse moyenne de chaque phase et elle est définie comme étant le débit volumique de cette phase (Q_L ou Q_G) traversant la section correspondante à chaque phase (A_L ou A_G) Cette vitesse devrait également être considérée comme étant une moyenne temporelle de la vitesse afin d'éliminer les fluctuations aléatoires, c'est-à-dire :

$$V_L = \frac{Q_L}{A_L} \tag{I.5}$$

$$V_G = \frac{Q_G}{A_G} \tag{I.6}$$

- **La vitesse superficielle (apparente) de chaque phase (U_{LS}, U_{GS}) :** elle représente le rapport de débit volumique de cette phase divisé par la section totale traversée par les deux phases en question, c'est-à-dire :

$$U_{LS} = \frac{Q_L}{A_L + A_G} = \frac{Q_L}{A_{totale}} \qquad \text{(I.7)}$$

$$U_{LS} = \frac{Q_G}{A_L + A_G} = \frac{Q_G}{A_{totale}} \qquad \text{(I.8)}$$

La vitesse superficielle de chaque phase définie par (I.7) et (I.8) est égal à la vitesse que chaque phase aurait si elle devait s'écouler seule dans la conduite à son débit massique spécifié. La relation qui relie la vitesse superficielle à la vitesse de la phase dans le cas de la phase liquide peut être obtenue en combinant des équations. (I.5) et (I.6) et en utilisant la définition de la fraction de vide α dans l'équation. (I.2), on obtient donc :

$$U_{LS} = (1 - \alpha) V_L \qquad \text{(I.9)}$$

$$U_{GS} = \alpha V_L \qquad \text{(I.10)}$$

- **La fraction volumique :** elle est définie comme étant le débit volumique de la vapeur divisée par le débit volumique total:

$$\beta = \frac{Q_G}{Q_L + Q_G} = \frac{U_{GS}}{U_{LS} + U_{GS}} \qquad \text{(I.11)}$$

Qui est une quantité pratique pour l'expérience étant donné que les débits volumiques peuvent être facilement calculés ou mesurés. L'expérience a montré que pour un écoulement unidimensionnel la vitesse de phase de la vapeur est normalement supérieure à la vitesse de phase du liquide dans les systèmes diphasiques en écoulement.

- **Titre massique :** Dans le cas de l'équilibre thermodynamique, x' correspond au titre massique (dynamique) x de gaz définit par :

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} \; ; \; (1 - x) = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} \qquad \text{(I.12)}$$

- **Le rapport de glissement :** est défini comme le rapport de vitesse de phase de gaz à celle du liquide, c'est-à-dire,

$$S = \frac{V_G}{V_L} \qquad \text{(I.13)}$$

Pour un écoulement homogène, les vitesses des phases liquide et vapeur sont identiques et

Donc le rapport de glissement S = 1, c'est-à-dire, $V_L = V_G$ (I.14)

La substitution des équations (I.9) et (I.10) dans l'équation (I.13) donne :

$$\frac{U_{GS}}{\alpha} = \frac{U_{LS}}{(1-\alpha)} \quad \text{(I.15)}$$

La fraction du vide pour un écoulement homogène est donc

$$\alpha = \frac{U_{GS}}{U_{GS} + U_{LS}} \quad \text{(I.16)}$$

Qui indique que pour un écoulement homogène : $\alpha = \beta$

I.7 Cartes de prédiction des régimes d'écoulement diphasique

Une carte de prédiction des régimes d'écoulement diphasique est un outil utile pour prédire les différents types d'écoulement qui peuvent se produire dans les systèmes diphasiques (généralement gaz-liquide). Ces cartes utilisent des corrélations empiriques ou des données expérimentales pour déterminer le régime d'écoulement en fonction des propriétés du fluide, des conditions de débit et de la géométrie du système.

Les cartes des régimes d'écoulement sont généralement fournies par de nombreux auteurs en termes de vitesses superficielles ou d'autres paramètres généralisés de l'écoulement. Différentes variables régissent le passage d'un régime à l'autre, parmi lesquelles on cite les débits massiques de liquide et de gaz, les propriétés des fluides (masse volumique, viscosité, tension superficielle), le diamètre de tube et l'angle d'inclinaison. Les différents régimes sont séparés par des lignes qui représentent les conditions de transition entre les régimes d'écoulement.

Une carte de régime d'écoulement vertical ascendant proposée par Hewitt et Roberts (1969), qui représente une gamme assez large de données expérimentales pour un écoulement diphasique ascendant, est présentée sur la Fig.I.4. Le système des coordonnées de la carte sont respectivement les quantités de mouvements superficiels des phases liquides et vapeur. On peut constater que les conditions des différents régimes d'écoulement et les limites qui les séparent peuvent être exprimées comme une combinaison des flux de quantité de

mouvement superficielle des phases liquide et vapeur. Les frontières entre les différents régimes d'écoulements sont les critères qui identifient les points de transition du régime d'écoulement et sont souvent intéressants dans les applications pratiques.

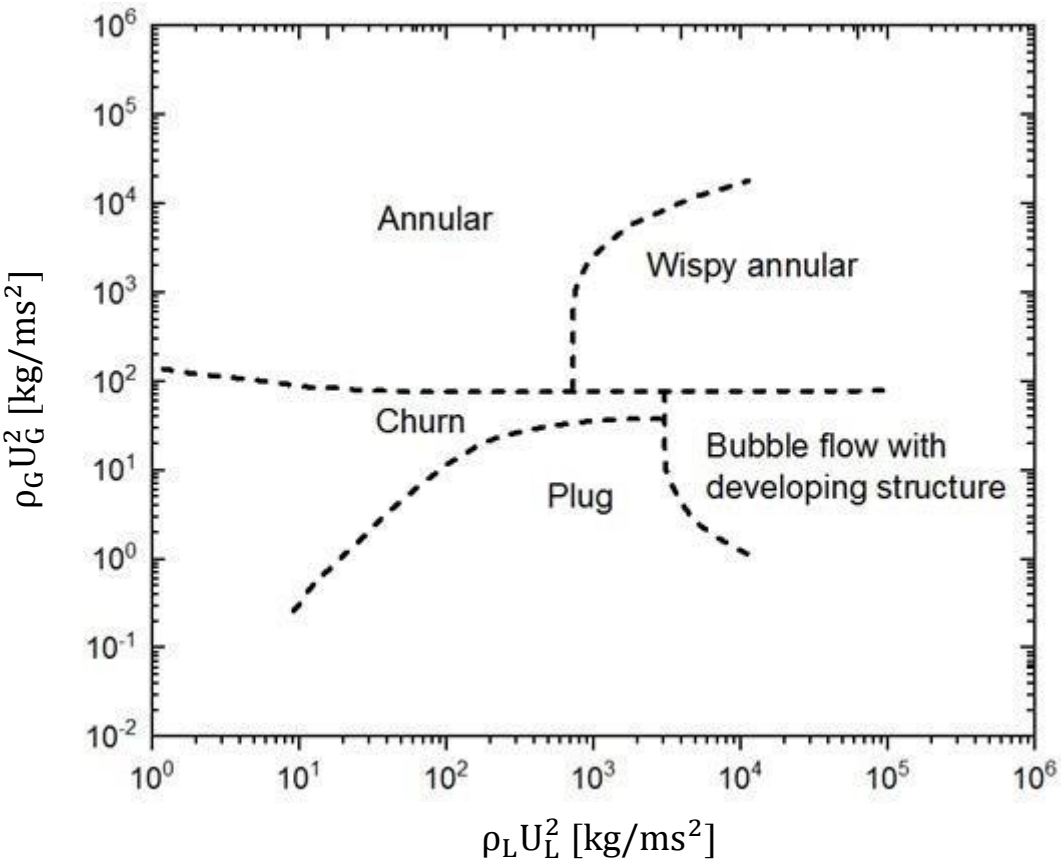


FIG.I.4 Carte d'écoulement vertical ascendant : Hewitt et Roberts (1969).

Taitel et Dukler (1977), Ishii et Mishima (1984) ont proposés des modèles pour des cartes d'écoulement diphasique vertical dans des conduites circulaires, La figure I.5 dresse une comparaison des cartes d'écoulement vertical d'Ishii et Mishima (1984) avec celles de Taitel et Dukler (1977). Ils donnent une indication du régime probable d'écoulement pour des tubes verticaux.

Pour les écoulements diphasiques horizontaux, la carte d'écoulements la plus utilisée, proposée par Taitel et Dukler (1976), est illustré dans la figure I.6. Cette carte est basée sur une méthode semi-théorique, et elle est plus difficile à utiliser (d'un point de vue de calcul) par rapport à d'autres cartes d'écoulements. La coordonnée horizontale de la carte de Taitel et Dukler (1976) est le paramètre Martinelli défini par :

$$X = \left[\frac{(dP_f/dz)_l}{(dP_f/dz)_v}\right]$$

Tel que : $(dP_f/dz)_l$ et $(dP_f/dz)_v$ représentent les gradients de pression des phases liquides et vapeurs s'écoulant dans le canal. La coordonnée verticale de la carte de Taitel et Dukler (1976) sont définies comme suit :

$$F = \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_l - \rho_v}}\frac{j_v}{\sqrt{Dgcos(\theta)}}$$

$$K = \left[\frac{\rho_v j_v^2}{(\rho_l - \rho_v)Dgcos(\theta)}\frac{Dj_l}{v_l}\right]^{1/2} = F[Re_l]^{1/2}$$

$$T = \left[\frac{(dp/dz)_l}{(\rho_l - \rho_v)Dgcos(\theta)}\right]^{1/2}$$

Où D est le diamètre du canal et θ est l'angle d'inclinaison du canal/l'horizontale. On peut voir que la détermination du régime d'écoulement à l'aide la carte de Taitel et Dukler (1976) requiert le gradient de pression des phases liquide et vapeur phases en écoulement le long du canal, qui doivent être déterminées à l'aide des modèles d'écoulement appropriés.

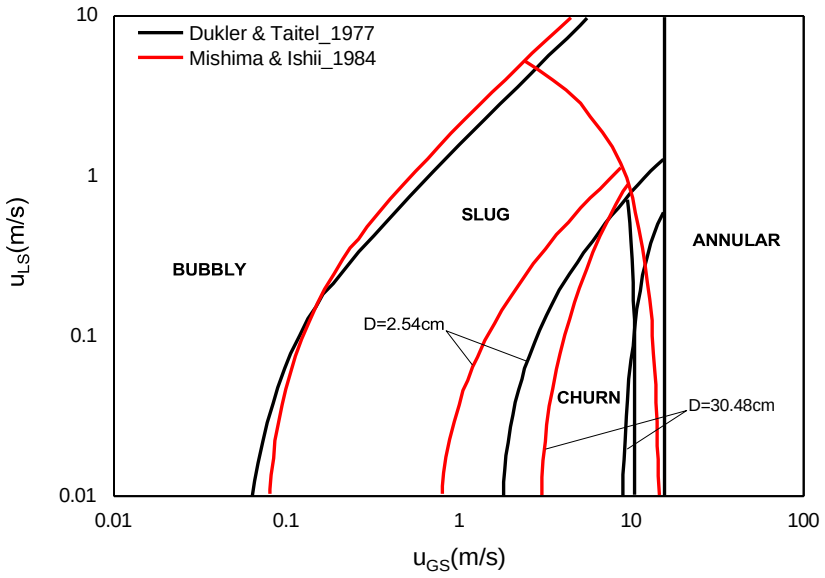


FIG.I.5 Carte d'écoulement vertical : comparaison d'Ishii et Mishima (1984) et Taitel et Dukler (1977).

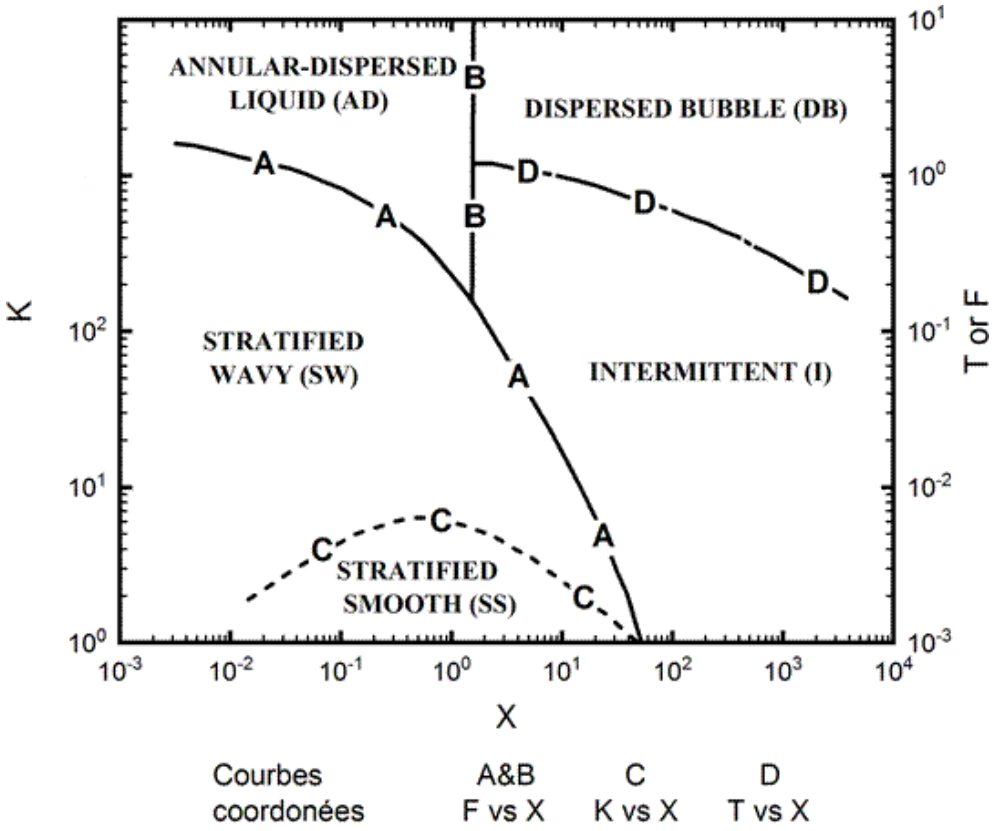


Figure I.6 : Carte du régime d'écoulement pour un écoulement diphasique horizontal (Taitel et Dukler, 1976).

CHAPITRE II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ECOULEMENTS DIPHASIQUES ADIABATIQUES DANS LES CONDUITES CAPILLAIRES

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 et verticales 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.

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:*

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

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 e gaz est mouillant	$F_{v-LG} = (\mu_L \frac{U_{LS}-U_I}{D_h} - \mu_G \frac{U_{GS}-U_I}{D_h})\,S$	$F_{v-G-paroi} = \frac{\mu_G U_{GS}}{D_h}\,S$ 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.

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

Interaction entre effet physique	**Nombre Adimensionnel**	**Formule**				**Nombre de confinement**
		Gaz	**Interaction entre phase**	**Liquide**	**Mélange**	
Inertie-Tension superficielle	*We*	$We_{GS} = \frac{\rho_{GS} U_{GS}^2 D_h}{\sigma}$		$We_{LS} = \frac{\rho_{LS} U_{LS}^2 D_h}{\sigma}$	$We_{MS} = \frac{\rho_{MS} U_{MS}^2 D_h}{\sigma}$	$Co_{c,i} = \frac{1}{We}$
Gravité-tension superficielle	*Eo*	$Eo = \frac{(\rho_L - \rho_G) D_h^2 g}{\sigma}$				$Co_{c,G} = \frac{1}{D_h}\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)}} = \frac{1}{\sqrt{Eo}}$
Viscosité-tension superficielle	*Ca*	$Ca = \frac{U_{GS}\mu_G}{\sigma}$	$Ca_I = \frac{1}{\sigma}(\mu_L \frac{U_{LS}-U_I}{D_h} - \mu_L \frac{U_{LS}-U_I}{D_h})$	$Ca = \frac{U_{LS}\mu_L}{\sigma}$	$Ca = \frac{U_{MS}\mu_M}{\sigma}$	
Inertie-Viscosité	*Re*	$\frac{\rho_G D_h U_{GS}}{\mu_G}$	$Re_I \frac{(\rho_L U_{LS}^2 - \rho_G U_{GS}^2) D_h}{\mu_L(U_{LS}-U_I) - \mu_G(U_{GS}-U_I)}$	$\frac{\rho_L D_h U_{LS}}{\mu_L}$	$\frac{\rho_m D_h U_{ms}}{\mu_m}$	$Co_{v,i} = \frac{1}{Re}$
Gravité-viscosité	*Je*	$Je_G = \frac{g\rho_G D_h^2}{\mu_G U_{GS}}$	$Je_I = \frac{g(\rho_L - \rho_G) D_h^2}{\mu_L(U_{LS}-U_I) - \mu_G(U_{GS}-U_I)}$	$Je_L = \frac{g\rho_L D_h^2}{\mu_L U_{LS}}$	$Je_M = \frac{g\rho_M D_h^2}{\mu_M U_{MS}}$	$Co_g = \frac{1}{D_h}\sqrt{\frac{\mu U}{\rho g}} = \frac{1}{\sqrt{Je}}$
Inertie-gravité	*Fr*	$Fr_G = \frac{U_{GS}^2}{D_h g}$	$Fr_G = \frac{U_{LS}^2 - U_{GS}^2}{2 D_h g}$	$Fr_L = \frac{U_{LS}^2}{D_h g}$	$Fr_M = \frac{U_{MS}^2}{D_h g}$	$Co_{g,i} = \frac{1}{Fr}$

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.

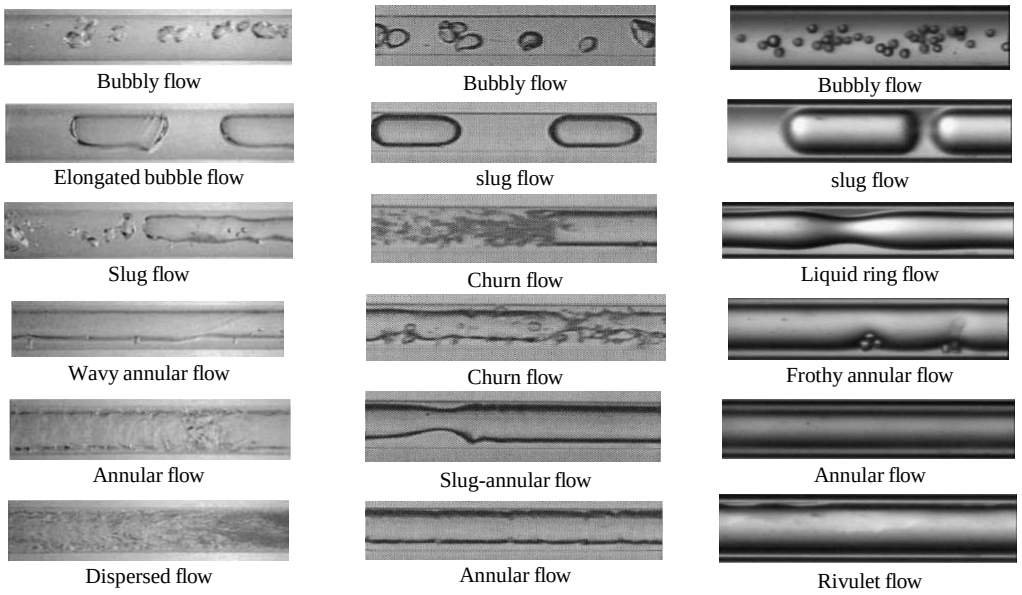


FIG.I I. 1 Comparaison des structures diphasiques en position horizontale (a) Structures en macrocanal ID: 5.5mm, Coleman and Garimella, 1999 (b) Structure en minicanal ID: 1.097mm, Triplett et al., 1999 and (c) Structures en microcanal ID: 100µm, Serizawa et al., 2002.

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.

I. 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 :

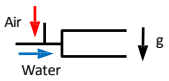
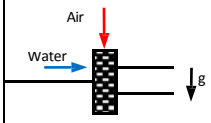
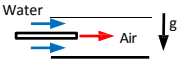
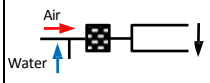
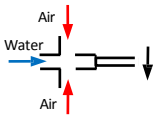
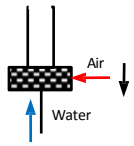
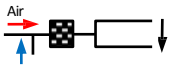
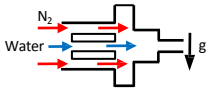
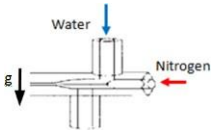
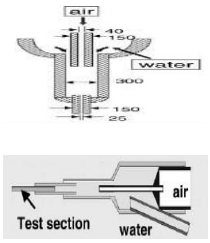
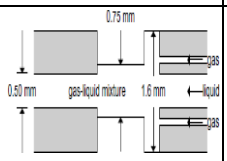
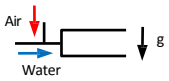
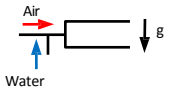
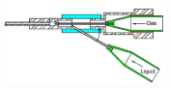
Auteurs	Schéma descriptif conditions d'entrée	Section d'essai	Structures d'écoulements
Damianides and Westwater, 1988		H, co-current, Pyrex glass, circular, d = 1 à 5mm, U_{GS} = 0.015–125.3 m/s; U_{LS} = 0.0024–5.72 m/s	Bubbly, dispersed, Taylor (elongated bubble/plug flow and slug flow), Taylor–annular (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 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 (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.

a- Ecoulement diphasique horizontal

Conduite horizontale $d \geq 1$ 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.2).

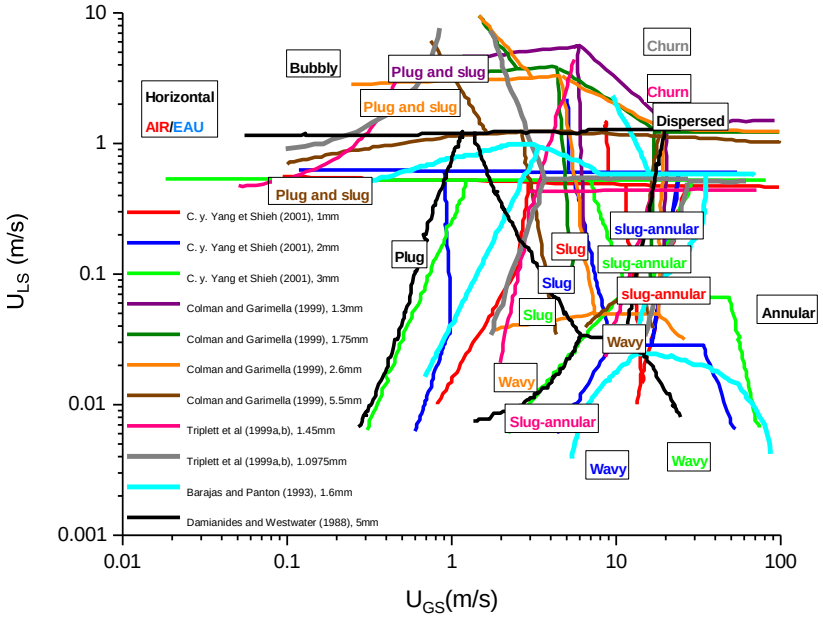


FIG.II. 2 Cartes de structures d'écoulements air/eau adiabatiques dans des conduites circulaires à faible diamètre de position horizontale (1mm ≤ d ≤ 5.5mm) obtenues par différents auteurs.

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. 3). 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.

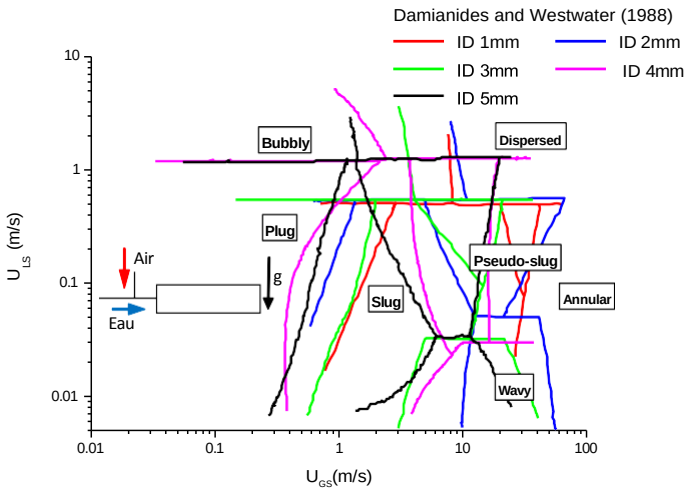


FIG.II. 3 Cartes de structures d'écoulements air/eau adiabatiques dans des conduites circulaires à faible diamètre en position horizontale (1mm ≤ d ≤ 5mm), Damianides et Westwater, 1988.

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. 4). 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.

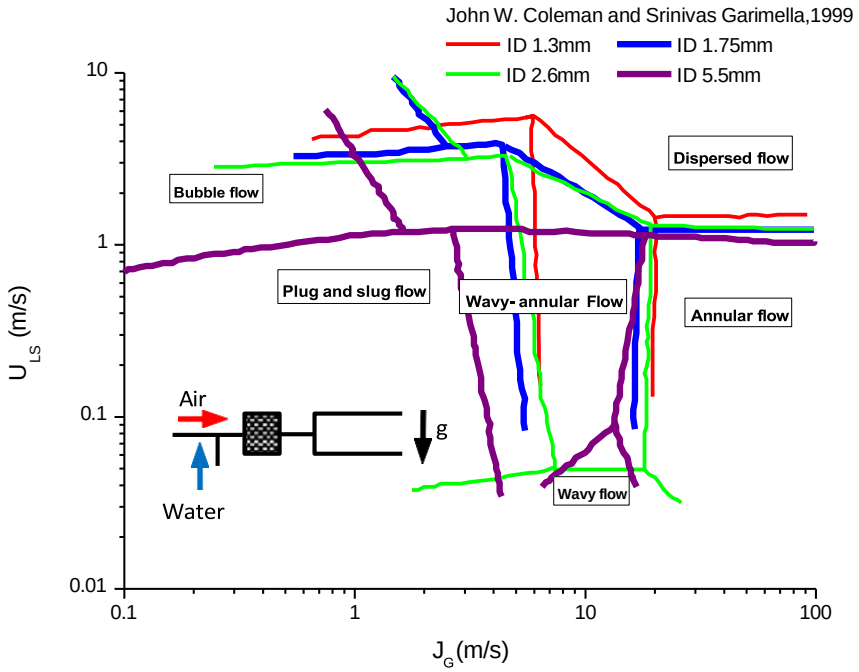


FIG. II. 4 Cartes de structures d'écoulements air/eau adiabatiques dans des conduites circulaire à faible diamètre en position horizontale (1.3mm ≤ d ≤ 5.5mm), Coleman et Garimella, 1999.

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. 5).

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. 5a, 5b).

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.

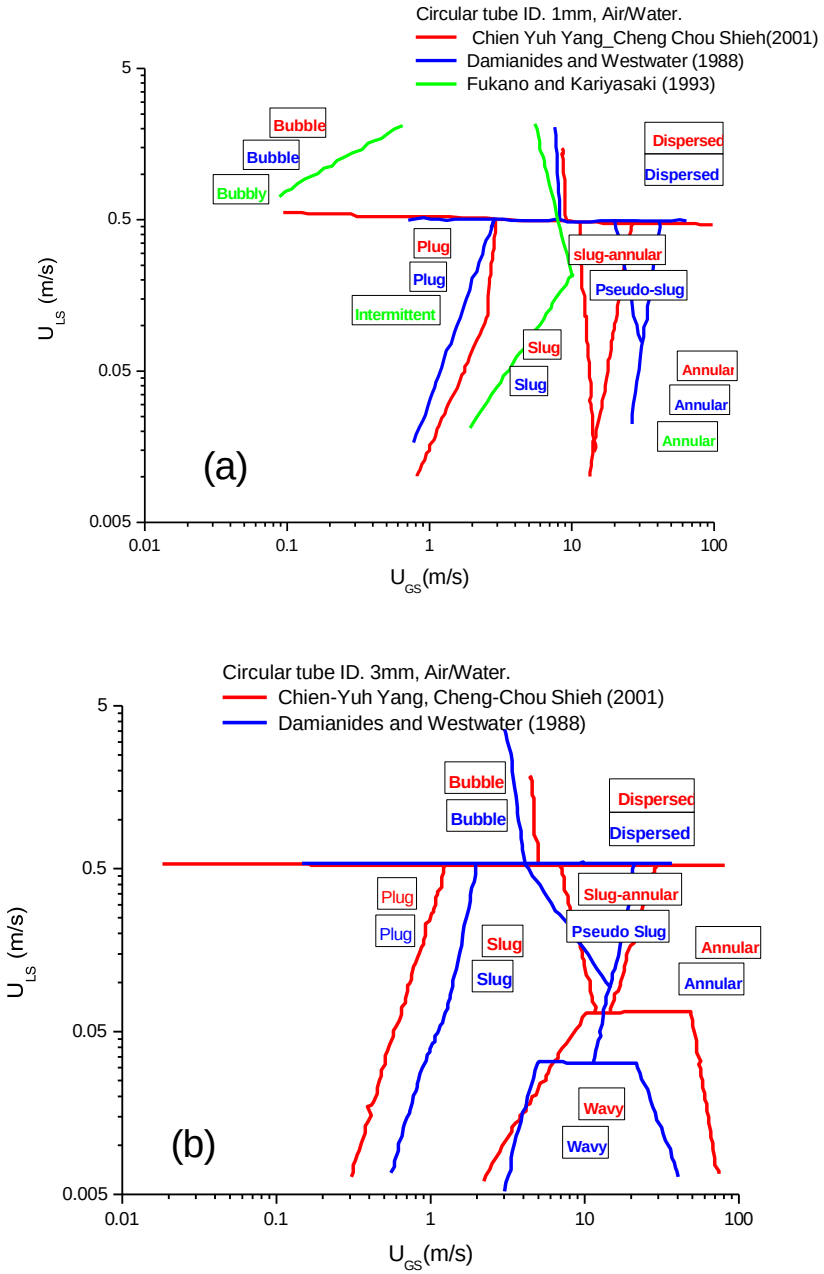


FIG. II. 5 Comparaison entre les cartes structures d'écoulements adiabatiques air/eau (Damianides et Westwater, 1988 ; Fukano et Kariyasaki 1993 ; Yang et Sieh 2001) pour des conduites circulaires horizontales à faible diamètre.

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.

b. Ecoulement diphasique en direction verticale ascendante

Conduite verticale $d \geq 1$ mm

En position verticale ascendante, il existe très peu de carte de structures d'écoulement en conduite circulaire à faible diamètre (Barnea et al., 1983 ; Wolk et al., 2000 ; Kariyasaki et al., 1992 ; Fukano et Kariyasaki, 1993 ; Mishima et Hibiki, 1996 ; Ide et al., 2007). Les cartes d'écoulements proposées en position verticale ascendante pour des conduites circulaires sont présentées dans la Figure (II. 6).

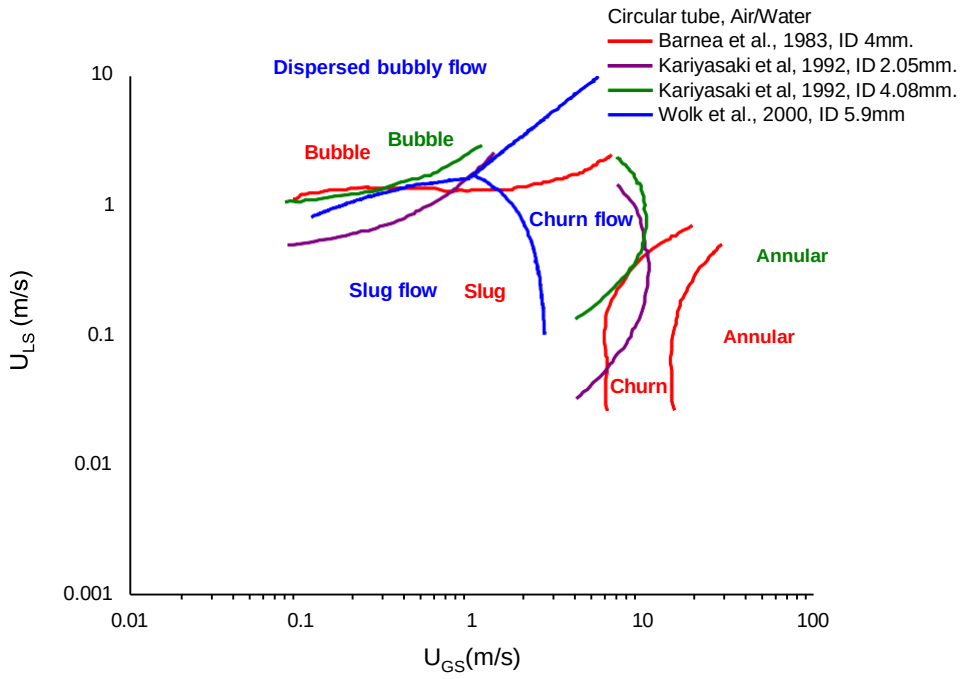


FIG.II.6 Cartes de structures d'écoulements diphasiques air/eau adiabatiques dans des conduites à faible diamètre en position verticale ascendante (Barnea et al., 1983 ; Kariyasaki et al, 1992 ; Wolk et al., 2000).

Kariyasaki et al., 1992 ont étudié l'effet du diamètre de la conduite sur les structures d'écoulements. La figure (II. 6) indique les principales différences entre les lignes de transition du petit tube de 2.05mm de diamètre comparé au grand tube de 4.08mm de diamètre. A première vue, on remarque un décalage de la ligne de transition de l'écoulement à bulle (bubbly flow) vers l'écoulement à poche (slug flow) à des vitesses apparentes du gaz et du liquide plus basses U_{LS}, U_{GS}, respectivement.

Une diminution sur la taille de tube va décaler remarquablement la ligne de transition de l'écoulement annulaire (annular flow) vers le bas à des vitesses apparentes du gaz et du liquide plus faible ; Il y avait, cependant, peu d'effet de la taille de tube sur la transition de l'écoulement à poche (slug flow) vers l'écoulement annulaire (annular flow) à des vitesses apparentes du gaz plus élevées.

L'effet de la taille du canal sur l'extension de la structure à bulle a pu être attribué à la dominance de la force de poussée vis-à-vis des forces de tension superficielle d'attachement qui favorise le détachement de la bulle avec une décroissance de la taille du canal ; ce qui signifie que les surfaces formées de bulle sont facilement perturbées par la rupture produisant ainsi de petites bulles dispersées formant de ce fait un écoulement à bulle dispersées (Dispersed Bubbly flow). Ce qui explique l'extension de la structure d'écoulement à bulle à U_{GS} et U_{LS} plus bas.

A des écoulements du gaz et du liquide plus élevés, l'inertie dominera par la suite aidée en cela par la poussée. La transition vers l'écoulement annulaire (annular flow) est alors indépendante de la dimension du canal. Cependant, en raison du manque d'études, l'effet de la gravité sur des structures d'écoulements en mini et microcanal n'est pas concluant.

Points communs et différences :

Les principales structures d'un écoulement diphasique sont observées pour le diamètre de 6 mm. Au fur et à mesure que le diamètre décroit, la structure stratifiée s'atténue progressivement jusqu'à disparition « totale » pour le diamètre de 1 mm (Damianides et Westwater 1988).

Pour les petits diamètres étudiés (d = 20 µm), la structure à bulle n'est pas observée par la majorité des auteurs excepté Serizawa et al., 2002. Pour les diamètres de tubes supérieurs à 20 µm, plusieurs d'entre eux déclarent avoir observé cette structure mais ne rapportent pas de photos correspondantes (Chung and Kawaji 2004). Il semblerait donc que cette structure n'apparait que dans des conditions spécifiques. Les autres structures principales (poche, annulaire, dispersé) existent mais avec des manifestations différentes

selon les auteurs. Certains auteurs mentionnent des comportements instables et intermittents de ces structures (Saisorn et Wongwises 2008, 2009 et 2010).

A partir de ces constatations, les cartes d'écoulement vont être modifiées au fur et à mesure que la taille du tube de test décroit. Le confinement va donc influencer notablement la structure d'écoulement diphasique. La structure à bulle aura tendance à disparaitre au profit de la structure à poche et cette dernière disparait au profit de la structure annulaire.

Cette réduction du diamètre va influer sur les cartes d'écoulement. La ligne de transition poche-annulaire va se décaler vers des vitesses apparentes du gaz de plus en plus faibles. La ligne de transition poche-bulle va se décaler vers de vitesses du liquide de plus en plus importantes. Lorsque le diamètre du tube de test devient très petit, l'écoulement diphasique présente un comportement intermittent. Il se manifeste par l'apparition de la structure dispersée fortement perturbée par les parois du tube ayant un rôle prépondérant sur l'écoulement et la structure diphasique.

CHAPITRE III. RESULTATS – I
STRUCTURES D'ECOULEMENTS DIPHASIQUES DANS UNE CONDUITE HORIZONTALE

Chapitre III. Résultats - I

Structures d'écoulements diphasiques dans une conduite horizontale

III. 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. III. 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 ».

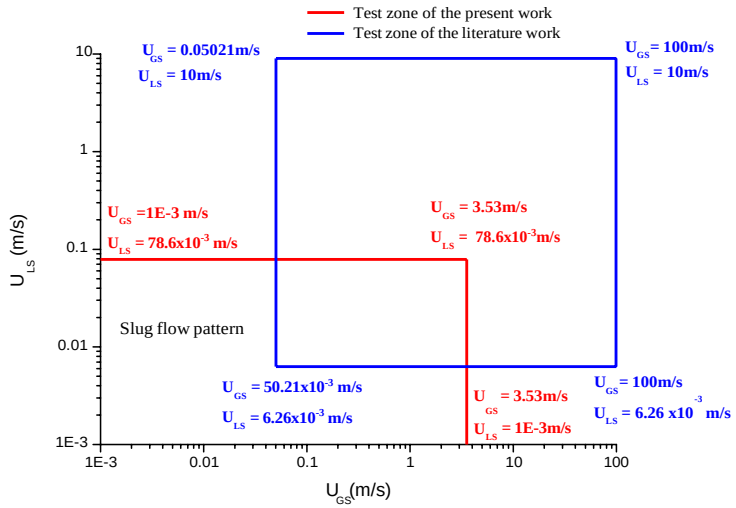


FIG. III. 1 Zone de test expérimental du présent travail.

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. III. 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.

III. 2 Visualisation des structures d'écoulements diphasiques

Interprétation des visualisations

La figure (III. 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. III. 2).

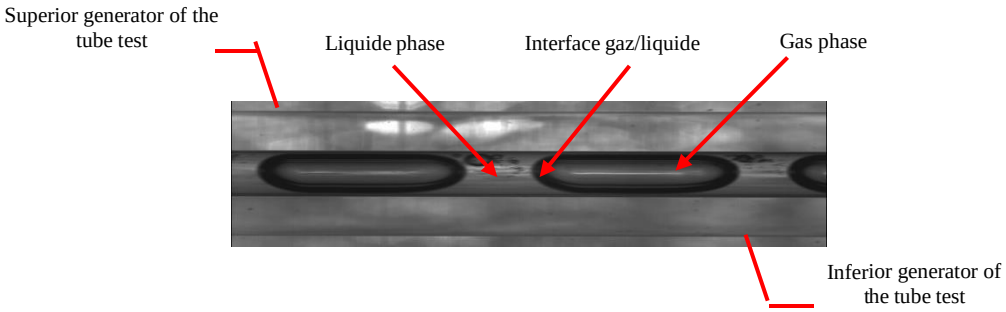


FIG. III. 2 Analyse d'une image d'un ''écoulement diphasique'': distinction entre la phase liquide et la phase gazeuse.

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 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.
- 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.

III. 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. 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. III. 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. III . 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. III. 3. b).

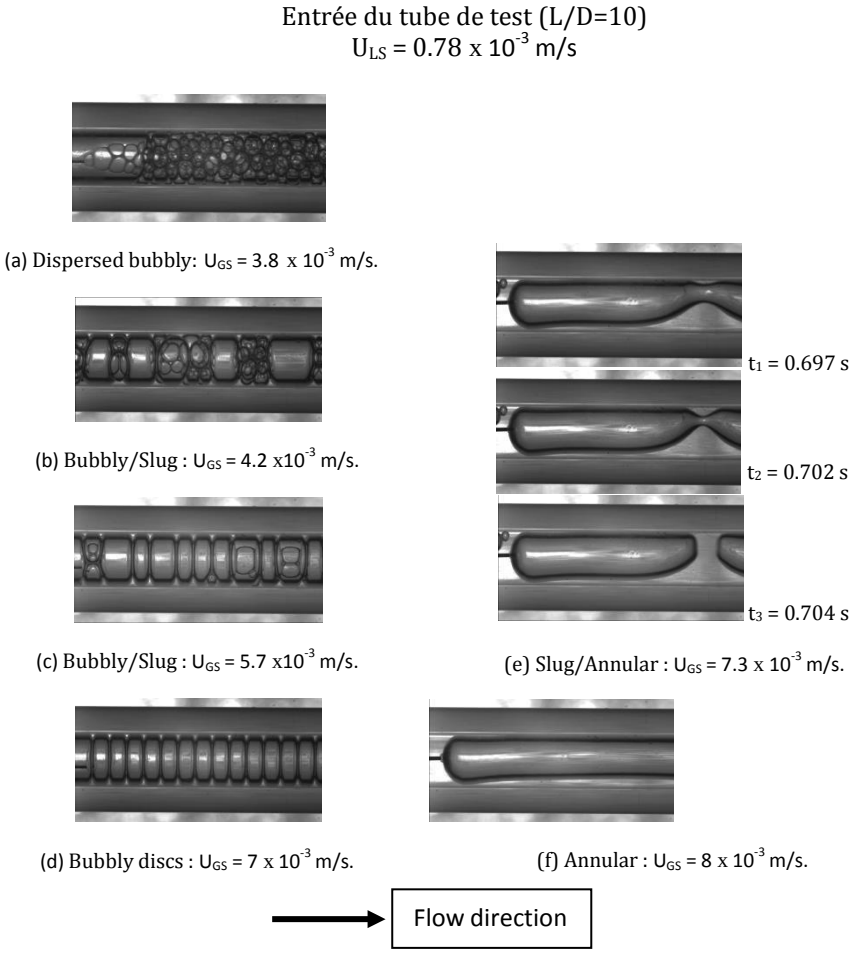


FIG. III. 3 Ecoulement typique observé à l'entrée du tube de test (ID3mm) à très faible vitesse apparente du liquide (U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s).

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. III. 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. III. 3. f).

L'écoulement diphasique présente une structuration annulaire instable (Fig. III. 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. III. 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. III. 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. III. 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. III. 4. d).

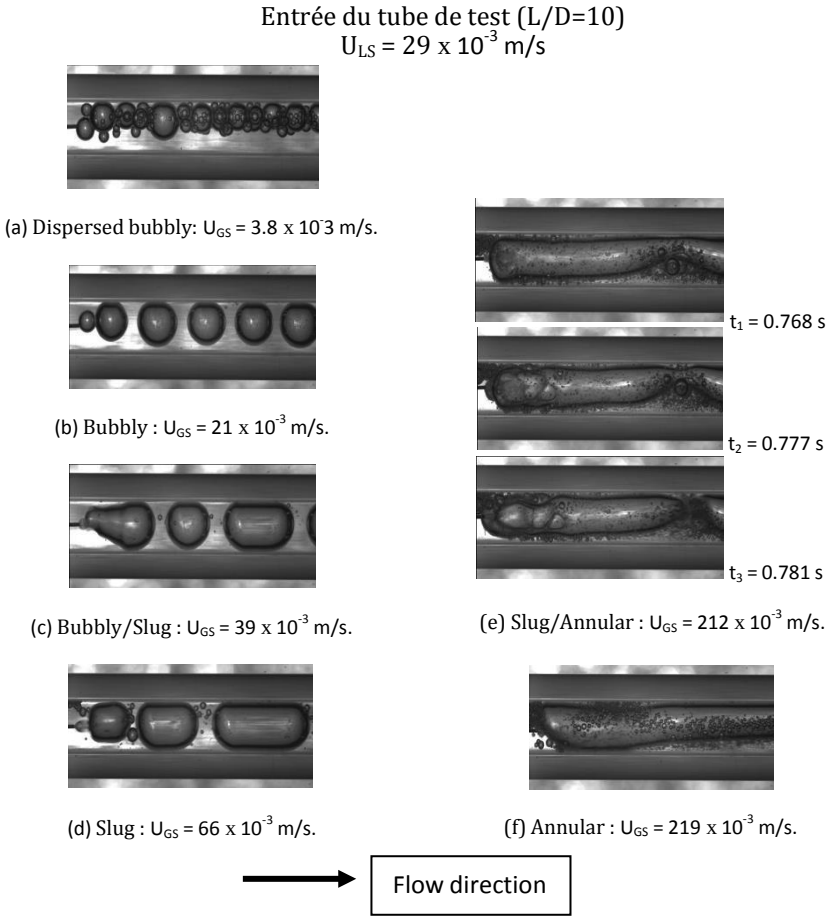


FIG. III. 4 Ecoulement typique observé à l'entrée du tube de test (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide modérée (U_{LS} = *29* x *10^{-3} m/s*).

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. III. 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. III. 5. a). Pour des vitesses supérieures, la taille des bulles croit (Fig. III. 5. b) jusqu'à transiter vers la structure à poches (Fig. III. 5. d).

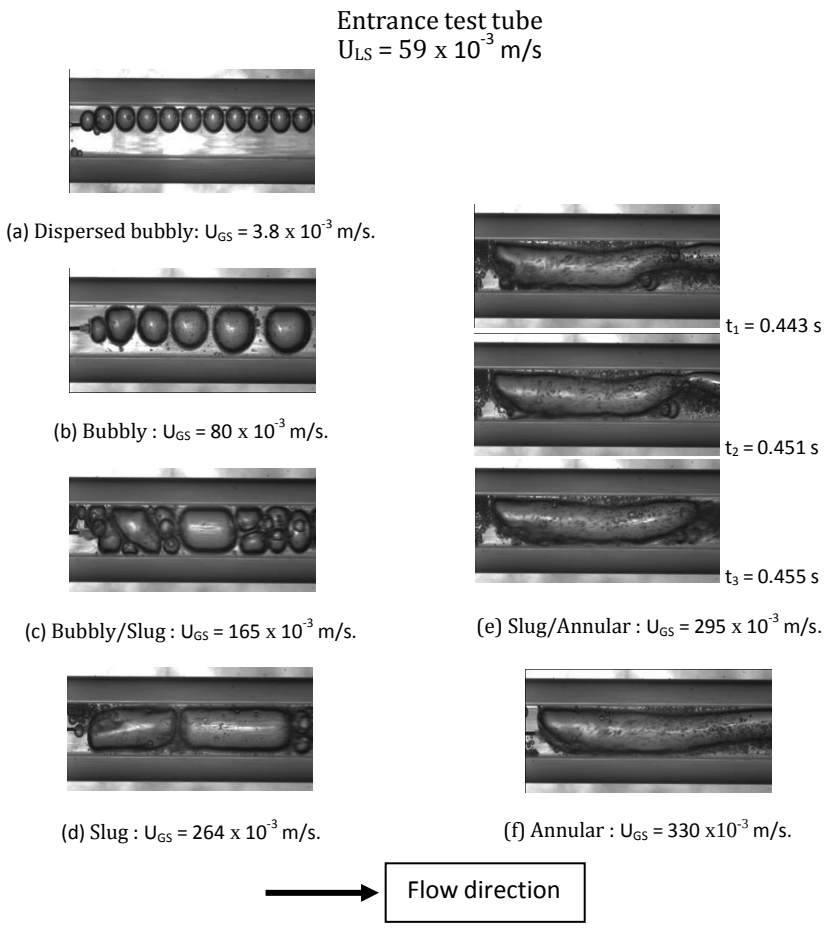


FIG. III. 5 Ecoulement typique observé à l'entrée du tube de test (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide élevée (U_{LS} = 59 x 10^{-3} m/s).

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. III. 5. c). ou annulaire instable ou stable (Fig. III. 5. e. f).

III. 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. III. 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. III. 6.b.c.d). Dans ce dernier cas, les ondulations d'interfaces peuvent être générées sans doute par des effets capillaires.

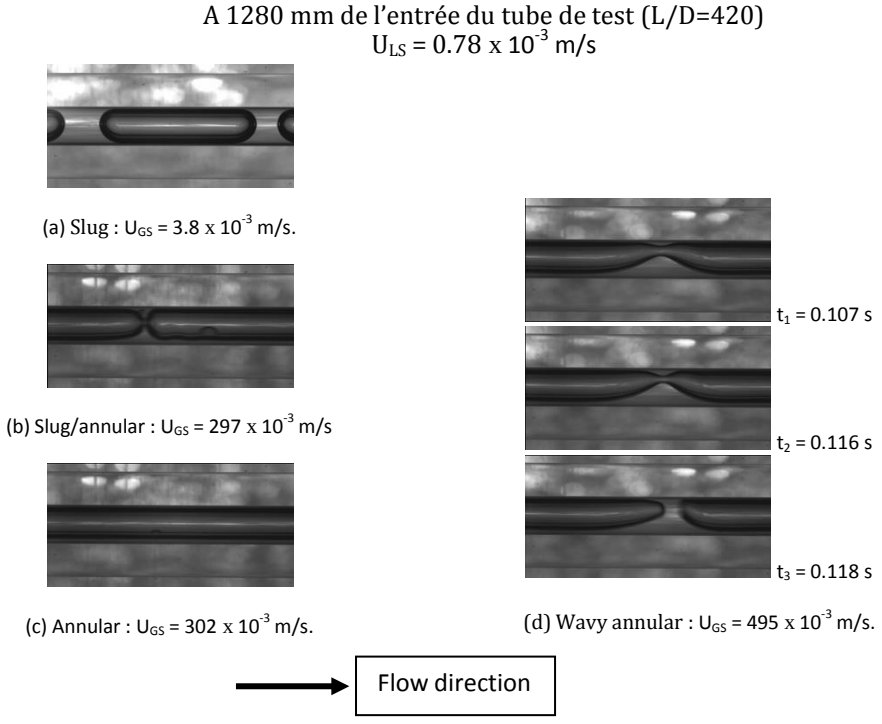


FIG. III. 6 Ecoulement typique observé à 1280 mm de l'entrée du tube de test (ID 3mm), à très faible vitesse apparente du liquide (U_{LS} = *0.78* x 10^{-3} *m/s*).

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. III. 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.

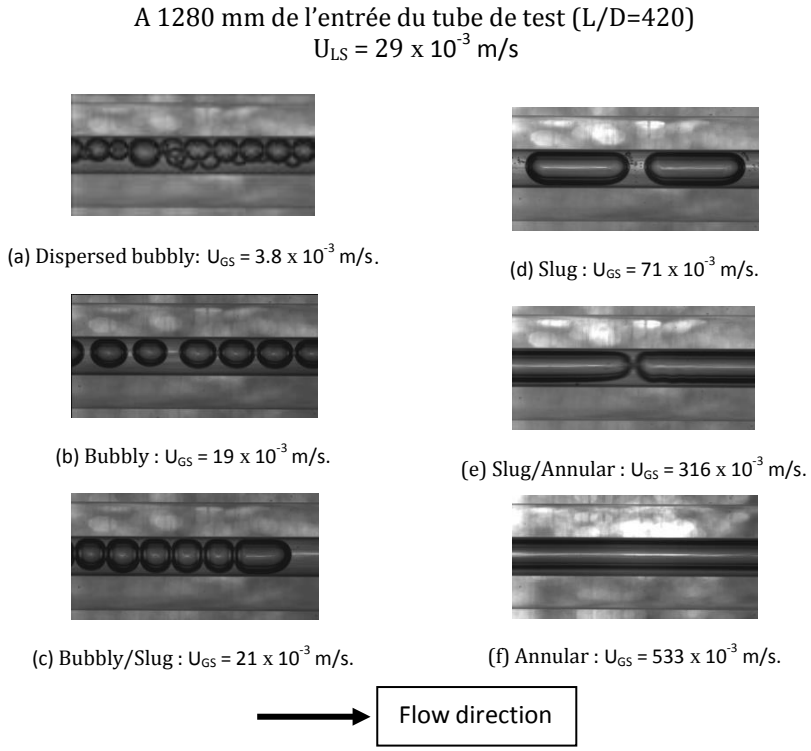


FIG.III.7 Ecoulement typique observé à 1280 mm de l'entrée du tube de test (ID 3mm), vitesse apparente du liquide élevée (U_{LS} = *29* x *10^{-5} m/s*).

III.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 III. 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 III. 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 (III. 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.

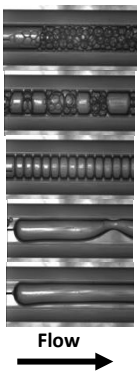
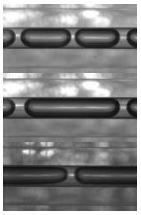
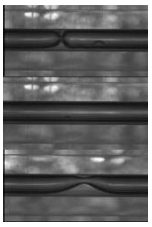
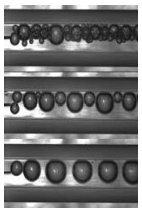
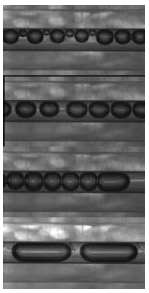
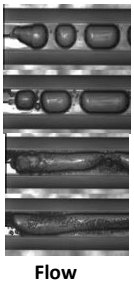
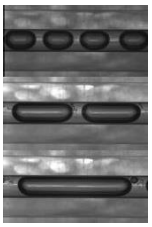
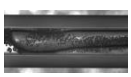
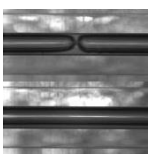
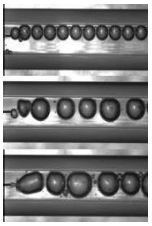
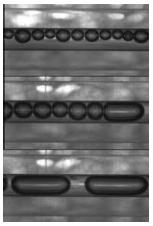
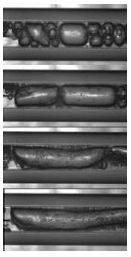
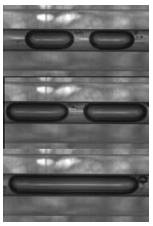
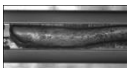
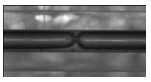
	Entrance without correction chamber (L/D = 10)		Entrance with correction chamber (L/D = 420)	
	Pattern	Superficial gas velocity	Pattern	Superficial gas velocity
(a) Low superficial velocity $U_{LS} = 0.78 \times 10^{-3}$ m/s	 Flow	$3.77\ 10^{-3}$ m/s ≤ U_{GS} ≤ $4.13\ 10^{-3}$ m/s ➔ Bubbly $4.25\ 10^{-3}$ 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).

III.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 .

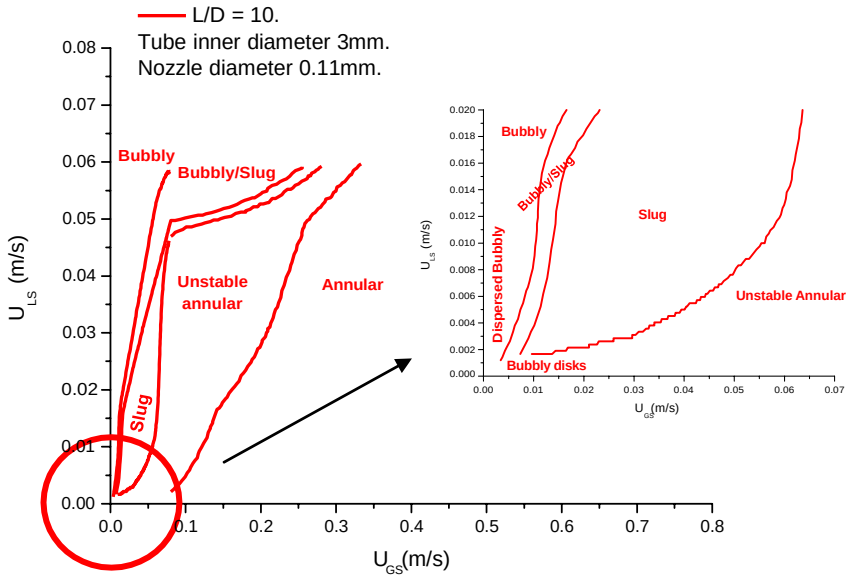


FIG. III. 8 Carte de structures d'écoulements diphasiques air/eau dans un tube horizontal de 3 mm de diamètre intérieur et avec une aiguille d'injection d'air de 110 µm de diamètre intérieur, établie à la zone où le mélange est effectué.

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).

III. 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.

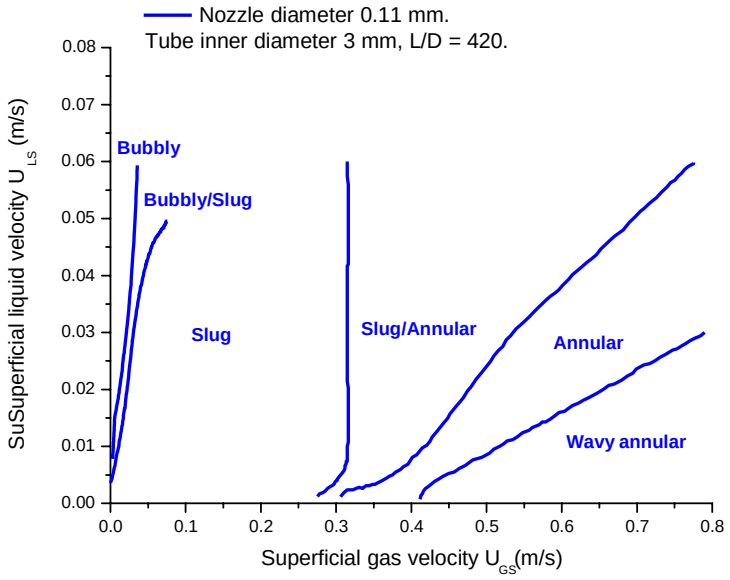


FIG. III. 9 Carte de structures d'écoulements diphasiques air/eau dans un tube horizontal de 3mm de diamètre intérieur et avec une aiguille d'injection d'air de 110 µm de diamètre intérieur, établie à 128cm à partir de l'entrée de tube de test.

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 ».

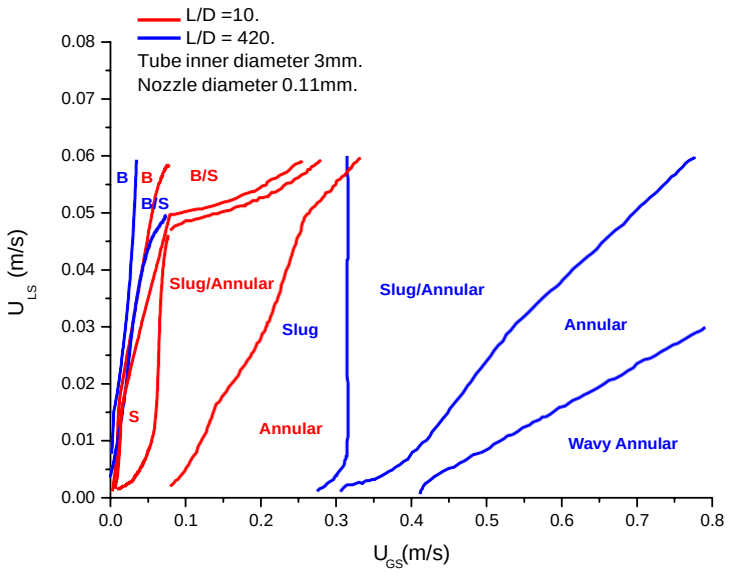


FIG. III. 10 Comparaison entre les cartes établies au niveau de la zone de mélange et à 1280mm de l'entrée du tube de test de 3mm de diamètre et une aiguille d'injection du gaz à 110 µm diamètre intérieur.

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.

CHAPITRE IV. RESULTATS – II
STRUCTURES D'ECOULEMENTS DIPHASIQUES ASCENDANTS DANS UNE CONDUITE VERTICALE

Chapitre IV. Résultats - II
Structures d'écoulements diphasiques ascendants dans une conduite verticale

IV. 1 Introduction

Le travail expérimental établi dans cette partie a pour objectif d'étudier les écoulements diphasiques gaz-liquide ascendant dans une conduite verticale de 3 mm de diamètre intérieur, sans changement de phase ni transfert de chaleur. Afin d'obtenir une telle configuration, la veine de mesure pour cette expérience est orientée verticalement avec le système d'injection air/eau positionné en bas de la veine de mesure. La vitesse apparente du liquide et celle du gaz varient respectivement de 0.78×10^{-3} m/s à 79×10^{-3} m/s et de 2.3×10^{-3} m/s à 3.54 m/s, respectivement.

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

IV. 2 Visualisation des structures d'écoulements diphasiques ascendantes

Nous présentons dans cette partie les structures d'écoulements diphasiques observées dans deux zones différentes de la conduite, dans la zone de formation du mélange diphasique à l'entrée du tube à L/D = 10 et à une position L/D = 420 de l'entrée lors d'un écoulement vertical ascendant.

Dans les présentes investigations, les gammes de débits ont été suffisamment étendues afin d'explorer attentivement les structures d'écoulements diphasiques. Comme dans le chapitre précédent, afin de montrer l'influence du débit de liquide et de gaz sur les structures d'écoulements, trois vitesses apparentes du liquide distinctes sont discutées dans cette partie : une faible vitesse apparente $U_{LS} = 0.78 \times 10^{-3}$ m/s, une vitesse apparente modérée $U_{LS} = 29 \times 10^{-3}$ m/s et une vitesse apparente élevée $U_{LS} = 59 \times 10^{-3}$ m/s. Pour chacune des valeurs de la vitesse apparente du liquide, nous procédons à une variation de la vitesse apparente du gaz allant de 2.3×10^{-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 par la technique utilisée dans la zone de mélange est effectuée sans utilisation de la chambre de corrections optique suite à son

incompatibilité géométrique au niveau de l'entrée du tube. Nous avons pu observer trois structures principales à savoir la structure à bulles dispersées, poche-bouchon et annulaire instable. Cependant, des structures secondaires apparaissent clairement lors des transitions d'une structure principale à une autre, à la différence des études expérimentales antérieures (Fukano et Kariyasaki, 1993 ; Ide et al., 2007).

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

A très faible vitesse apparente du gaz U_{GS} = 3.8 x 10^{-3} m/s, il y a formation de la structure de transition bulle dispersée/poche (Dispersed bubbly/Slug flow) à l'entrée du tube de test (Fig. IV. 1). Suite à la très faible vitesse apparente de l'eau dans la conduite, l'effet d'entrainement de l'air est très faible comparé à la poussée d'Archimède. Il y a naissance de grandes poches d'air allongées axialement, séparées par de petites bulles distinctes de très petites tailles collées les unes aux autres et qui remontent lentement le long de la conduite. Ces poches résultent de la coalescence des bulles ou de la formation des poches au niveau du bec de la buse d'injection d'air positionné à 3 cm de l'entrée de la conduite.

Pour une vitesse apparente du gaz plus élevée U_{GS} = 8.25 x 10^{-3} m/s, la structure à poche-bouchon (Slug flow) se développe préférentiellement au niveau de la buse d'injection. La poche de gaz est confinée dans la direction transversale et allongée dans la direction axiale de la conduite ; sous l'effet du cisaillement et de la poussée l'avant de la poche est plus arrondi que sa partie arrière. La distance entre poches, très étroite, est occupée ainsi par de minces bouchons liquides qui sont propulsés par les poches de gaz vers le haut de la conduite. La taille des bouchons liquides ne subit aucune modification observée avec l'augmentation de la vitesse du gaz. Un film liquide d'épaisseur régulière est glissé entre la poche et la paroi latérale interne de la conduite. Sous l'effet de la force de pesanteur et pour une vitesse du gaz réduite, le film liquide est en écoulement inverse (Reversel flow) produisant un écoulement à contre-courant bien que l'écoulement du mélange diphasique (result two-phase flow) soit dans la direction verticale ascendante. C'est potentiellement dans cette situation que l'écoulement commence à être détruit mécaniquement. En augmentant la vitesse apparente du gaz à U_{GS} = 47 x 10^{-3} m/s, une concentration de fines microbulles se forme au niveau du bec d'injection de gaz. Ces microbulles générées suite aux vitesses réelles importantes de la phase gazeuse à la sortie du bec d'injection du gaz (U_G = 35 m/s ≈ 126 km/h, Re_G = 258). L'air mixé avec l'eau distillée en co-courant à l'entrée de la conduite est diffusé en microbulles dans un écoulement liquide continu ascendant. Par la suite une poche de gaz se développe au niveau du bec de la buse d'injection du gaz entrainant avec elle les microbulles déjà formées,

ce processus se répète à nouveau d'une façon périodique. La concentration des microbulles entre les poches de gaz s'intensifie avec l'augmentation progressive de la vitesse apparente du gaz jusqu'à ce que les bouchons liquides disparaissent et laissent place aux microbulles à U_{GS} = 146 x 10^{-3} m/s (Fig. IV. 1. d).

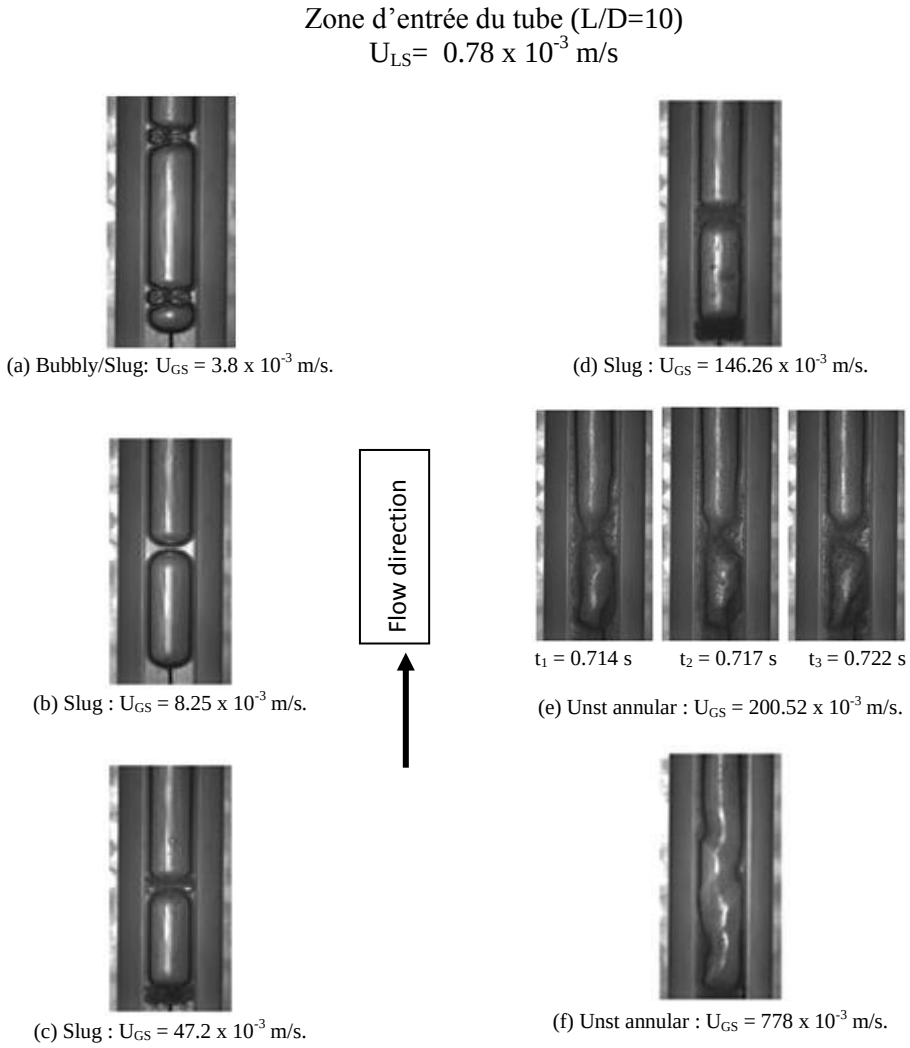


FIG. IV. 1 Structures d'écoulement observées dans la zone d'entrée du tube (ID 3mm) à très faible vitesse apparente du liquide (U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s).

Pour des vitesses apparentes du gaz suffisamment élevées U_{GS} = 200.52 x 10^{-3} m/s, a lieu un écoulement instable qui se caractérise par une interface gaz-liquide déformée dans une zone où les deux phases sont fortement agitées empêchant la structure annulaire de s'établir. Ce phénomène d'agitation est dû au mouvement ascendant de la phase gazeuse et aux mouvements de retombée et remontée du film liquide autour de la poche de gaz produisant ainsi un écoulement à contre – courant. Ainsi, une rupture extrêmement rapide de la structure annulaire instable en aval de la buse d'injection est observée. Simultanément il y' a formation

de microbulles de gaz. C'est un mécanisme complexe d'atomisation qui se superpose à la formation de la structure annulaire instable. Ces microbulles s'intensifient au fur et à mesure que la vitesse apparente du gaz augmente.

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, il y' a formation d'une structure à bulles dispersées (Fig. IV. 2.a). Ces bulles sont de petites tailles et de formes distinctes, occupent une partie de la section du tube de test. Sous l'effet de la poussée d'Archimède, les bulles remontent lentement dans la colonne du liquide en écoulement vertical ascendant avec une vitesse approximativement égale à la vitesse du liquide. La structure d'écoulement sera presque homogène.

En augmentant la vitesse apparente du gaz U_{GS} = 27.72 x 10^{-3} m/s, la taille des bulles formées augmentent, celles-ci remontent plus rapidement la conduite et forment une chaine régulière de bulles presque sphérique en mouvement hélicoïdal (Fig. IV. 2.b).

En augmentant encore la vitesse apparente du gaz U_{GS} = 29.48 x 10^{-3} m/s, la structure de transition bulle/poche apparait ; c'est une succession de poches suivie par plusieurs bulles entassées les unes aux autres en aval de la buse (Fig. IV. 2.c). La poche de gaz se forme au niveau du bec de l'aiguille ou par coalescence de bulles au niveau de cette zone. En augmentant progressivement la vitesse apparente du gaz jusqu'à une certaine valeur limite égale à U_{GS} = 58.97 x 10^{-3} m/s, un déplacement progressif vers le haut de la zone de formation de la structure de transition bulle/poche est observé. A partir de cette vitesse limite du gaz (U_{GS} = 58.97 x 10^{-3} m/s), la structure à poche-bouchon (Slug), se développe au niveau de la buse d'injection avec la formation de fines petites bulles satellites (Fig. IV. 2. d).

Pour une vitesse apparente du gaz encore plus élevées U_{GS} = 106 x 10^{-3} m/s, les poches de gaz s'allongent et se fractionnent d'une façon désordonnée produisant un écoulement de poches et de bulles collées les unes aux autres, de plus en plus désordonnée suite à l'augmentation de la vitesse apparente du gaz. Ainsi, une structure connue principalement sous le non de structure pulsatile ou agitée (Churn flow) fait son apparition. C'est une structure transitoire entre la structure à poche-bouchon et la structure annulaire, typique à l'écoulement vertical ascendant. Dans la littérature, la terminologie adoptée pour cette structure diffère d'un auteur à un autre (Brauner and Barnea, 1986). Elle est nommée parfois comme structure à poche mousseuse (frothy slug flow), structure à poche dispersée (dispersed slug flow), structure annulaire pulsatile (pulsating annular flow) ou structure annulaire et à poche (annular and slug pattern). A des fins d'établissement d'un classement des structures

d'écoulements, nous considérons que cette structure est une structure secondaire qui apparait lors de la transition de la structure poche-bouchon (Slug) vers la structure annulaire (annular). on va nommer structure de transition poche/annulaire fractionnée (breakup slug/annular).

Pour une vitesse apparente du gaz suffisamment élevée U_{GS} = 212 x 10^{-3} m/s, les poches et les bulles coalescent dans cette zone de mélange. En conséquence, un écoulement annulaire instable apparait. Cette situation est similaire au cas précédent à faible vitesse apparente du liquide U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s.

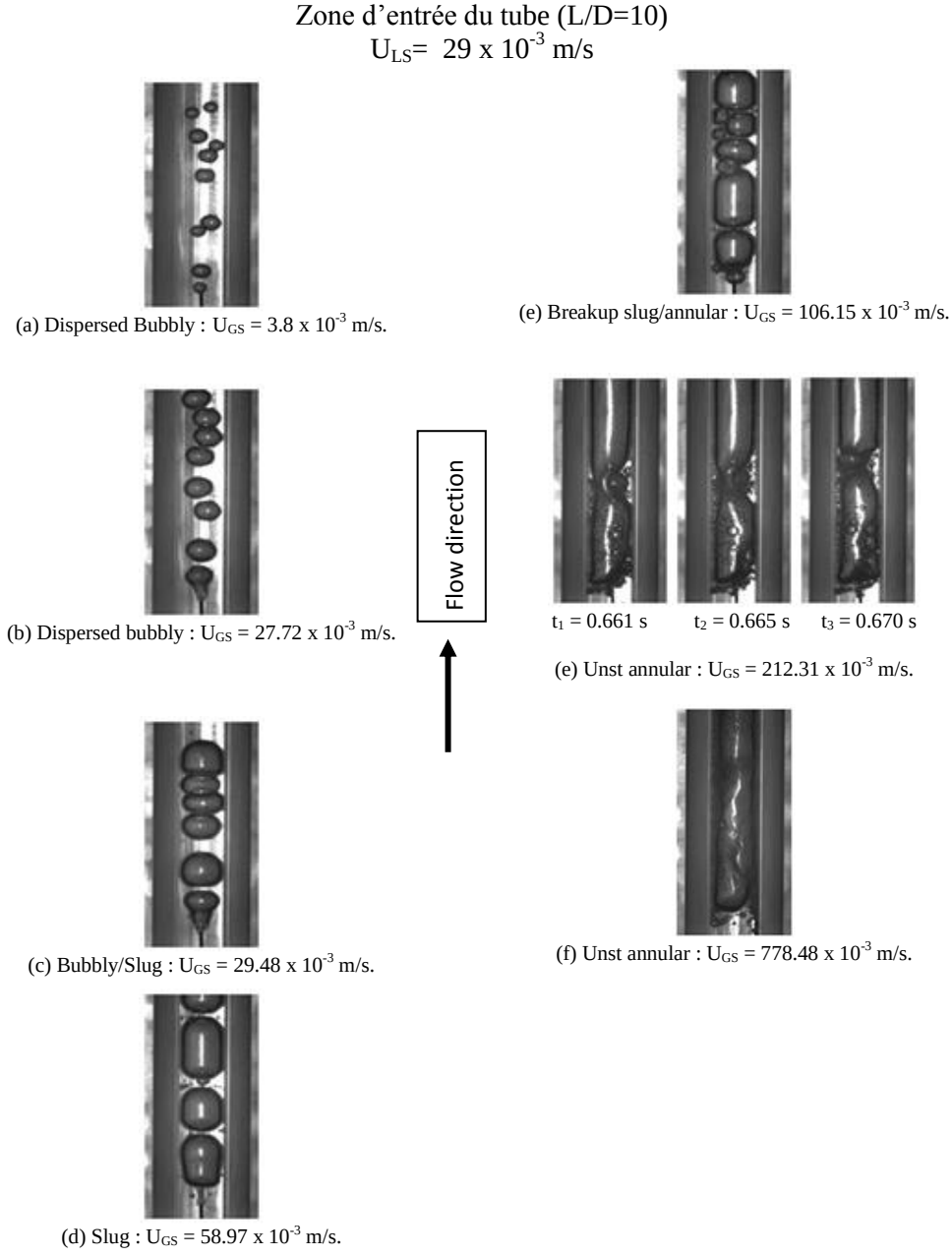


FIG. IV. 2 Structures d'écoulement observées dans la zone d'entrée du tube (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide modérée (U_{LS} = 29 x 10^{-3} m/s).

c- Vitesse de la phase liquide élevée (U_{LS} = 58 x 10^{-3} m/s, Re_{LS} = 176.7)

En augmentant la vitesse apparente du gaz progressivement pour une vitesse du liquide élevée, les structures principales (bulles dispersées, poche-bouchon et annulaire instable) et de transitions (bulle-poche, poche/annulaire fractionnée) observées sont identiques à celles des résultats obtenus au cas précédent où la vitesse de la phase liquide est modérée avec quelques différences de comportement.

A très faible vitesse apparente du gaz, les bulles dispersées formées ont une taille beaucoup plus petite, cela est du aux forces de cisaillement accrues avec l'augmentation du débit d'eau (Fig. IV. 3.a). Pour des plus grandes vitesses de gaz, la taille des bulles croit et celles-ci restent collées les unes aux autres en étant en ascension rapide sur toute la colonne du liquide en mouvement (Fig. IV. 3.b) et ce jusqu'à l'apparition de la structure bulle/poche (Fig. IV. 3. c).

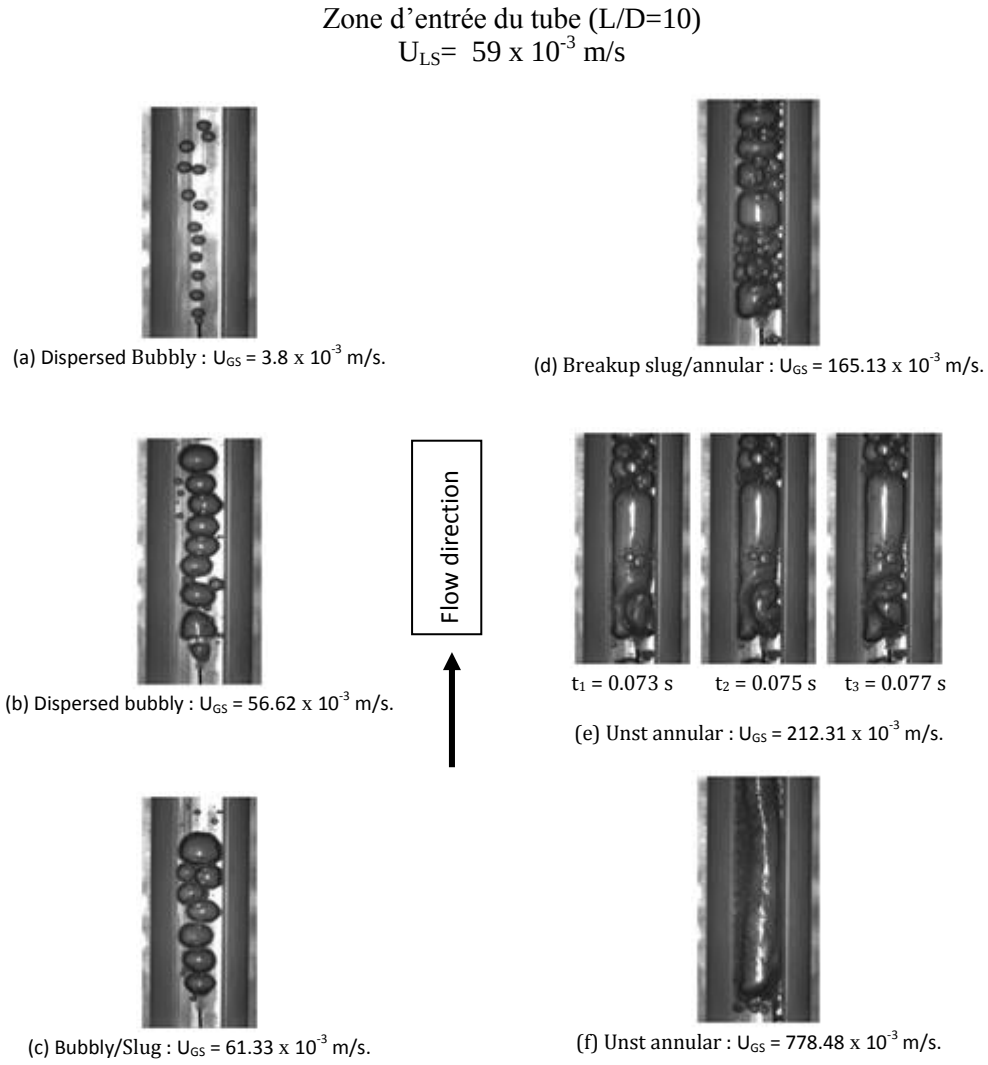


FIG. IV. 3 Structures d'écoulement observées dans la zone d'entrée du tube (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide élevée (U_{LS} = 59 x 10^{-3} m/s).

La structure de transition bulle-poche se manifeste de la même manière que le cas précédent, mais avec davantage de bulles de gaz présentes derrière la poche de gaz et transitant directement vers la structure poche/annulaire intensivement fractionnée et désordonnée (Fig. IV. 3. d. e). Pour ce cas à vitesse apparente du liquide élevée, la structure poche-bouchon n'apparait pas.

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

Les structures d'écoulement obtenues en écoulement vertical ascendant visualisées à L/D=420 à partir de l'entrée de la conduite sont présentées dans cette partie. La visualisation des structures est établie avec l'utilisation d'une chambre de correction optique. A des conditions d'écoulements données, on a observé différentes structures d'écoulement selon les vitesses des deux phases.

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

Pour une très faible vitesse du gaz (U_{GS} = 3.8 x 10^{-3} m/s), la structure poche-bouchon fait son apparition (Fig. IV. 4.a). Cette structure est caractérisée par des poches de gaz cylindriques allongées axialement, épousant la majeure partie de la conduite et avec des interfaces lisses. Sous l'effet de la gravité, un mince film liquide intercalé entre la poche et la paroi circule dans la direction opposée à l'écoulement diphasique. En augmentant la vitesse apparente du gaz par de petits incréments, on obtient successivement la structure de transition poche/annulaire (Fig. IV. 4. b) et la structure annulaire instable (Fig. IV. 4. c).

L'examen visuel permet de se rendre compte que la structure annulaire instable subit des mouvements périodiques descendant et ascendant avec rupture de l'interface gaz-liquide (Fig. IV. 4. c) empêchant ainsi l'écoulement annulaire de s'établir pour des vitesses du gaz plus élevées dans la conduite de test. Ce mouvement de retombée et remontée oscillatoire est défini dans la littérature comme un phénomène de ''Flooding'' (Flooding phenomena) typique aux écoulements diphasiques verticaux ascendants dans les tubes circulaires.

Ce phénomène se caractérise par une accumulation locale du liquide en bas à l'entrée du tube de test. Le liquide accumulé est pulsé par le gaz injecté à grande vitesse au niveau du bec de l'aiguille avec une amplification du phénomène d'arrachement du liquide. En conséquence, un écoulement du film liquide désordonné présentant des mouvements périodiques vers le bas (Reversel flow) et vers le haut (Flooding) est observé et constaté à partir du mouvement du col à comportement symétrique formé sur l'interface gaz-liquide dans la zone située à L/D= 420. Ce phénomène qui résulte d'une dualité entre les effets de cisaillement et de gravité sur

l'écoulement du film liquide, lui attribue deux régimes d'écoulement : un régime dominé par la gravité et un autre dominé par le cisaillement.

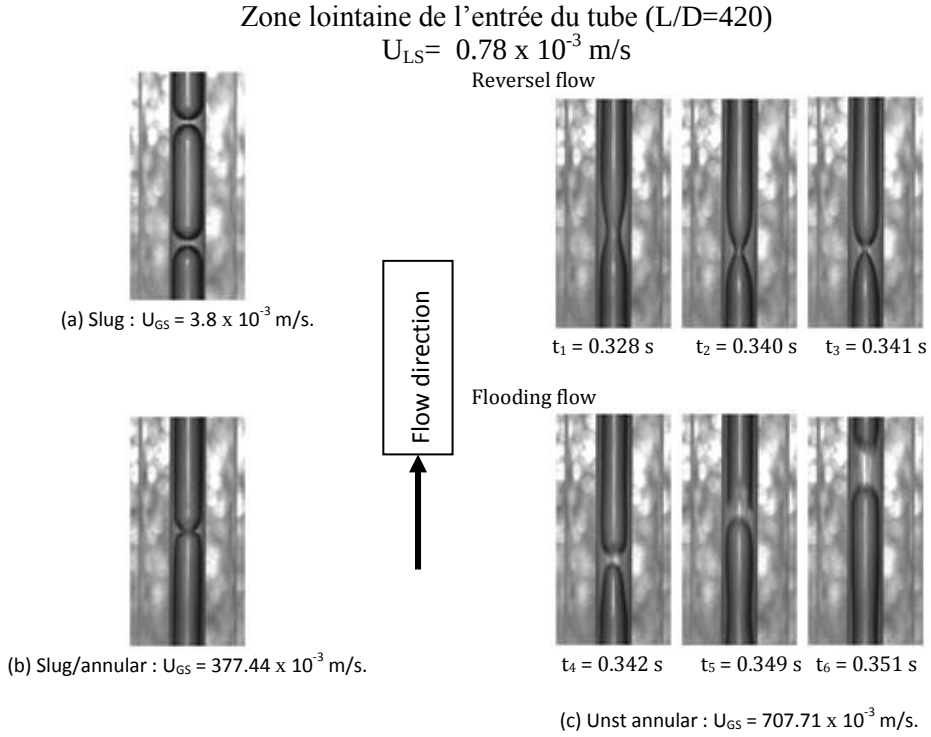


FIG. IV. 4 Structures d'écoulement observées à L/D=420 de l'entrée du tube (ID 3mm), à très faible vitesse apparente du liquide (U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s).

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)

Plusieurs structures principales se manifestent successivement avec l'augmentation de la vitesse apparente du gaz, les structures à bulles dispersées, poche-bouchon et annulaire instable (Fig. IV. 5).

En effectuant un balayage sur la gamme de vitesse apparente du gaz, nous avons obtenus des structures d'écoulements analogues à celles du cas de la vitesse de liquide modérée. 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 pour des raisons de préservation du dispositif expérimental.

A faible vitesse apparente du gaz U_{GS} = 3.8 x 10^{-3} m/s, dans la structure d'écoulement à bulle, les bulles tendent à se concentrer en trio le long de l'axe du tube de test (Fig. IV. 5.a).

Les grosses bulles forment un train de bulles en mouvement hélicoïdal à une vitesse apparente du gaz U_{GS} = 23.59 x 10^{-3} m/s (Fig. IV. 5.b), alors qu'à des vitesses apparentes de l'air plus grandes, de petites bulles se dispersent sur toute la section du tube collées derrière une poche formant ainsi une structure d'écoulement de transition bulle dispersée/poche (dispersed bubbly/Slug). La poche de gaz se forme avec coalescence des bulles. Dans les structures d'écoulements à poche, les poches sont relativement longues avec une forme sphérique et régulière à l'avant. On observe également un film liquide régulier très mince tout au long de la poche d'air. Dans les bouchons liquides, on observe de petites bulles en oscillations agitées.

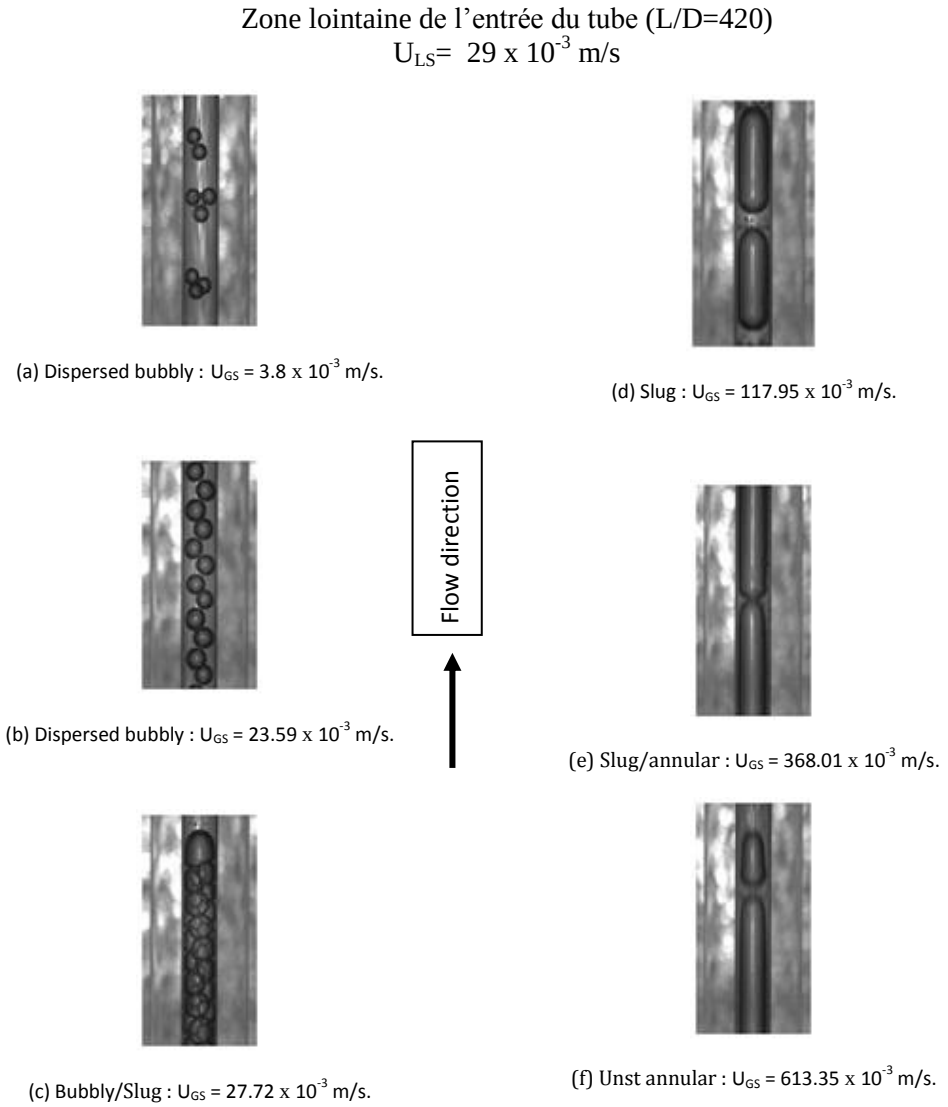


FIG. IV. 5 Structures d'écoulement observées à L/D=420 de l'entrée du tube (ID 3mm) à vitesse apparente du liquide modérée (U_{LS} = 29 x 10^{-3} m/s).

Les frontières de transition bulle/poche et poche/annulaire sont très nettes. La coalescence entre poches dans la structure d'écoulement de transition poche/annulaire est clairement distinguée.

Mécanisme d'écoulement à bulles en mouvement hélicoïdal:

La structure à bulle en écoulement hélicoïdal est une combinaison de deux écoulements, l'un de translation et l'autre de rotation (Fig. IV. 6). Le centre de gravité de la bulle qui suit un tel mouvement se déplace en ligne droite.

Lorsque le débit d'eau axial vertical ascendant imposé par la pompe devient trop important par rapport au débit d'eau circonférentielle en rotation, l'écoulement devient hélicoïdal. La ligne reliant les centres des tourbillons est alors une hélice qui, tourne en avançant dans la direction axiale ascendante à la manière d'une vis.

Certains auteurs se basent sur le nombre de Reynolds axial $Rea = 2\ U_{LS}R_2/\nu$ pour déterminer ce mode d'écoulement hélicoïdal (Takeuchi and Jankowski., 1981), tels que U_{LS}, R_1, R_2, ν représentent respectivement la vitesse débitante axiale de l'eau (ms^{-1}), le rayon intérieure du tube de test en verre (m), le rayon intérieur de l'eau en rotation (m) et la viscosité cinématique de l'eau (m^2s^{-1}). D'autres auteurs utilisent le rapport γ ($\gamma = Rea/ Re = U_{LS}/2\pi f_1 R_1$) des nombres de Reynolds axial et de rotation (Gu and Fahidy., 1985), qui dépend du rayon R_1, de la fréquence de rotation f_1, du débit d'eau circonférentielle ainsi que de la vitesse débitante axiale de l'eau U_{LS}.

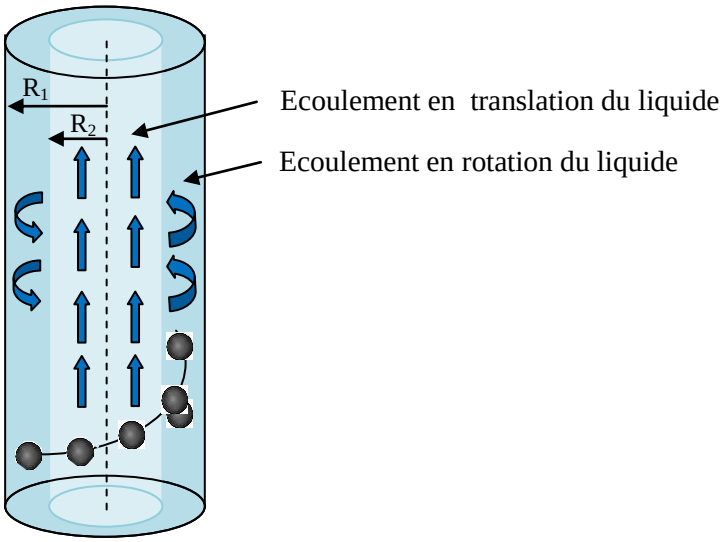


FIG. IV. 6 Schéma de l'écoulement à bulle hélicoïdal

IV. 2. 3 Comparaison des structures observées à L/D = 10 et à L/D = 420

L'ensemble des données expérimentales des structures d'écoulements enregistrées à deux positons de la conduite ont été synthétisées dans le tableau IV. 1. Ce tableau expose les structures visualisées par la camera rapide à L/D = 10 et à L/D = 420 dans le cas d'un écoulement diphasique en direction verticale ascendante pour les diverses conditions opératoires. A partir des résultats obtenus, nous pouvons faire plusieurs remarques et constatations en se basant principalement sur les vitesses apparentes des phases du liquide et du gaz et sur l'examen topologique des structures acquises.

A très faible vitesse apparente du liquide $U_{GS} = 0.78 \times 10^{-3}$ m/s et du balayage de la phase gazeuse dans la gamme 3.8×10^{-3} m/s $\leq U_{GS} \leq 362 \times 10^{-3}$ m/s, nous visualisons plusieurs structures d'écoulement au niveau de la zone de formation de mélange (L/D = 10) par la technique utilisée (Tableau IV. 1.a). En effet, on passe de la structure bulles/poche à la structure annulaire instable. La structure bulle/poche est observée aux très faibles vitesses apparentes du gaz avec formation de petites bulles occupant approximativement tout l'espace entre poches d'air. L'augmentation de la vitesse apparente du gaz fait apparaitre la structure poche-bouchon à interface gaz-liquide parfaitement lisse et avec un film liquide confiné entre la paroi intérieure et la poche de gaz en écoulement descendant vis-à-vis de la gravité. Sous l'effet de la force de gravité, ce film liquide retombe vers le bas (Reversel flow) et c'est dans cette condition que la destruction mécanique de l'écoulement diphasique est enclenchée.

Pour une vitesse du gaz donnée $U_{GS} = 169.85 \times 10^{-3}$ m/s, un écoulement annulaire instable prend place. Cette structure est conditionnée par la direction de l'écoulement du film liquide qui peut-être descendant et ascendant d'une manière oscillatoire et aussi par l'épaisseur du film liquide le long du tube, empêchant ainsi l'établissement de l'écoulement annulaire. Très peu d'études expérimentales existent sur ce phénomène qui à ce jour n'est pas bien assimilé. La structure de transition poche/annulaire n'apparait pas dans les cas de très faible vitesse apparente du liquide.

Dans la fenêtre de visualisation considérée (L/D=10), le film liquide est asymétrique suite à l'influence de plusieurs effets : la retombée et remontrée périodique du film liquide, les forces capillaires et les vibrations de l'aiguille dues à la forte pression du gaz à la sortie du bec d'injection du gaz. Lorsque le débit du gaz croit, l'examen visuel permet de se rendre compte que dans la zone de mélange, les deux phases sont fortement perturbées et l'écoulement annulaire n'y sera jamais atteint.

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 du gaz. Aux faibles

débits 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, quant à elle, de modifications importantes. Pour des vitesses de gaz élevées, la structure annulaire due au mouvement descendant et ascendant du film liquide reste instable.

A vitesse apparente de liquide modérée $U_{LS} = 29 \times 10^{-3}$ m/s, il y' a formation de bulles dispersées 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 3.8×10^{-3} m/s $\leq U_{GS} \leq 27.72 \times 10^{-3}$ m/s. Dans cette gamme de vitesse apparente du gaz, la structure d'écoulement à L/D = 420 évolue de la structure à bulle jusqu'à la structure de transition bulle dispersée/poche. 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, pour une vitesse apparente du gaz donnée et suite aux effets de détente du gaz, la taille des bulles croit par rapport à l'entrée (L/D = 10) et elles apparaissent sous forme d'un lit de bulles remontant la colonne du liquide avec une vitesse d'ascension qui croit au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse apparente du gaz. Pour des vitesses du gaz spécifiques $U_{GS} = 23.59 \times 10^{-3}$ m/s, des bulles de gaz régulières ressemblant à des boules de billard forment une chaine et ascendant la colonne du liquide en mouvement hélicoïdal. Cette structure apparait dans des conditions opératoires très particulières.

Pour la gamme de vitesse apparente du gaz 28.3×10^{-3} m/s $\leq U_{GS} \leq 58.97 \times 10^{-3}$ m/s, il y' a formation d'une structure bulle dispersée/poche dans la zone d'entrée (L/D = 10). Dans cette gamme de vitesse apparente du gaz, la structure observée à L/D = 420 évolue de la structure bulle dispersée/poche vers la structure poche-bouchon. Au fur et à mesure que la vitesse apparente du gaz augmente, les poches de gaz deviennent de plus en plus longues.

Pour des vitesses apparentes du gaz allant de 60.15×10^{-3} m/s à 365.65×10^{-3} m/s, à L/D = 10 la structure poche-bouchon prend place pour se substituer à la structure annulaire instable en transitant par une structure poche/annulaire fractionnée (breakup slug/annular) et cela pour des vitesses plus élevées. Dans cette même gamme de vitesse apparente du gaz, à 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 du gaz.

Pour des vitesses apparentes du gaz allant de 368.01×10^{-3} m/s à 778.48×10^{-3} m/s, la structure annulaire due au mouvement descendant et ascendant du film liquide reste instable. Cette situation est similaire au cas précédent à faible vitesse apparente du liquide $U_{LS} = 0.78 \times 10^{-3}$ m/s.

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 3.8 x 10^{-3} m/s à 778.48 x 10^{-3} m/s. L'augmentation de la vitesse apparente du liquide va engendrer la suppression de la structure à poche-bouchon et une structure poche/annulaire intensivement fractionnée à L/D =10 est observée. 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, les structures principales (bulles dispersées, poche-bouchon, annulaire instable avec des bulles satellites formées par atomisation) et de transitions (bulles dispersées/poche-bouchon, poche-bouchon/annulaire fractionnée) observées dans la zone de mélange sont semblables à celles obtenues loin de la zone de mélange (L/D=420), excepté pour la structure de transition poche-bouchon/annulaire fractionnée (Breakup slug/annular). Nous constatons que la simplification de cette structure d'écoulement de transition (poche-bouchon/annulaire fractionnée) est liée à l'établissement du régime d'écoulement diphasique. Cette simplification se traduit par une coalescence entre des bulles et des poches engendrant des poches loin de la zone d'entrée.

Tableau IV. 1 : Comparaison des structures d'écoulements en direction verticale ascendante entre la zone de mélange à L/D = 10 et à L/D = 420 mm.

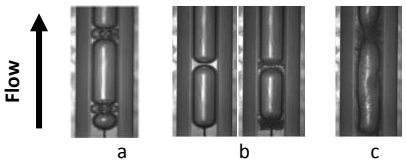
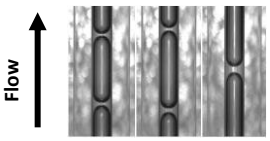
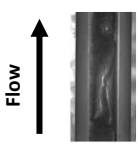
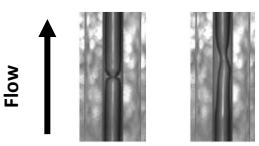
Liquid superficial velocity	Entrance without correction chamber (L/D = 10)	Far downstream at L/D=420 with correction chamber
	Pattern/Superficial gas velocity	Pattern/Superficial gas velocity
(a) Low superficial velocity U_{LS} = 0.78 x 10-3 m/s	 a/ 3.8 x 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 7.08 x 10^{-3} m/s ➔ Dispersed bubbly/Slug b/ 8.25 x 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 165.13 x 10^{-3} m/s ➔ Slug c/ 169.85 x 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 362.11 x 10^{-3} m/s ➔ Unstable annular	 3.8 x 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 362.11 x 10^{-3} m/s ➔ Slug with different sizes.
	 363.3 x 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 778.48 x 10^{-3} m/s ➔ Unstable annular	 a/ 363.3 x 10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 589.76 x 10^{-3}m/s ➔ Slug/Annular b/ 613.35 x 10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 778.48 x 10^{-3} m/s ➔ Unstable annular

Tableau IV. 1 : Comparaison des structures d'écoulements en direction verticale ascendante entre la zone de mélange à L/D = 10 et à L/D = 420 mm (suite).

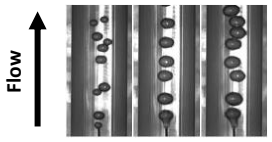
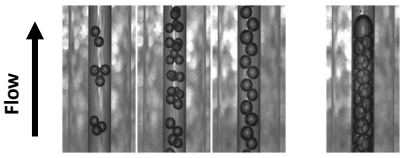
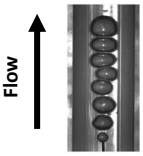
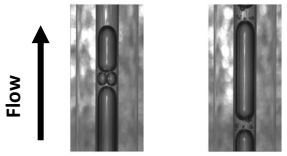
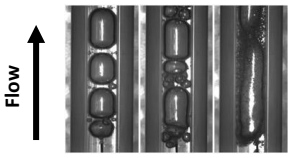
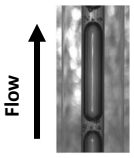
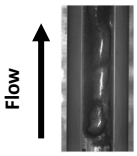
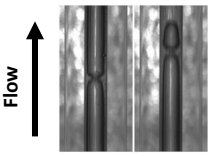
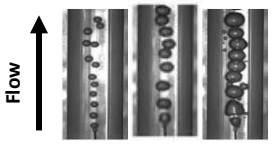
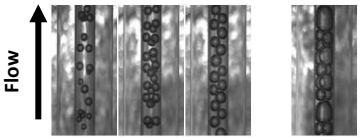
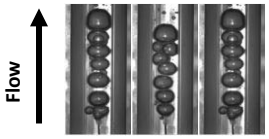
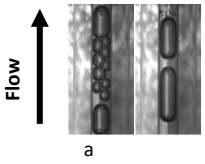
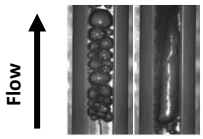
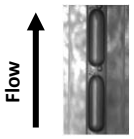
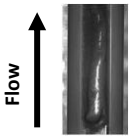
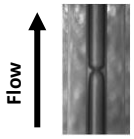
Liquid superficial velocity	Entrance without correction chamber (L/D = 10)	Far downstream at L/D=420 with correction chamber
	Pattern/Superficial gas velocity	Pattern/Superficial gas velocity
(b) Moderate superficial velocity U_{LS} = 29 x 10-3 m/s	 3.8×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 27.72×10^{-3} m/s ➔ Dispersed bubbly with different sizes.	 a/ 3.8×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 23.59×10^{-3} m/s ➔ Dispersed bubbly b/ 23.59×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 27.72×10^{-3} m/s ➔ Dispersed bubbly/Slug
	 28.3×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 58.97×10^{-3} ms^{-1} ➔ Dispersed bubbly/Slug	 a/ 28.3×10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 51.89×10^{-3} m/s ➔ Dispersed bubbly/Slug b/ 54.25×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 58.97×10^{-3} m/s ➔ Slug
	 60.15×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 94.36×10^{-3} m/s ➔ Slug 106.15×10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 193.44×10^{-3}m/s ➔ Breakup slug/annular 198.16×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 365.65×10^{-3} m/s ➔ Unstable annular	 58.97×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 365.65×10^{-3} m/s ➔ Slug
	 368.01×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 778.48×10^{-3} m/s ➔ Unstable annular	 368.01×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 566.17×10^{-3} m/s ➔ Slug/annular 589.71×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 778.48×10^{-3} m/s ➔ Unstable annular

Tableau IV. 1 : Comparaison des structures d'écoulements en direction verticale ascendante entre la zone de mélange à L/D = 10 et à L/D = 420 mm (suite).

Liquid superficial velocity	Entrance without correction chamber (L/D = 10)	For downstream at L/D=420 with correction chamber
	Pattern/Superficial gas velocity	Pattern/Superficial gas velocity
(c) High superficial velocity U_{LS} = 59 x 10-3 m/s	 3.8×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 57.79×10^{-3} m/s ➔ Bubbly with different sizes.	 a/ 3.8×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 33.03×10^{-3} m/s ➔ Dispersed bubbly b/ 34.2×10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 57.79×10^{-3}m/s ➔ Bubbly/Slug.
	 58.97×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 70.77×10^{-3} m/s ➔ Bubbly/Slug	 a/ 57.79×10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 64.87×10^{-3}m/s ➔ Bubbly/Slug b/ 66.05×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 70.77×10^{-3} m/s ➔ Slug.
	 a/ 73.13×10^{-3} m/s ≤ U_{GS} ≤ 200.51×10^{-3} m/s ➔ Breakup slug/annular b/ 207.59×10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 353.85×10^{-3}m/s ➔ Unstable annular	 73.13×10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 353.85×10^{-3}m/s ➔ Slug with different sizes
	 353.85×10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 778.48×10^{-3}m/s ➔ Unstable annular	 375.08×10^{-3}m/s ≤ U_{GS} ≤ 778.48×10^{-3}m/s ➔ Slug/annular

IV. 3 Cartes d'écoulements

A partir de l'ensemble des résultats obtenus, des cartes d'écoulements diphasiques sont construites dans les deux zones d'intérêts L/D=10 et L/D=420 indiquant les différentes structures observées selon les vitesses apparentes des fluides. Les cartes d'écoulement permettent de situer les différents types de structures d'écoulements mais ne permettent pas de distinguer les évolutions de chaque type de structure le long de la conduite. 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 observées à l'entrée du tube sont répertoriées sur la carte de la figure IV. 7. Les courbes délimitent les structures principales observées dans la zone de mélange à L/D = 10 : Bulles dispersées (Dispersed bubbly flow, bubble helical flow), Poches-bouchon (Slug flow), Annulaire instable (Unstable annular flow). Pour cette dernière structure, elle peut être instable et l'établissement n'est jamais atteint dans cette zone 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 dispersées par exemple, la taille et la répartition des bulles varient suivant les vitesses des phases liquide et gazeuse.

Aux très faibles vitesses apparentes du liquide et du gaz, la structure bulles dispersées/poche apparait, les bulles formées entre les poches sont de petite taille collées les unes aux autres et occupent approximativement toute la section droite du tube. Ce mélange bulles dispersées/poches remonte lentement le long de la conduite. En augmentant la vitesse apparente de la phase liquide, c'est la structure à bulles dispersées qui se manifeste. Les bulles formées sont plus nombreuses, dispersées et de petite taille. Les tailles sont plus uniformes en augmentant la vitesse apparente 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 poche-bouchon (Slug flow pattern). Cette structure est une succession de poches de gaz et de mince bouchon liquide régulière. La structure poche-bouchon se développe jusqu'à une vitesse critique donnée, à partir de laquelle il y' a formation d'une structure annulaire instable qui occupe la majorité de la carte d'écoulement dans les gammes de vitesses étudiées. Cette structure annulaire instable, due au mouvement du film liquide descendant et ascendant, empêche l'écoulement annulaire de s'établir suivant les vitesses apparentes des deux phases (voir § précédent).

A partir d'une vitesse apparente du liquide critique (U_{LS} = 40 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} = 59.8 x 10^{-3} m /s) (Figure IV. 7). 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 alors que cette dernière augmente avec l'augmentation de 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 fractionnée (breakup 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 grâce à la technique de visualisation développée (voir par exemple la Fig IV. 3. c).

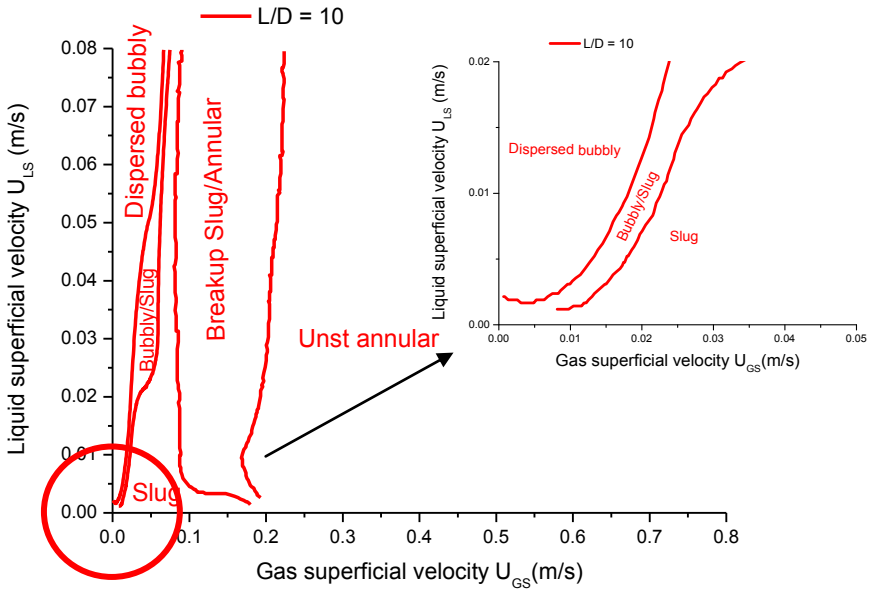


FIG. IV. 7 Carte de structures d'écoulements diphasiques air/eau dans un tube vertical de 3mm de diamètre intérieur et avec une aiguille d'injection d'air de 110 µm de diamètre intérieur, établie dans la zone de mélange diphasique.

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. 8 illustre la carte d'écoulement diphasique ascendant dans la zone située à L/D = 420 de l'entrée de la conduite. Pour les très faibles vitesses apparentes du liquide U_{LS} = 0.78 x 10^{-3} m/s, les différentes structures observées à l'entrée de la conduite persistent loin de la zone d'entrée de la conduite à L/D=420. 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} = 613.35 x 10^{-3} m/s, c'est la structure annulaire instable qui prend place. Pour la structure poche-bouchon, 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 liquide ne subit aucune modification.

Pour une vitesse apparente critique de la phase liquide, nous observons l'ensemble des structures d'écoulements principales à l'entrée (L/D=10) et loin de l'entrée (L/D=420) de la conduite ainsi que les zones de transitions associées.

Pour la structure à bulles, nous observons un lit à bulles qui remontent le long de la conduite. La structure à bulles dispersées observées à l'entrée de la conduite ne disparaît pas dans cette zone et ce suite aux effets de la poussée d'Archimède. 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. Pour des conditions particulières, une structure d'écoulement hélicoïdale apparait.

Pour une vitesse apparente du liquide $U_{LS} \leq 40 \times 10^{-3}$ m/s, les lignes de transition bulles dispersées/bulles dispersées-poche à l'entrée (L/D=10) et loin de l'entrée (L/D=420) sont approximativement confondues pour les mêmes vitesses apparentes du gaz et du liquide. Au-delà de cette vitesse apparente du liquide ($U_{LS} > 40 \times 10^{-3}$ m/s), la ligne de transition bulles dispersées/bulles dispersées-poche à L/D=420 est décalée vers les faibles vitesses apparentes du gaz par rapport à celle de la zone d'entrée. Ce comportement s'explique par le fait qu'à la vitesse apparente du liquide $U_{LS} \leq 40 \times 10^{-3}$ m/s, aucune évolution morphologique de la structure entre les deux zones visualisées n'est enregistrée. Au-delà de cette vitesse apparente du liquide, le phénomène de coalescence entre bulles commence à se manifester engendrant des bulles plus grandes ou des poches. L'augmentation de la vitesse de la phase gazeuse produisant de bulles de tailles de plus en plus importantes qui au fur et à mesure qu'elles remontent le tube de test coalescent donnant ainsi lieu à une structure à poche-bouchon.

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 $U_{GS} = 58.04 \times 10^{-3}$ m/s à $U_{GS} = 364.1 \times 10^{-3}$ m/s et pour L/D=10, elle s'étale de $U_{GS} = 59.8 \times 10^{-3}$ m/s à $U_{GS} = 81.14 \times 10^{-3}$ 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 déjà expliqué dans le paragraphe

précédent, les effets de retombée et de remontée périodique du film liquide à des vitesses apparentes du gaz très élevées empêche la structure annulaire de s'établir à l'entrée.

Ces effets déstabilisent la structure annulaire pour donner lieu à une structure à poche bouchon (Slug flow) qui perdure sur une gamme de vitesse du gaz importante. Au-delà, la structure instable apparait sur toute la longueur du tube.

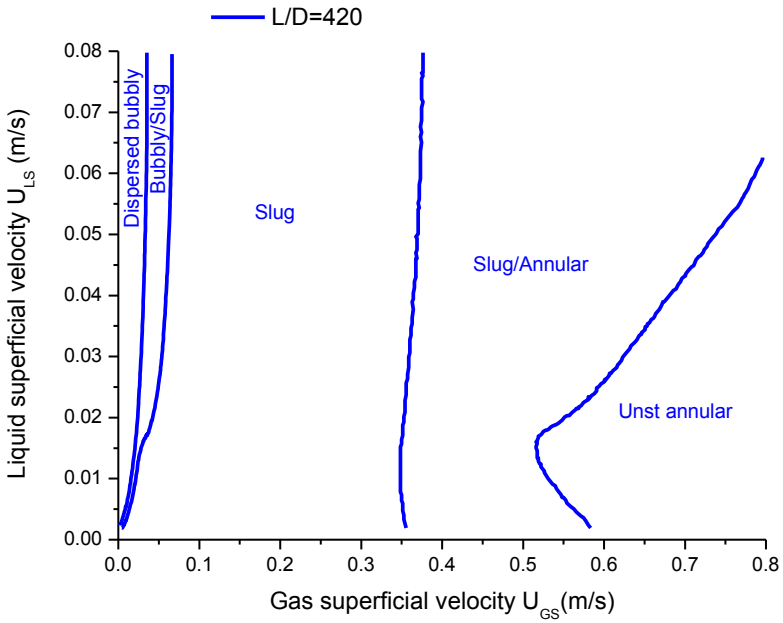


FIG. IV. 8 Carte de structures d'écoulements diphasiques air/eau dans un tube vertical de 3mm de diamètre intérieur et avec une aiguille d'injection d'air de 110 µm de diamètre intérieur, établie à L/D = 420.

Pour conclure, les cartes d'écoulement observées à l'entrée L/D=10 et en aval à L/D=420, diffèrent notablement (Fig. IV. 9). 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 ».

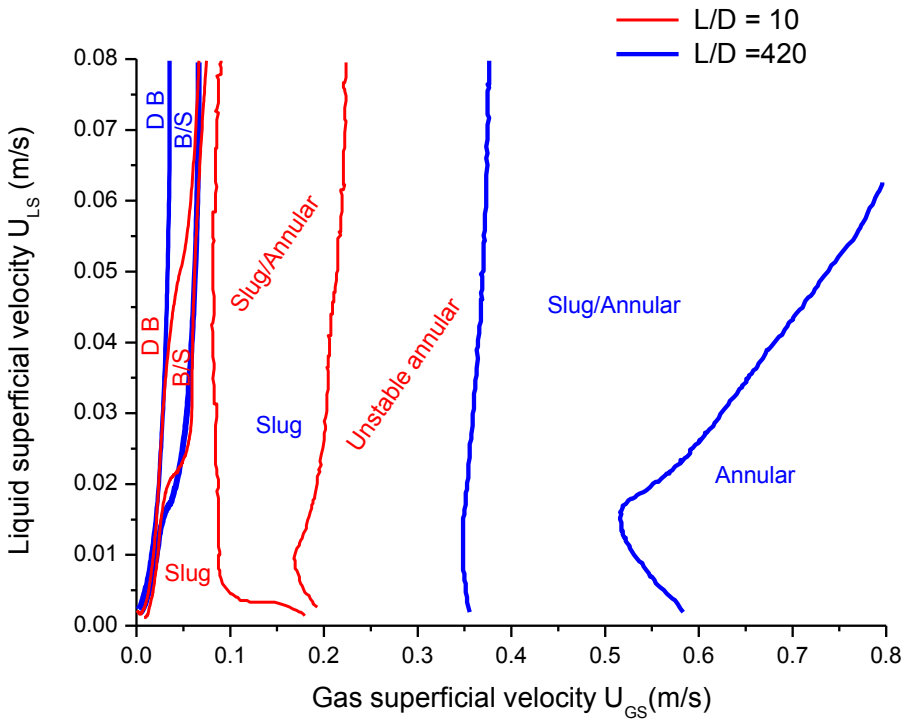


Fig. IV. 9 Comparaison entre les cartes établies au niveau de la zone de mélange et à 1280mm de l'entrée du tube de test vertical de 3mm de diamètre et une aiguille d'injection du gaz à 110 µm diamètre intérieur.

Conclusion

Les structures d'écoulements diphasiques visualisées en écoulement vertical ascendant dans les deux zones L/D = 10 et L/D = 420 de la conduite sont morphologiquement semblables excepté pour la structure de transition poche/annulaire fractionnée (Breakup slug/annular) qui se simplifie à L/D = 420.

Aux très faibles vitesses de la phase liquide, nous avons mis en évidence à L/D=420 de l'entrée de la conduite le phénomène de retombée et de remontée du film liquide dans la structure d'écoulement annulaire instable typiques aux écoulements diphasiques verticaux dans les conduites. A l'heure actuelle, ce phénomène n'est pas bien assimilé et nécessite davantage de recherche.

Pour conclure, les cartes d'écoulement observées à l'entrée L/D=10 et en aval à L/D=420, diffèrent notablement. Ces différences de comportement sont attribuées aux contraintes (inertie, cisaillement interfacial) qui diffèrent selon la position dans la conduite.

CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES

Conclusion générale & perspectives

La microfluidique diphasique est de nos jours une thématique de recherche rencontrée dans plusieurs technologies de pointe : biotechnologie, microélectronique, médecine, MEMS, NEMS, etc…. La compréhension de la physique de ces écoulements et des structures d'écoulement qui en résultent n'est pas aussi évidente. La revue bibliographique menée montre qu'il n'y a pas toujours de consensus sur certains points tels que les limites de transitions ou la terminologie utilisée pour décrire les structures d'écoulements. Ceci nous paraît dû à la maîtrise des conditions opératoires qui sont loin d'être parfaites.

Nous avons présenté les résultats obtenus par zeguai et al., 2013 et zeguai et al., 2021 dans un tube de diamètre intérieur de 3 mm avec une orientation horizontale et verticale ascendante de l'écoulement. Deux zones du tube de test ont été explorées, 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.

Notre travail se manifeste dans les points suivants :

- Les structures d'écoulement visualisées sont analogues à celles déjà rapportées dans la littérature. Néanmoins, à la différence des études précédentes, les strcutures ont été observées par zeguai et al., 2013 et zeguai et al., 2021 dans des gammes de vitesses très différentes de celles usuellement étudiées. Ces gammes de vitesses donnent lieu à des écoulements diphasiques ‘’laminaires ‘’ où les interfaces sont lisses. Ces structures correspondent à de faibles vitesses des phases contrairement à la majorité des structures d'écoulement observées pour de grandes vitesses où les interfaces sont ‘’turbulentes ‘’.
- Les cartes d'écoulement sont établies en échelle linéaire dans le présent travail à l'entrée et loin en aval de la conduite pour les deux orientations (horizontale & verticale ascendante) diffèrent notablement par suite des modifications des contraintes (inertie, cisaillement interfacial) et ce suivant la position dans la conduite de test.
- En écoulement horizontal, nous avons constaté en aval de l'entrée à L/D = 420, 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. 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 poche-bouchon. A l'entrée de la conduite, les écoulements gaz et liquide en co-courant sont fortement perturbés tandis

qu'en aval de cette zone, l'écoulement diphasique s'établit pour engendrer un écoulement diphasique ''laminaire ''.

- Cependant, en orientation verticale ascendante de l'écoulement, les structures diphasiques visualisées dans les deux zones L/D = 10 et L/D = 420 de la conduite de test sont morphologiquement semblables, excepté pour la structure de transition poche/annulaire fractionnée (Breakup slug/annular) qui se simplifie en aval loin de la zone d'entrée. Aux très faibles vitesses de la phase liquide à L/D = 420 de l'entrée de la conduite, nous avons mis en évidence les phénomènes de retombée et de remontée du film liquide dans la structure annulaire instable typiques aux écoulements verticaux dans les conduites. Ces phénomènes, pas bien assimilés à l'heure actuelle, nécessitent davantage de travail de recherche.

Les perspectives à ces travaux consistent à étudier les écoulements diphasiques par simulations numériques afin d'obtenir des informations locales et d'évaluer les contraintes s'exerçant sur les phases gaz et liquide et les épaisseurs du film liquide.

REFERENCES

References

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.

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

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.

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

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

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

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, 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.

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.

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. 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.

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

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.

Fukano and Kariyasaki., 1993. Characteristics of gas-liquide two-phase flow in a capillary tube

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.

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.

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.

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. Int. J. of Therm. Sci. 46, 519–530.

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.

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.

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.

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.

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

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.

M. Ishii, K. Mishima.Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations

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.

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.

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.

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.

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, 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.

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

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, Dukler. A, 1976. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas–liquid flow, AIChE Journal 22 (1976) 47–55.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.