Etude expérimentale de l'amélioration de la distribution diphasique dans un échangeur thermique à l'aide d'ultrasons

Florian Tingaud

▶ **To cite this version:**

Florian Tingaud. Etude expérimentale de l'amélioration de la distribution diphasique dans un échangeur thermique à l'aide d'ultrasons. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENI096 . tel-01195709

HAL Id: tel-01195709
https://theses.hal.science/tel-01195709

Submitted on 8 Sep 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité Mécanique des fluides, Procédés, Énergétique.

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Florian Tingaud

Thèse dirigée par **André Bontemps** et
codirigée par **Sébastien Ferrouillat.**

préparée au sein du **Laboratoire des Échangeurs Thermiques (LETh)**
dans **l'École Doctorale IMEP2 de Grenoble.**

Etude expérimentale de l'amélioration de la distribution diphasique dans un échangeur thermique à l'aide d'ultrasons.

Thèse soutenue publiquement le **18 Décembre 2012**,
devant le jury composé de :

Mr Christophe MARVILLET
Professeur des Universités, Univsersité Paris 6, Président du jury.
Mme Viviane RENAUDIN
Professeure des Université, IUT Nancy-Brabois, Rapporteur.
Mme Laurence FOURNAISON
Directrice de recherche, Université Paris 6, Rapporteur.
Mr José Miguel CORBEŔAN SALVADOR
Professeur, Universitat Polytèchnica de València, Membre
Mr Nicolas GONDREXON
Professeur des Université, UJF Grenoble, Membre.
Mr André BONTEMPS
Professeur Emérite, UJF Grenoble, Directeur de Thèse
Mr Sébastien FERROUILLAT
Maître de Conférences, UJF Grenoble, Co-Directeur de Thèse
Mr Stéphane COLASSON
Ingénieur de recherche, CEA Grenoble, Encadrant CEA.
Mr Primus BOLDO
Invité.

Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu Patrice Tochon pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et m'avoir donné la possibilité de faire ma thèse.

Je remercie également André Bontemps pour avoir été mon directeur de thèse. Son expérience et sa connaissance des domaines abordés ont été utiles au cours de ma thèse.

Je tiens également à remercier de tout mon cœur les deux personnes qui ont été mes encadrants et qui m'ont supporté chaque jour de ma thèse : Stéphane Colasson et Sébastien Ferrouillat. Ils m'ont permis de vivre pleinement cette expérience, aussi bien sur l'aspect technique que sur l'aspect humain. Ils m'ont fait confiance et pour cela, je leur suis reconnaissant. Je les remercie de m'avoir porté autant d'attention, d'avoir aussi bien suivi ma thèse, de m'avoir donné de si nombreux conseils et également merci d'avoir déliré avec moi.

La thèse ne se limite pas seulement aux encadrants mais également à ceux qui ont travaillé plus sur un plan expérimental et technique. Les personnes qui m'ont aidé à construire et réaliser les différentes étapes.

Je voudrais donc remercier Jérôme Bentivoglio et Amélie Maisse pour leur aide précieuse mais également leur personnalité. Jérôme le plus grand supporter du PSG à jamais et Amélie la femme la plus chanceuse de la Terre, merci.

J'ai également eu le plaisir d'encadrer deux stagiaires pendant ma thèse, et je souhaite remercier Sylvain qui a été là au début de la construction et également Odin Bulliard qui lui a participé à la réaliser des essais mais également de multiples réflexions sur une multitude de sujets. Bonne chance à lui pour sa thèse !

Merci également à toutes les personnes du laboratoire qui m'ont aidé à un moment ou un autre de ma thèse d'une façon ou d'une autre, en particulier : Olivier, Alexandre, Mathieu, Marion, Armel, Djomice, Soualo, Maxime, Violaine et C-V.

Enfin, je voudrais juste remercier les personnes qui m'ont considéré comme un moins que rien. Leur souhait de me voir plus bas que terre m'a toujours et me motivera toujours à viser plus haut. Tous mes sentiments vont donc en particulier vers Mr Lévi mon proviseur de Collège et Camille Le cœur !

Sommaire

Nomenclature *17*

Introduction *19*

Chapitre I : Distribution des deux phases pour des écoulements diphasiques. *21*

1. Configuration d'écoulements *21*

1.1 Grandeurs caractéristiques des écoulements diphasiques **21**

1.2 Régimes d'écoulement **22**

1.3 Cartes d'écoulement **25**

2. Distribution *28*

2.1 Distributions typiques et bancs d'essais **30**

2.1.1. Géométrie de l'échangeur 30

2.1.2. Système eau-air 32

2.1.3. Réfrigérants avec changement de phase. 33

3. Paramètres géométriques *37*

3.1 Le tube d'entrée précédant le distributeur **37**

3.1.1. Orientation et emplacement 37

3.1.2. Longueur 40

3.1.3. Diamètre du tube d'entrée et du distributeur 40

3.2 Distributeur **41**

3.2.1. Longueur du distributeur ou nombre de canaux. 41

3.2.2. Espacement entre canaux 43

3.2.3. Profondeur d'intrusion des canaux 44

4. Effets de l'orientation et des caractéristiques de l'écoulement *46*

4.1 Distributeur vertical **46**

4.1.1. Distributeur avec écoulement ascendant 46

4.1.1.1. Titre massique 47

4.1.1.2. Densité de flux massique 48

4.1.1.3. Profondeur d'insertion 50

4.1.2. Distributeur avec écoulement descendant 50

4.1.2.1. Titre massique 51

4.1.2.2. Densité de flux massique 52

4.2 Distributeur horizontal **54**

4.2.1. Canaux avec écoulement ascendant 55

4.2.1.1. Titre massique 55

4.2.1.2. Densité de flux massique 56

4.2.1.3. Profondeur d'insertion. 58

4.2.2. Canaux avec écoulement descendant 59

4.2.2.1. Titre massique 60

4.2.2.2. Densité de flux massique surfacique 61

4.2.2.3. Profondeur d'insertion 63

4.3 Canaux inclinés **65**

4.4 Conclusion **66**

5. Amélioration de la distribution diphasique *66*

5.1 Dispositif dans le tube d'entrée **66**

5.1.1. Dispositifs de mélange 66

5.1.2. Dispositifs de dispersion 67

5.1.3. Déversoirs 69

5.2 Dispositifs dans le distributeur **69**

5.3 Modification du distributeur **71**

6. Conclusion *73*

Chapitre II : Les ultrasons *75*

1. Généralités sur les ultrasons *75*

1.1 Définitions **75**

1.2 Propagation sonore **76**

1.2.1. Caractéristiques de l'onde sonore et pression acoustique 76

1.2.2. Densité volumique d'énergie. Pression de radiation. 79

1.2.3. Intensité acoustique 79

1.2.4. Impédance acoustique 80

1.2.5. Passage d'un milieu à un autre. 80

1.2.6. Facteurs de réflexion et de transmission en amplitude des déplacements. 81

1.2.7. Facteurs de réflexion et de transmission des pressions acoustiques 81

1.2.8. Facteurs de réflexion et de transmission en énergie 82

1.2.9. Coefficient d'absorption 82

1.2.10. Hauteur de la fontaine 83

1.3 Domaines d'utilisation **83**

2. L'atomisation *85*

2.1 Les différentes technologies **85**

2.2 Les nébuliseurs à ultrasons **87**

3. Etudes expérimentales sur les ultrasons *92*

3.1 Hypothèses sur le phénomène d'atomisation. **92**

3.2 Propagation des ultrasons. **95**

3.3 Influence des caractéristiques de l'élément piézo-électrique **98**

3.4 Introduction des ultrasons dans un échangeur. **99**

4. Conclusion *100*

Chapitre III : Dispositif expérimental et mesures *101*

1. Principe de l'expérience *101*

2. Description de la boucle NIDUS *102*

2.1 Circuit de la phase liquide (100) **102**

2.2 Circuit de la phase gazeuse (200) **102**

2.3 Circuit du mélange diphasique (300) 104

3. Section d'essais 104

3.1 Distributeur 105

3.2 Séparateurs 109

3.3 Dispositif générateur de pertes de pression singulières 110

3.4 Générateurs ultrasonores 111

4. Instrumentations et mesures 112

4.1 Système d'acquisition 112

4.2 Mesures de température 113

4.3 Mesures de pression 113

4.4 Mesures de débit 114

5. Exploitation des mesures 116

5.1 Calcul des débits d'air 116

5.2 Correction sur les débits d'eau sortant 118

5.3 Calcul de la distribution diphasique et son incertitude 118

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et analyse. 121

1. Introduction. 121

2. Distribution. 123

2.1 Résultats pour la configuration 0. 124

2.1.1. Sans ultrasons. 124

2.1.1.1. Influence du débit d'air. 124

2.1.1.2. Influence du débit d'eau. 128

2.1.1.3. Particularité de la distribution initiale. 130

2.1.1.4. Approche statistique de la distribution. 132

2.1.2. Avec ultrasons. 141

2.1.2.1. Influence des ultrasons sur la phase liquide. 141

2.1.2.2. Influence des ultrasons sur la phase gazeuse. 145

2.1.2.3. Visualisations des écoulements. 148

2.1.2.4. Approche statistique de la distribution avec les ultrasons. 151

2.1.3. Conclusion partielle. 161

2.2 Résultats pour les configurations 1 et 2. 161

2.2.1. Sans ultrasons. 162

2.2.1.1. Influence du débit d'eau. 162

2.2.1.2. Influence du débit d'air. 166

2.2.1.3. Approche statistique de la distribution. 168

2.2.2. Avec ultrasons. 176

2.2.2.1. Conditions d'essais. 176

2.2.2.2. Influence du débit d'eau. 177

2.2.2.3. Influence du débit d'air. 185

2.2.2.4. Approche statistique de la distribution. 187

2.2.3. Conclusion partielle sur la distribution forcée. 198

2.3 Étude paramétrique des générateurs d'ultrasons. 199

2.3.1. Influence des cinq premiers générateurs d'ultrasons. 199

2.3.2. Influence des cinq derniers générateurs d'ultrasons. 203

2.3.3. Influence des générateurs d'ultrasons pairs et impairs. 204
2.3.4. Conclusion partielle. 205

2.4 Influence du nombre de canaux dans le distributeur 206
2.4.1. Analyse des profils de distribution. 207
2.4.2. Approche statistique de la distribution. 211
2.4.3. Conclusion partielle. 220

2.5 Modification de l'espacement des canaux. 220
2.5.1. Analyse des profils de distribution. 221
2.5.2. Approche statistique de la distribution. 224
2.5.3. Conclusion partielle. 226

2.6 Conclusion. 226

3. Pertes de pression. 228

3.1 Définitions 228

3.2 Influence des ultrasons sur les pertes de pression. 229

3.3 Comparaison des résultats expérimentaux à différents modèles. 233
3.3.1. Présentation des modèles. 233
3.3.1.1. Modèle Homogène. 233
3.3.1.2. Modèle de Lockhart-Martinelli. 233
3.3.1.3. Modèle de Chisholm. 235
3.3.1.4. Modèle d'Ide et Fukano. 236
3.3.2. Résultats obtenus. 237

4. Etude de la fontaine générée dans le distributeur. 242

4.1 Comportement de la fontaine avec un écoulement diphasique. 242

4.2 Paramètres influant sur la qualité de la fontaine. 244

Conclusion générale et perspectives 248

Références 252

Annexe 1 258

Liste des Figures

❖ *Chapitre I*

Figure I- 1 : Configurations d'écoulement ascendant en ébullition dans un tube lisse vertical, Collier [1981]. *23*
Figure I- 2 : Configurations d'écoulement en vaporisation dans un tube lisse horizontal, Collier [1981]. *24*
Figure I- 3 : Carte d'écoulements pour une configuration horizontale, Mandhane et al. [1974] *26*
Figure I- 4 : Carte des différents régimes lors d'un écoulement horizontal et légèrement incliné, Taitel et Dukler [1976] *27*
Figure I- 5 : Carte des différents régimes lors d'un écoulement vertical ascendant, Taitel et Dukler [1980] *27*
Figure I- 6 : Carte des différents régimes pour les mini canaux verticaux ascendants, Colin [2004] *28*
Figure I- 7 : Distributeur connecté à plusieurs canaux plats. *30*
Figure I- 8 : Configurations d'échangeurs pour les échangeurs à multiples canaux. *31*
Figure I- 9 : Section d'essais pour des études sur la distribution en mélange eau-air, Lee [2009]. *32*
Figure I- 10 : Section d'essais (Kim et al.). *33*
Figure I- 11 : Schéma de la boucle d'essais pour l'étude de la distribution d'un réfrigérant avec changement de phase. *33*
Figure I- 12 : Schéma de la section d'essais pour des mesures simultanées, Poggi et al. [2007]. *34*
Figure I- 13 : Schéma de la section d'essais pour des mesures simultanées, Cho et Cho [2004, 2006] *35*
Figure I- 14 : Schéma de la section d'essais mesurant les canaux successivement, Kim et Lee [2006]. *35*
Figure I- 15 : Entrées du distributeur : perpendiculaire aux canaux (a), inclinée (b) et parallèle aux canaux (c). *38*
Figure I- 16 : Configurations pour l'entré et sortie des canaux, Li et al. [2010]. *38*
Figure I- 17 : Trois configurations d'entrée et de sortie, parallèle, normale et verticale, Kim et al. [2010]. *40*
Figure I- 18 : Schéma des écoulements en fonction du diamètre du distributeur, Ahmad et al. [2009]. *41*
Figure I- 19 : Schéma du dispositif utilisé pour changer le nombre de canaux, Bernoux et al. [2001]. *42*
Figure I- 20 : Schéma des deux sections, avant et après le premier canal, Lee [2009] *43*
Figure I- 21 : Effet de la profondeur d'intrusion sur la distribution, Lee et Lee [2004] *44*
Figure I- 22 : Configuration d'écoulement de chaque zone, Lee [2009]. *47*
Figure I- 23 : Influence du titre massique à l'entrée sur la distribution liquide pour un distributeur vertical avec écoulement ascendant. *47*
Figure I- 24 : Influence du titre massique sur la distribution gazeuse pour un distributeur vertical avec écoulement ascendant. *48*
Figure I- 25 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution liquide pour un distributeur vertical avec écoulement ascendant. *49*
Figure I- 26 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution gazeuse pour un distributeur vertical avec écoulement ascendant. *49*
Figure I- 27 : Influence de la profondeur d'insertion sur la phase liquide pour un distributeur vertical avec écoulement ascendant. *50*
Figure I- 28 : Influence du titre massique sur la distribution liquide pour un distributeur vertical avec écoulement descendant. *51*
Figure I- 29 : Schéma de l'effet du titre massique sur l'écoulement dans le distributeur, Poggi [2008]. *51*
Figure I- 30 : Influence du titre massique sur la distribution gazeuse pour un distributeur vertical avec écoulement descendant. *52*
Figure I- 31 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution liquide pour un distributeur vertical avec écoulement descendant. *53*
Figure I- 32 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution gazeuse pour un distributeur vertical avec écoulement descendant. *53*
Figure I- 33 : Schéma de la section d'essais de Teclemariam et al. [2003] *54*
Figure I- 34 : Illustration de la distribution dans un distributeur horizontal avec des canaux verticaux et écoulement ascendant, Webb et Chung [2004]. *55*
Figure I- 35 : Influence du titre massique sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant. *55*
Figure I- 36 : Influence du titre massique sur la distribution gazeuse pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant. *56*
Figure I- 37 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant. *57*
Figure I- 38 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution gazeuse pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant. *57*

Figure I- 39 : Influence de la profondeur d'insertion sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant. 58
Figure I- 40 : Influence de la profondeur d'insertion sur la distribution gazeuse pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant. 59
Figure I- 41 : Schéma de l'effet de l'intrusion des canaux dans le distributeur pour un écoulement ascendant, Kim et Sin [2006]..... 59
Figure I- 42 : Schéma de l'écoulement dans un distributeur horizontal avec des canaux verticaux en écoulement descendant, Weeb et Chung [2004]..... 60
Figure I- 43 : Influence du titre massique sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement descendant..... 60
Figure I- 44 : Influence du titre massique sur la distribution gazeuse pour des canaux verticaux avec écoulement descendant..... 61
Figure I- 45 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement descendant..... 62
Figure I- 46 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution diphasique pour des canaux verticaux avec écoulement descendant..... 63
Figure I- 47 : Schéma de l'effet de la variation de la densité de flux massique pour un distributeur horizontal, Ahmad et al. [2009]..... 63
Figure I- 48 : Influence de la profondeur d'insertion sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement descendant..... 64
Figure I- 49 : Influence de la profondeur d'insertion sur la distribution gazeuse pour des canaux verticaux avec écoulement descendant..... 65
Figure I- 50 : Schéma de l'effet de l'insertion des canaux dans le distributeur sur la configuration de l'écoulement, Kim et Sin [2006]..... 65
Figure I- 51 : Exemple de mélangeurs statiques..... 67
Figure I- 52 : Atomiseur à tourbillons, Fei et Hrnjak [2004]..... 67
Figure I- 53 : Dispositif à l'entrée du distributeur : trou de dispersion (a) et grille (b), Ahmad et al. [2009]..... 68
Figure I- 54 : Régime d'écoulements après les deux dispositifs de dispersion. (a) Trou de dispersion et (b) grille, Ahmad et al. [2009]. 68
Figure I- 55 : Distributeur avec diaphragmes, Bernoux [2000]..... 69
Figure I- 56 : Schéma de la flute par Marchitto et al. [2009]. 70
Figure I- 57 : Dispositifs dans le distributeur pour l'amélioration de la distribution..... 70
Figure I- 58 : Distributeur avec plusieurs branches..... 71
Figure I- 59 : Distributeur venturi (a) connecté avec un tube lisse (b) ou un tube avec des micro-ailettes en spirales (c), Wen et al. [2008]..... 71
Figure I- 60 : Distributeur dans un laminoir, Wen et al. [2008]. 71
Figure I- 61 : Invention de Hughes et al. [1992]..... 72
Figure I- 62 : Invention de Schneider et al. [1999]. 72
Figure I- 63 : Invention de Burk et al. [1994]..... 73
Figure I- 64 : Distributeur basé sur la séparation des phases, Hrnjak [2004]..... 73

❖ *Chapitre II*

Figure II- 1 : Différents exemples de longueurs d'ondes, Leighton [2007]. _____ 76
Figure II- 2 : Schéma de la propagation sonore. _____ 77
Figure II- 3 : Schéma de l'interface de deux milieux différents. _____ 81
Figure II- 4 : Utilisation des ultrasons suivant la puissance et la fréquence._____ 83
Figure II- 5 : Exemple d'un nébuliseur avec ondes de surface, Qi et al. [2008]. _____ 85
Figure II- 6 : Photo d'un nébuliseur avec bec. _____ 86
Figure II- 7 : Exemples des nébuliseurs avec disque piézo-électrique._____ 87
Figure II- 8 : Schéma d'une fontaine ultrasonore, Kurosawa et al. [1995]._____ 87
Figure II- 9 : Effet de l'épaisseur du disque piézo-électrique sur la nébulisation. _____ 89
Figure II- 10 : Schéma d'un circuit d'alimentation d'un disque piézo-électrique._____ 89
Figure II- 11 : Effet de la hauteur d'eau sur la nébulisation. _____ 90
Figure II- 12 : Evolution du débit de liquide atomisé par rapport au niveau de l'eau._____ 91
Figure II- 13 : Evolution du débit de liquide atomisé par rapport à la température de l'eau. _____ 91
Figure II- 14 : Schéma du dispositif expérimental pour les faibles fréquences, Lang [1962]. _____ 92
Figure II- 15 : Schéma du dispositif expérimental pour les fréquences intermédiaires, Lang [1962]._____ 93
Figure II- 16 : Schéma du dispositif expérimental pour des hauteurs d'eau importantes, Lang [1962]. _____ 93
Figure II- 17 : Formation du brouillard par atomisation, Il'in et al. [1967]._____ 94
Figure II- 18 : Comportement d'un fluide soumis aux ultrasons, Mitome [1991]. _____ 95

Figure II- 19 : Influence du placement d'une plaque de polyéthylène sur la fontaine ultrasonore, (a) sans plaque, (b) la plaque à 3mm de profondeur et (c) la plaque à 15mm de profondeur, Mitome [1991]. 96
Figure II- 20 : Débit de fluide nébulisé en fonction de la viscosité du fluide, Callion et al. [1996]. 97
Figure II- 21 : Schéma du mouvement du liquide par le biais des ultrasons dans un réacteur, Gondrexon et al. [1998]. 97
Figure II- 22 : Influence de la tension d'alimentation du nébuliseur sur un fluide à surface libre, Kojima et al. [2010]. 98
Figure II- 23 : Répartition spatiale de la puissance ultrasonore d'un disque piézo-électrique, Zhan et al. [2011]. 99
Figure II- 24 : Influence des ultrasons sur le coefficient de transfert en fonction du débit du fluide chaud, Legay et al. [2012]. 100

❖ *Chapitre III*

Figure III- 2 : Schéma de la boucle NIDUS. 103
Figure III- 3 : Schéma de la section d'essais. 104
Figure III- 4 : Schéma du collage de la section d'essais. 106
Figure III- 5 : Schéma de la pièce 4. 107
Figure III- 6 : Schéma de l'emplacement d'un disque piézo-électrique. 108
Figure III- 7 : Photo de la section d'essais. 108
Figure III- 8 : Schéma des séparateurs. 109
Figure III- 9 : Photo des séparateurs. 110
Figure III- 10 : Insertion des vannes en sortie des canaux. 111
Figure III- 11 : Schéma de principe du refroidissement des circuits électroniques. 111
Figure III- 12 : Photo du montage des transducteurs. 112
Figure III- 13 : Schéma de principe des zones de mesures des pertes de pression. 114
Figure III- 14 : Photo des venturis Kobold. 115

❖ *Chapitre IV*

Figure IV- 1 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 250kg/h. 124
Figure IV- 2 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 500kg/h. 125
Figure IV- 3 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 250kg/h. 126
Figure IV- 4 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 500kg/h. 127
Figure IV- 5 : Distribution de la phase gazeuse en kg/h selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 500kg/h. 128
Figure IV- 6 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'eau pour Q_{air} = 7 kg/h. 129
Figure IV- 7 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'eau pour Q_{air} = 7 kg/h. 130
Figure IV- 8 : Photo de la section d'essais reliée aux séparateurs. 131
Figure IV- 9 : Évolution du STD_L en fonction du débit d'eau. 133
Figure IV- 10 : Évolution du STD_L en fonction du débit d'air. 134
Figure IV- 11 : Évolution du STD_G en fonction du débit d'eau. 135
Figure IV- 12 : Évolution du STD_G en fonction du débit d'air. 135
Figure IV- 13 : Évolution du STD_L en fonction de la densité de flux massique. 136
Figure IV- 14 : Évolution du STD_G en fonction du titre massique. 137
Figure IV- 15 : Distributions factices pour la compréhension du coefficient d'aplatissement. 138
Figure IV- 16 : Évolution du coefficient S_k pour la phase liquide en fonction du débit d'eau. 138
Figure IV- 17 : Évolution du coefficient S_k pour la phase gazeuse en fonction du débit d'air. 139
Figure IV- 18 : Évolution de l'écart-type de la distribution du titre dans les canaux en fonction du titre en entrée de distributeur. 140
Figure IV- 19 : Distribution avec les ultrasons, des débits massiques liquide selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 250kg/h. 142
Figure IV- 20 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 250kg/h et Q_{air} = 30kg/h. 143
Figure IV- 21 : Distribution avec les ultrasons, des débits massiques liquides selon le débit massique d'air pour Qeau = 500kg/h. 144
Figure IV- 22 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 500kg/h et Q_{air} = 20kg/h. 144
Figure IV- 23 : Distribution gazeuse avec ultrasons selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 250kg/h. 145
Figure IV- 24 : Distribution gazeuse avec ultrasons selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 500kg/h. 146
Figure IV- 25 : Distribution gazeuse avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 250kg/h et Q_{air} = 30kg/h. 147
Figure IV- 26 : Distribution gazeuse avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 500 kg/h et Q_{air} = 20kg/h. 148
Figure IV- 27 : Schéma de principe de l'installation de la caméra rapide. 149
Figure IV- 28 : Photos de l'écoulement à l'avant du distributeur sans ultrasons (haut) et avec ultrasons (bas) avec Q_{eau} = 250kg/h et Q_{air} = 30kg/h. 150
Figure IV- 29 : Photos de l'écoulement dans l'avant du distributeur sans ultrasons (haut) et avec ultrasons (bas) avec Q_{eau} = 500kg/h et Q_{air} = 20kg/h. 151

Figure IV- 30 : Évolution du STD_L en fonction du débit d'eau avec les ultrasons activés. 152
Figure IV- 31 : Écart entre le STD_L obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide. 153
Figure IV- 32 : Écart relatif entre le STD_L obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide. 153
Figure IV- 33 : Écart relatif entre le STD_G obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide. 154
Figure IV- 34 : Photo du distributeur (5 premiers canaux) avec les ultrasons activés 156
Figure IV- 35 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 100kg/h et Q_{air} = 20kg/h. 157
Figure IV- 36 : Distribution gazeuse avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 100kg/h et Q_{air} = 20kg/h. 157
Figure IV- 37 : Évolution du coefficient S_k pour la phase liquide avec les ultrasons activés en fonction du débit de celle-ci. 158
Figure IV- 38 : Évolution du coefficient ΔS_k pour la phase liquide avec les ultrasons activés en fonction du débit de celle-ci. 159
Figure IV- 39 : Évolution de l'écart-type de la distribution du titre massique dans les canaux en fonction du titre massique en entrée de distributeur avec les ultrasons activés. 160
Figure IV- 40 : Évolution de la différence sur l'écart-type de la distribution du titre dans les canaux avec et sans ultrasons. 160
Figure IV- 41 : Distribution liquide forcée pour Qeau = 600 kg/h dans la configuration 1. 162
Figure IV- 42 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'eau dans la configuration 1. 163
Figure IV- 43 : Photos des derniers canaux du distributeur pour la configuration 1 163
Figure IV- 44 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'eau pour la configuration 2. 164
Figure IV- 45 : Photos de l'ensemble des canaux du distributeur pour la configuration 2 164
Figure IV- 46 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'eau pour la configuration 1. 165
Figure IV- 47 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'eau pour la configuration 2. 166
Figure IV- 48 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'air pour la configuration 1 avec un débit massique d'eau à Q_{eau} = 250 kg/h. 167
Figure IV- 49 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'air pour la configuration 1 avec un débit massique d'eau à Q_{eau} = 250 kg/h. 167
Figure IV- 50 : Évolution du STD_L en fonction du débit d'eau pour les configurations forcées. 169
Figure IV- 51 : Évolution du STD_G en fonction du débit d'eau pour les configurations forcées. 170
Figure IV- 52: Évolution des STD_k en fonction du débit d'air avec la configuration 1 avec un débit massique d'eau à Q_{eau} = 250 kg/h. 171
Figure IV- 53 : Évolution du STD_L en fonction de la densité de flux massique en configuration forcée. 172
Figure IV- 54 : Évolution du STD_G en fonction du titre massique en configuration forcée. 173
Figure IV- 55 : Évolution du coefficient S_k pour la phase liquide en fonction du débit de celle-ci pour les configurations forcées. 173
Figure IV- 56 : Évolution du coefficient S_G en fonction du débit de gaz pour les configurations forcées. 174
Figure IV- 57 : Évolution des S_k en fonction du débit d'air avec la configuration 1 175
Figure IV- 58 : Évolution de l'écart-type de la distribution du titre dans les canaux en fonction du titre en entrée de distributeur pour les configurations forcées 1 et 2. 176
Figure IV- 59 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'eau pour la configuration 1 avec les ultrasons. 178
Figure IV- 60 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'eau pour la configuration 1 avec les ultrasons. 178
Figure IV- 61 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 375 kg/h et Q_{air} = 7 kg/h 179
Figure IV- 62 : Distribution gazeuse avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 375 kg/h et Q_{air} = 7 kg/h 180
Figure IV- 63 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'eau pour la configuration 2 avec les ultrasons. 181
Figure IV- 64 : Photo du fond du distributeur pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 30 kg/h pour la configuration 2 sans ultrasons (haut) et avec les ultrasons (bas). 181
Figure IV- 65 : Photo du début du distributeur pour Qeau = 100 kg/h et Qair = 30 kg/h pour la configuration 2 avec les ultrasons. 182
Figure IV- 66 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 30 kg/h 182
Figure IV- 67 : Schéma de la déstructuration des fontaines par le débit d'air. 183
Figure IV- 68 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'eau pour la configuration 2 avec les ultrasons. 183
Figure IV- 69 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 375 kg/h et Q_{air} = 30 kg/h 184
Figure IV- 70 : Distribution gazeuse avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 375 kg/h et Q_{air} = 30 kg/h 185

Figure IV- 71 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'air pour la configuration 1 avec les ultrasons. 186
Figure IV- 72 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'air pour la configuration 1 avec les ultrasons. 186
Figure IV- 73 : Évolution du STD_L en fonction du débit d'eau pour les configurations forcées avec ultrasons. 187
Figure IV- 74 : Écart relatif entre le STD_L obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide pour les configurations forcées. 188
Figure IV- 75 : Photos des six premiers canaux du distributeur avec Q_{air} = 7 kg/h (haut) et Q_{air} = 30 kg/h (bas). 189
Figure IV- 76 : Écart entre les STD obtenus avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit gazeux pour la configuration 1 et un débit massique d'eau à Q_{eau} = 250 kg/h. 190
Figure IV- 77 : Évolution du STD_G en fonction du débit d'eau pour les configurations forcées avec ultrasons. 191
Figure IV- 78 : Écart relatif entre le STD_G obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide pour les configurations forcées. 191
Figure IV- 79 : Évolution du coefficient S_k pour la phase liquide en fonction du débit de celle-ci pour les configurations forcées avec les ultrasons. 192
Figure IV- 80 : Évolution du coefficient S_k pour la phase gazeuse en fonction du débit d'eau pour les configurations forcées avec les ultrasons. 193
Figure IV- 81 : Évolution des coefficients S_k en fonction du débit d'air pour la configuration 1. 194
Figure IV- 82 : Écart relatif entre le S_L obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide pour les configurations forcées. 195
Figure IV- 83 : Écart relatif entre le E_L obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide pour les configurations forcées. 196
Figure IV- 84 : Écart relatif entre les S_L et E_L obtenus avec les ultrasons et ceux sans les ultrasons en fonction du débit liquide pour les configurations forcées. 196
Figure IV- 85 : Évolution de l'écart-type de la distribution du titre dans les canaux en fonction du titre avec et sans ultrasons en entrée de distributeur pour les configurations forcées avec les ultrasons. 197
Figure IV- 86 : Évolution de la différence relative de l'écart-type de la distribution du titre dans les canaux en fonction du titre en entrée de distributeur pour les configurations forcées. 197
Figure IV- 87 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons et avec les cinq premiers activés pour Q_{eau} = 250 kg/h dans la configuration 1. 200
Figure IV- 88 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons à celle avec les cinq premiers activés pour Q_{eau} = 500 kg/h dans la configuration 1. 200
Figure IV- 89 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons à celle avec les cinq premiers activés pour Q_{eau} = 250 kg/h dans la configuration 2. 201
Figure IV- 90 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons avec celle où les cinq premiers sont activés pour Q_{eau} = 500 kg/h dans la configuration 1. 202
Figure IV- 91 : Évolution du coefficient STD_L en fonction du débit liquide pour les deux configurations forcées et pour les essais avec les cinq premiers générateurs d'ultrasons en marche. 202
Figure IV- 92 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons avec celle où les cinq derniers sont activés pour Q_{eau} = 250 kg/h dans la configuration 1. 203
Figure IV- 93 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons et avec ceux en face des canaux impairs activés pour Q_{eau} = 500 kg/h dans la configuration 1. 204
Figure IV- 94 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons et avec ceux en face des canaux pairs activés pour Q_{eau} = 250 kg/h dans la configuration 1. 205
Figure IV- 95 : Schéma des différentes configurations des générateurs d'ultrasons. 206
Figure IV- 96 : Profils des distributions liquide en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 250 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h. 207
Figure IV- 97. : Photo du distributeur pour un essai avec les deux derniers appareils désactivés. 208
Figure IV- 98 : Profils des distributions gazeuses en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 250 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h. 209
Figure IV- 99 : Profils des distributions liquide en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h. 210
Figure IV- 100 : Profils des distributions gazeuses en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h. 211
Figure IV- 101 : Coefficient STD_L en fonction des différentes configurations des générateurs d'ultrasons 212
Figure IV- 102 : Coefficient STDL en fonction des différentes configurations des générateurs d'ultrasons 212
Figure IV- 103: Coefficient STD_G en fonction des différentes configurations des générateurs d'ultrasons 214
Figure IV- 104 : Coefficient STD_G en fonction des différentes configurations des générateurs d'ultrasons 214
Figure IV- 105 : Différence relative du STD_L par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 250 kg/h. 215

Figure IV- 106 : Différence relative du STD_L par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 100 kg/h. 216
Figure IV- 107 : Différence relative du STD_G par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 250 kg/h. 217
Figure IV- 108 : Différence relative du STD_G par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 100 kg/h. 217
Figure IV- 109 : Différence relative de l'écart-type du titre massique par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 250 kg/h. 219
Figure IV- 110 : Différence relative de l'écart-type du titre massique par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 100 kg/h. 219
Figure IV- 111 : Schéma de principe pour le cas où les canaux pairs sont ouverts. 221
Figure IV- 112 : Profils des distributions liquide en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 250 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h pour les canaux pairs ouverts. 221
Figure IV- 113 : Profils des distributions gazeuse en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 250 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h pour les canaux pairs ouverts. 222
Figure IV- 114 : Profils des distributions liquide en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h pour les canaux pairs ouverts. 223
Figure IV- 115 : Profils des distributions gazeuses en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h pour les canaux pairs ouverts. 224
Figure IV- 116 : Différence relative du STD_L par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour les canaux pairs ouverts. 225
Figure IV- 117 : Différence relative du STD_G par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour les canaux pairs ouverts. 225
Figure IV- 118 : Différence relative de l'écart-type du titre massique par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour les canaux pairs ouverts. 226
Figure IV- 119 : Évolution des pertes de pression par frottement sur un canal en fonction du titre massique avec et sans ultrasons pour G = 166 kg.m^{-2}.s^{-1}. 230
Figure IV- 120 : Photos de l'alimentation du canal sans ultrasons. A gauche alimentation liquide, à droite, alimentation gazeuse. 230
Figure IV- 121 : Gradient de pertes de pression diphasique par frottement dans les mini-canaux verticaux, Poggi [2008]. 231
Figure IV- 122 : Photos de l'alimentation du canal avec ultrasons. 232
Figure IV- 123 : Variation de la mesure des pertes de pression. 232
Figure IV- 124 : Évolution de l'écart relatif des modèles en fonction du titre massique. 238
Figure IV- 125 : Evolution de l'écart relatif des modèles en fonction de la vitesse de la phase gazeuse. 239
Figure IV- 126 : Comparaison des pertes de pression dans la section d'essais avec les modèles pour Q_{eau}=500kg/h et Q_{air} = 7 kg/h. 240
Figure IV- 127 : Comparaison des pertes de pression dans la section d'essais avec les modèles pour Q_{eau}=500kg/h et Q_{air} = 30 kg/h. 241
Figure IV- 128 : Photo du décalage des fontaines dans le distributeur pour Q_{eau} = 600 kg/h et Q_{air} = 7 kg/h. 242
Figure IV- 129 : Photo du décalage des fontaines dans le distributeur pour Q_{eau} = 250 kg/h et Q_{air} = 7 kg/h. 243
Figure IV- 130 : Photo du transport des fontaines dans le distributeur pour Q_{eau} = 250 kg/h 243
Figure IV- 131 : Influence du niveau de l'eau sur la direction de la fontaine dans le distributeur. 244
Figure IV- 132 : Évolution de la hauteur relative de la fontaine en fonction de la hauteur de liquide au-dessus de l'élément piézo-électrique. 244
Figure IV- 133 : Influence de la hauteur d'eau sur la fontaine, à gauche h = 1,7 cm 245
Figure IV- 135 : Influence de la nature du fluide sur la hauteur de la fontaine, gauche : éthanol, droite : glycol. 246
Figure IV- 134 : Influence de la tension d'alimentation sur la hauteur de la fontaine, à gauche 63% de la tension nominale et à droite 70%. 247

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I- 1 : Conditions d'utilisation de la carte de Mandhane et al. [1974]..... 26

Chapitre III

Tableau III- 1 : Caractéristiques de la section d'essais. _____ 105
Tableau III- 2 : Récapitulatif des capteurs._____ 116

Chapitre IV

Tableau IV- 1 : Conditions expérimentales de l'étude de la distribution._____ 121
Tableau IV- 2 : Conditions expérimentales pour la distribution forcée._____ 122
Tableau IV- 3 : Conditions opératoires pour les différentes configurations des ultrasons. _____ 177
Tableau IV- 4: Écarts des principaux modèles de prédiction des pertes de pression. _____ 237
Tableau IV- 5 : Ecarts des principaux modèles de prédiction des pertes de pression sans les essais avec un titre massique inférieur à 2%._____ 239
Tableau IV- 6 : Influence du fluide sur l'intensité et la pression acoustique. _____ 245

Nomenclature

Alphabet latin

a hauteur d'un mini-canal m
b largeur d'un mini-canal m
A hauteur du distributeur
B largeur du distributeur
c célérité $m.s^{-1}$
C coefficient de décharge
C_p Capacité thermique massique à pression constante $J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_v Capacité thermique massique à volume constant $J.kg^{-1}.K^{-1}$
D diamètre m
D_h diamètre hydraulique m
E_K aplatissement de la phase K
f coefficient de frottement
g gravité $m.s^{-2}$
G densité de flux massique $kg.m^{-2}.s^{-1}$
h hauteur m
I intensité $W.m^{-2}$
j vitesse superficielle $m.s^{-1}$
l longueur d'un mini-canal m
L longueur du distributeur
N nombre de canaux
$\dot{m}$ débit massique dans canal $kg.s^{-1}$
$\dot{M}$ débit massique dans distributeur $kg.s^{-1}$
P pression Pa
ΔP perte de pression Pa
Q débit volumique $m^3.s^{-1}$
r ratio
S section m^2
S_K asymétrie de la phase K
STD standard deviation
t temps s
T température K ou °C
v vitesse $m.s^{-1}$
V volume m^3
x titre massique en gaz
z avancement m

Alphabet latin grec

α coefficient d'absorption de l'onde acoustique
$\alpha_{l,i}$ ratio débit liquide dans canal *i*
$\alpha_{g,i}$ ratio débit gazeux dans canal *i*
β rapport du diamètre du col sur le diamètre de l'entrée du venturi
Δ… variation de…

ε coefficient de détente
ε_V taux de vide
θ angle d'inclinaison
κ rapport des capacités thermiques
μ viscosité dynamique Pa.s
ρ masse volumique $kg.m^{-3}$
σ tension superficielle $N.m^{-1}$
Φ facteur diphasique
ω pulsation s^{-1}

Indices et exposants

0 initial (ou total ou entrée)
100 relatif au circuit d'air
200 relatif au circuit d'eau
300 relatif au circuit diphasique
air air
diph diphasique
distrib distributeur
e entrée
eau eau
g ou v gaz
H homogène
K phase liquide ou gazeuse
i indice de position
l liquide
max maximum
min minimum
s sortie
T total
th théorique

Introduction

Dans un environnement où l'optimisation énergétique prend une importance grandissante, notamment à cause de la diminution de la disponibilité de certaines énergies, les échangeurs thermiques jouent un rôle essentiel. Ceux-ci doivent posséder une efficacité de plus en plus grande pour minimiser les pertes thermiques. Cette efficacité dépend de nombreux paramètres, en particulier des régimes de fonctionnement. L'adaptabilité de ces échangeurs, pour tendre vers un système qui puisse être souple et ajustable en fonction du type de régime est donc un point important. Plusieurs possibilités ont été explorées mais peu ont débouché sur des réalisations industrielles.

L'amélioration de l'efficacité d'un échangeur peut être réalisée par des méthodes actives et/ou des méthodes passives. Les méthodes passives ne font pas appel à un apport d'énergie extérieur. Elles portent sur l'optimisation de la géométrie de l'échangeur, soit en diminuant les dimensions caractéristiques des canaux, soit en réalisant un cheminement des écoulements qui améliore la distribution. Elles peuvent faire appel à des dispositifs ou à des propriétés de la surface d'échange qui permettent d'augmenter la turbulence d'un fluide et favoriser ainsi les échanges thermiques. Elles peuvent également porter sur l'utilisation de fluides à fort potentiel de transfert, mais il n'y a pas toujours le choix d'un tel fluide. Mis à part dans le dernier cas, ces méthodes sont applicables pour un régime de fonctionnement donné, le régime nominal.
Le cas des échangeurs avec changement de phase présente une difficulté supplémentaire. La distribution des écoulements diphasiques dans ce type d'échangeur est aussi conditionnée par le régime d'écoulement. Des dispositifs ont ainsi été imaginés pour induire un régime d'écoulement favorable à une bonne distribution.

Les méthodes actives sont utilisées soit en régime nominal, soit en régime transitoire. En régime nominal, différentes expérimentations ont été effectuées par exemple en appliquant un champ électrique pour drainer des condensats ou en faisant vibrer la surface d'échange pour briser la sous-couche laminaire près de la surface d'échange. Pour les écoulements diphasiques avec changement d'état des systèmes mécaniques peuvent également être imaginés pour provoquer la vaporisation du fluide à l'endroit favorable.
En régime transitoire, peu de systèmes existent ou ont été expérimentés. La prise en compte de tels régimes est d'une grande importance puisqu'ils sont présents à chaque mise en route ou arrêt d'une installation ainsi qu'à chaque variation de la demande de chaleur ou de froid.

Le système qui est proposé dans cette thèse entre dans le cadre des méthodes actives. Il peut être utilisé aussi bien en régime nominal qu'en régime transitoire. Il peut également être utilisé en régime dégradé, régime causé par l'encrassement par exemple. Il consiste en l'utilisation de générateurs d'ondes ultrasonores servant à modifier la distribution d'un écoulement diphasique au sein d'un échangeur. L'échangeur considéré est un échangeur à mini-canaux ce type d'échangeur étant de plus en plus utilisé en climatisation et en chimie fine compte tenu de ses performances thermiques.

Les générateurs d'ondes ultrasonores étant alimentés électriquement, il est possible de les utiliser en continu ou de modifier leur alimentation soit pour les arrêter soit pour modifier leur puissance. Un dispositif versatile est alors obtenu. Notre objectif est donc de valider cette méthode pour pouvoir dans le futur réaliser un échangeur « intelligent » qui pourra s'adapter au régime de fonctionnement du dispositif dont il fera partie.

Pour cela, le mémoire est constitué de deux grandes parties : la première concerne l'état de l'art de la distribution diphasique avec la technologie choisie pour l'améliorer. La seconde s'intéresse à l'aspect expérimental et présente les résultats obtenus.

Le premier chapitre a pour but d'exposer un état de l'art sur la distribution diphasique ainsi que sur les pertes de pression d'un écoulement diphasique. Une étude des différents paramètres influençant la répartition des deux phases dans l'échangeur sera effectuée. Une analyse des profils de distribution rencontrés dans les différentes études publiées sera ensuite réalisée en fonction de la configuration de l'échangeur. Enfin, les pertes de pression seront également considérées en fin de chapitre puisqu'elles sont corrélées à la distribution des écoulements.

Le deuxième chapitre sera entièrement consacré aux ultrasons. En effet, ce n'est pas un domaine familier au thermicien. Quelques définitions utiles seront données et différentes technologies de production d'ondes ultrasonores seront décrites. L'interaction des ondes ultrasonores avec un milieu fluide sera précisée.

Le troisième chapitre présentera le dispositif expérimental conçu pour réaliser les différents essais de l'étude. Les différentes contraintes rencontrées pour la construction de la boucle et de la section d'essais seront exposées afin de mieux comprendre les solutions utilisées.

Le quatrième et dernier chapitre de ce mémoire présentera et analysera les résultats obtenus sur la distribution diphasique avec et sans ultrasons. Les phénomènes mis en jeu seront mis en évidence à l'aide d'une visualisation faite au moyen d'une caméra rapide. Puis, une analyse de la répartition des générateurs d'ultrasons est réalisée dans le but d'une possible régulation de ceux-ci. Différentes configurations aussi bien au niveau de l'échangeur que des générateurs d'ultrasons seront testées afin d'orienter les études futures. Une étude des pertes de pression sera également présentée en fin de chapitre, notamment pour étudier l'influence des ultrasons sur les valeurs mesurées.

En fin de mémoire, une conclusion générale sera faite et des perspectives à court et moyen termes seront exposées.

Chapitre I : Distribution des deux phases pour des écoulements diphasiques.

Les performances des échangeurs sont liées à différents paramètres. Les échangeurs parcourus par un fluide diphasique sont notamment dépendants de la distribution de chaque phase dans les différentes parties qui les composent. Un autre paramètre important dans les performances concerne les pertes de charges. Ces deux paramètres sont intimement liés car la variation de l'un entraine immédiatement une variation de l'autre.
Dans ce chapitre un bref rappel des grandeurs caractéristiques et des configurations d'écoulement diphasique sera fait. Les paramètres influençant la distribution diphasique seront définis par le biais de la présentation de différentes études expérimentales menées sur le sujet. Les principales tendances seront décrites en fonction des paramètres opératoires. Une présentation des différentes méthodes proposées par les auteurs afin d'améliorer la distribution diphasique suivra ces études.

1. Configuration d'écoulements

1.1 Grandeurs caractéristiques des écoulements diphasiques

Afin de bien comprendre les formules et les graphiques présentés dans ce mémoire, il est nécessaire de définir certaines grandeurs caractéristiques des écoulements diphasiques. Dans des écoulements liquide - gaz, les débits massiques du liquide et de la vapeur seront notés M_L et M_V ($kg.s^{-1}$) respectivement. La première grandeur que l'on définira est le titre massique donné par la formule suivante :

$$x = \frac{\dot{M}_V}{\dot{M}_V + \dot{M}_L} \qquad \text{(I.1)}$$

Le titre massique est défini comme étant le rapport entre le débit massique de la phase vapeur (ou gazeuse) et le débit massique total s'écoulant dans la même section.

Les débits massiques permettent également de déterminer la densité de flux massique (ou vitesse massique), lorsqu'ils sont rapportés à la section de passage S du distributeur ou du canal. Cette grandeur est notée G ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) et est calculée de la façon suivante :

$$G_L = \frac{\dot{M}_L}{S_L} \quad et \quad G_V = \frac{\dot{M}_V}{S_V} \qquad \text{(I.2)}$$

La densité de flux massique totale est alors :

$$G = G_L + G_V \qquad \text{(I.3)}$$

Les débits massiques de chaque phase peuvent alors être exprimés en fonction de ces deux précédentes grandeurs.

$$\dot{M}_L = (1 - x) \cdot G \cdot S \qquad \text{(I.4)}$$

$$\dot{M}_G = x \cdot G \cdot S \qquad \text{(I.5)}$$

Une autre grandeur intéressante est la vitesse superficielle *j* de la phase considérée qui s'exprime en fonction du débit volumique et de la section de passage.

$$j_L = \frac{\dot{M}_L}{\rho_L \cdot S} \qquad \text{(I.6)}$$

$$j_V = \frac{\dot{M}_V}{\rho_V \cdot S} \qquad \text{(I.7)}$$

$$j = j_L + j_V \qquad \text{(I.8)}$$

Le taux de présence de la phase gazeuse est défini par le taux de vide avec l'équation suivante :

$$\varepsilon_V = \frac{V_V}{V_T} \qquad \text{(I.9)}$$

V_V étant le volume occupé par la phase gazeuse et V le volume total. La formule peut également être faite avec l'aire de la section occupée A_V par cette même phase comme indiqué par l'équation ci-dessous.

$$\varepsilon_V = \frac{A_V}{A_T} \qquad \text{(I.10)}$$

1.2 Régimes d'écoulement

Pour des écoulements diphasiques, le mélange liquide-vapeur (ou liquide-gaz) peut prendre différentes configurations en fonction de la pression, des débits massiques, du flux de chaleur, du titre massique ou encore de la géométrie. Suivant la configuration de l'écoulement, les mécanismes d'échange de chaleur sont différents et différentes corrélations doivent alors être utilisées.
Pour illustrer l'importance de ces configurations, nous donnons l'exemple de l'ébullition d'un liquide à l'intérieur d'un tube. Les Figure I- 1 et I-2 représentent respectivement les écoulements verticaux et horizontaux. Ces schémas ont été proposés par **Collier [1981]**.

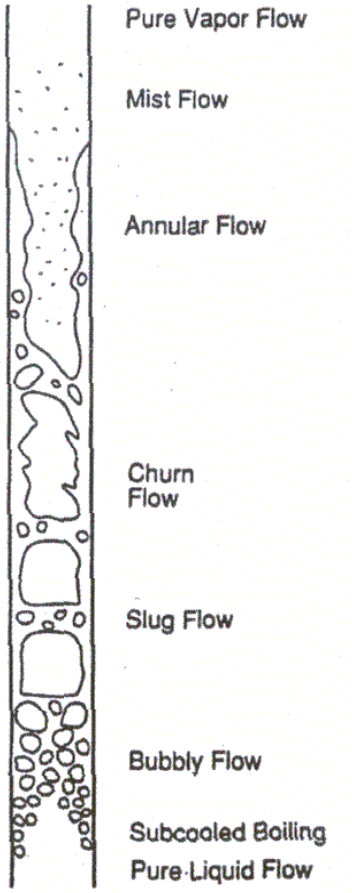


Figure I- 1 : Configurations d'écoulement ascendant en ébullition dans un tube lisse vertical, Collier [1981].

Pour les écoulements dans un tube vertical, les différentes configurations d'écoulement sont les suivantes.

-Ecoulement à bulles (« Bubbly Flow »)

La phase liquide est continue, la phase vapeur est dispersée sous forme de fines bulles dans le liquide. Le trajet des bulles est complexe ; elles sont de tailles différentes et peuvent coalescer entre elles.

-Ecoulement à bouchons (« Plug / Slug Flow »)

Un film fin de liquide entoure les bulles. Ce film contient souvent une dispersion de fines bulles. Cette configuration se rencontre lorsque le diamètre des bulles tend vers le diamètre hydraulique de la section de passage et se caractérise par des bulles en forme d'ogives

-Ecoulement agité (« Churn Flow »)

Pour des vitesses plus importantes de la phase vapeur, les bulles de l'écoulement à bouchons se disloquent et forment une configuration instable où le liquide adopte un mouvement agité et oscillatoire. Cette configuration couvre souvent une large gamme de vitesses massiques.

-Ecoulement annulaire (« Annular Flow »)

Cette configuration est caractérisée par une phase liquide se déplaçant sous forme de film sur les parois et une phase vapeur s'écoulant au centre du tube. Une partie du liquide peut être entraînée sous forme de gouttelettes dans le cœur gazeux central, et même, pour certaines vitesses massiques, la majorité de la phase gazeuse voyageant sous cette forme donne naissance à un écoulement à brouillard (« Mist / Fog Flow »)

Les écoulements dans les tubes horizontaux présentent des configurations similaires mais où la gravité entre en jeu et casse la symétrie radiale des configurations présentes dans les tubes verticaux. Ces configurations d'écoulement sont les suivantes.

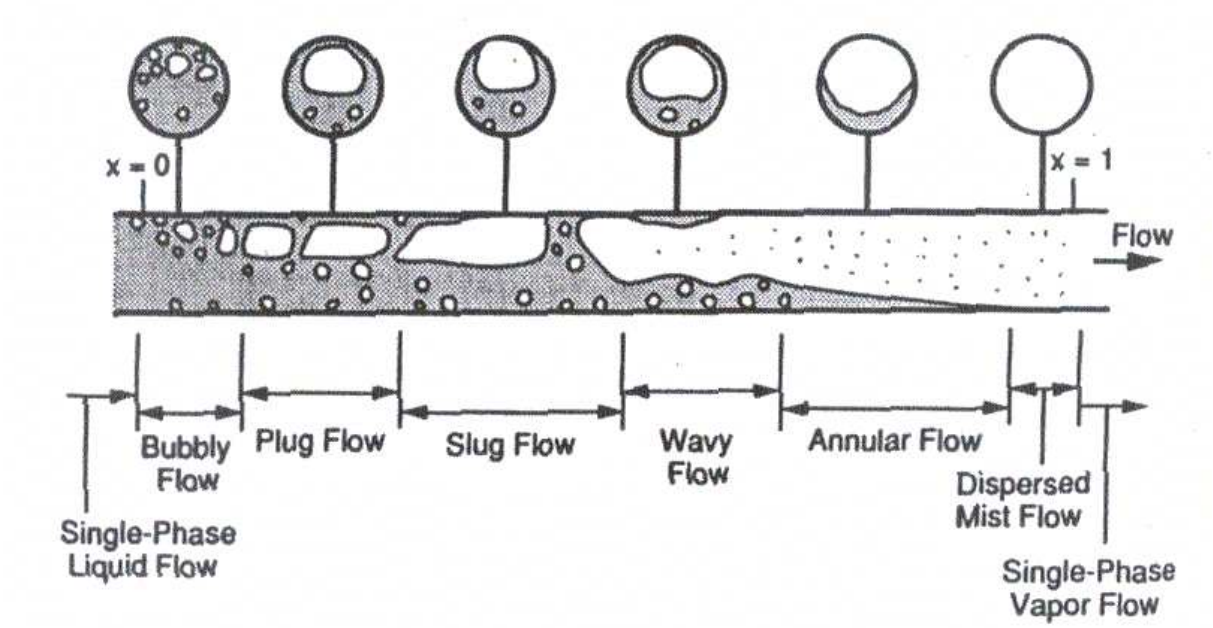


Figure I- 2 : Configurations d'écoulement en vaporisation dans un tube lisse horizontal, Collier [1981].

-Ecoulement à bulles (« Bubbly Flow »)

Il s'agit tout comme dans le cas de l'écoulement vertical, de bulles dispersées dans la phase liquide ; cependant la gravité a tendance à rassembler les bulles dans la partie supérieure du tube.

-Ecoulement à bouchons (« Plug Flow »)

Cette configuration est caractérisée par des bulles en forme d'ogives comme pour les écoulements verticaux, cependant les bulles se déplacent dans la partie supérieure du tube.

- Ecoulement à poches (« Slug Flow »)

Cet écoulement, ainsi que l'écoulement à bouchons, est intermittent. Les bulles de gaz sont plus grosses tandis que les poches de liquide contiennent de nombreuses petites bulles.

-Ecoulement stratifié (« Stratified Flow »)

Dans cette configuration, obtenue pour de faibles débits des phases liquide et vapeur, le liquide s'écoule dans la partie inférieure du tube et la vapeur dans la partie supérieure. L'interface est lisse.

-Ecoulement à vagues (« Wavy Flow »)

Une augmentation de la vitesse de la phase vapeur provoque l'apparition de vagues à l'interface liquide-vapeur.

-Ecoulement annulaire (« Annular Flow »)

Cette configuration est identique à celle rencontrée pour les tubes verticaux. La gravité tend à rendre le film de liquide plus épais dans la partie inférieure du tube, phénomène qui disparaît lorsque la vitesse de la vapeur augmente.

1.3 Cartes d'écoulement

Les cartes d'écoulement sont un outil essentiel pour déterminer les configurations présentées dans la partie précédente en fonction des conditions expérimentales et de certaines propriétés physiques du fluide. Elles fournissent une représentation graphique bidimensionnelle des domaines d'existence des différents régimes. Les transitions entre les différentes configurations d'écoulement sont déterminées grâce à un système de coordonnées. Ces coordonnées sont des paramètres facilement contrôlables par l'expérimentateur. Par exemple de nombreuses cartes utilisent les vitesses superficielles de chaque phase (déjà définies) qui représentent les vitesses débitantes qu'elles auraient si, à débit identique, elles circulaient seules dans la conduite.
Bien que chaque configuration soit délimitée par des courbes, le passage d'une configuration à une autre n'est pas brutal et les courbes doivent être considérées comme des zones de transition ayant une certaine épaisseur. Ceci est d'autant plus vrai que certains paramètres comme la tension de surface n'apparaissent pas.
.
Une des cartes les plus utilisées pour les écoulements horizontaux est celle de **Mandhane et al. [1974**] basée sur des écoulements eau – air et présentée sur la Figure I- 3

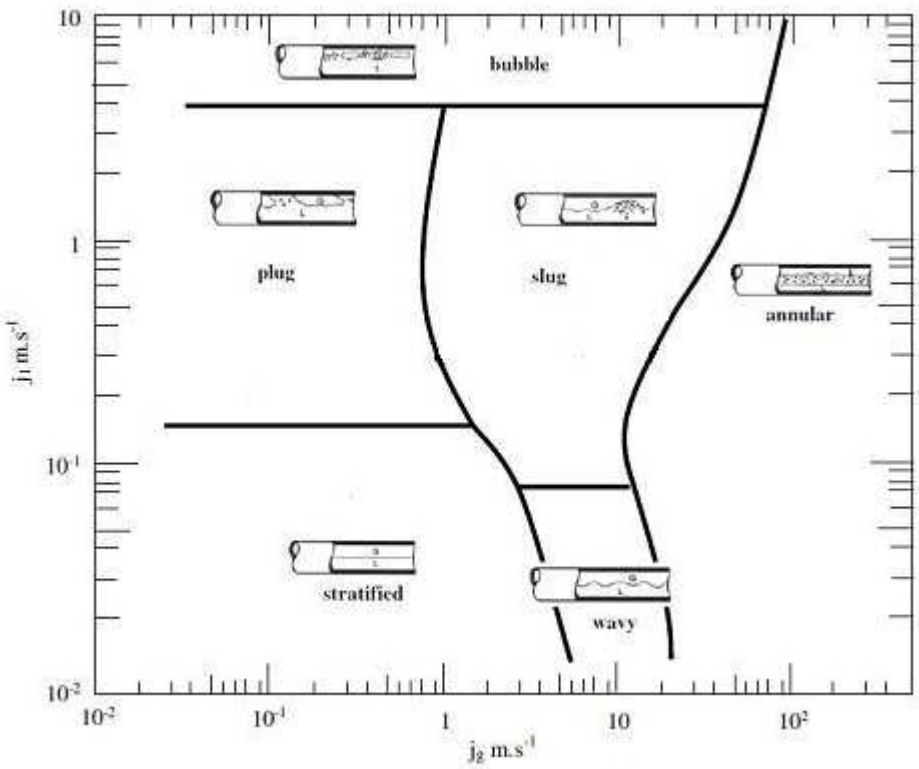


Figure I- 3 : Carte d'écoulements pour une configuration horizontale, Mandhane et al. [1974].

Les frontières entre les différents régimes ne sont pas nettes, ce qui fait que les zones de transitions d'un régime à l'autre peuvent être relativement étendues. De plus cette carte ne peut être utilisée que dans certaines conditions qui sont décrites dans le Tableau I- 1.

Tableau I- 1 : Conditions d'utilisation de la carte de Mandhane et al. [1974].

Paramètres	Minimum	Maximum
Diamètre interne de conduite (mm)	12,7	165,1
Masse volumique liquide / gaz (kg.m^{-3})	705 / 0,8	1009 / 50,5
Viscosité dynamique du liquide / gaz (Pa.s)	3.10^{-4} / 10^{-5}	9.10^{-2} / $2,2.10^{-5}$
Tension de surface (mN.m^{-1})	24	103
Vitesse superficielle du liquide / gaz (m.s^{-1})	9.10^{-4} / 4.10^{-4}	0,731 / 0,171

D'autres auteurs ont également conçu des cartes d'écoulement pour d'autres conditions. **Taitel et Dukler [1976]** ont proposé une carte théorique pour les écoulements dans des tubes horizontaux et également légèrement inclinés. Elle repose sur l'utilisation de corrélations basées sur l'étude des mécanismes mis en jeu lors du changement de régime. Elle est présentée sur la Figure I- 4.

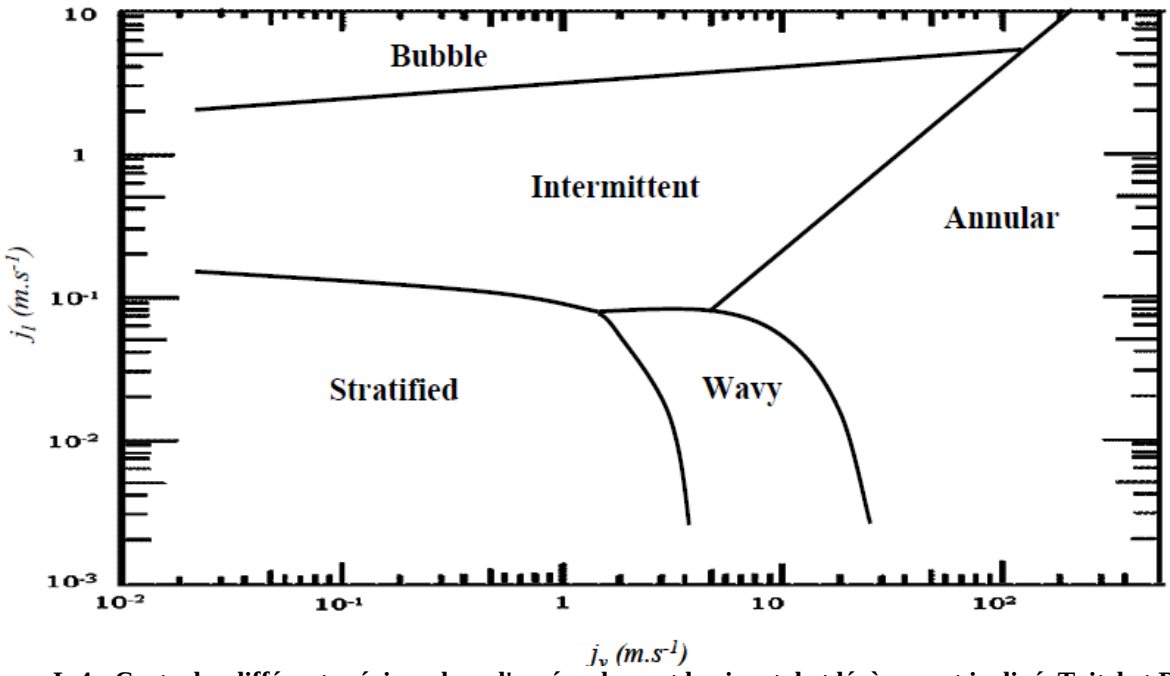


Figure I- 4 : Carte des différents régimes lors d'un écoulement horizontal et légèrement incliné, Taitel et Dukler [1976].

En ce qui concerne les écoulements verticaux, **Taitel et Dukler [1980]** ont proposé une carte pour les tubes verticaux et des écoulements ascendants qui est présentée sur la Figure I- 5.

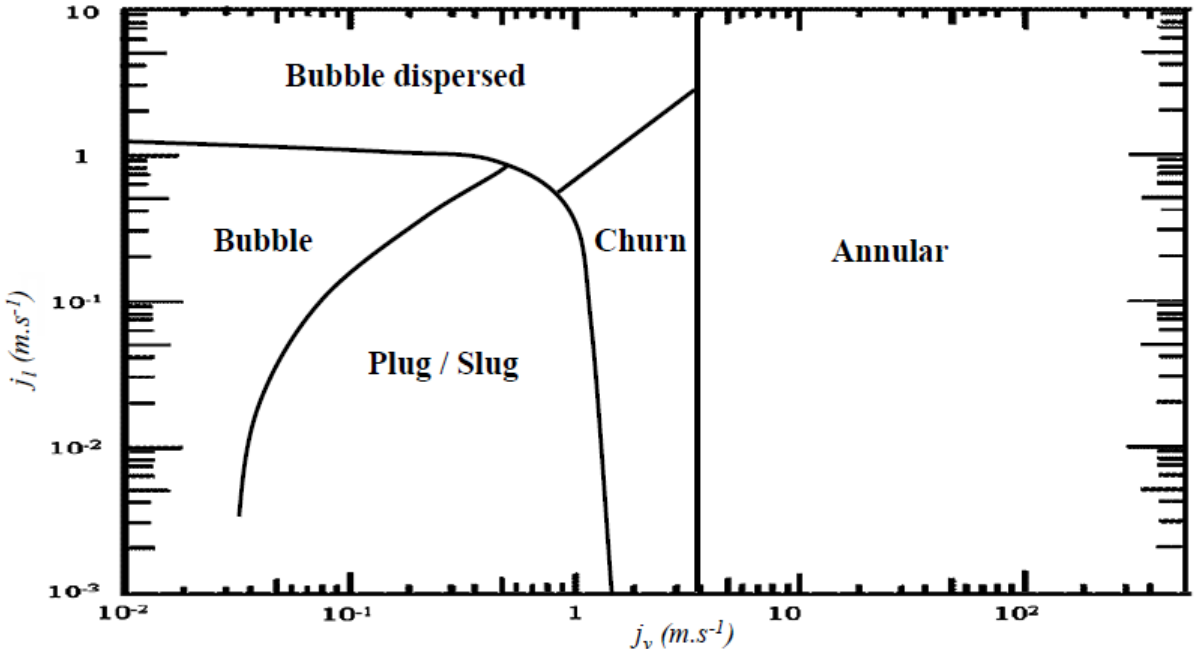


Figure I- 5 : Carte des différents régimes lors d'un écoulement vertical ascendant, Taitel et Dukler [1980].

Colin [2004] a repris la base du travail fait par **Taitel et Dukler [1980]** afin d'adapter celui-ci aux mini-canaux. Cette carte est présentée sur la Figure I- 6. Il faut remarquer que cette carte est valable quelle que soit l'orientation du canal. On remarque que la stratification apparaît pour des valeurs de la vitesse superficielle liquide très faible. Cela est dû à l'influence de la tension de surface.

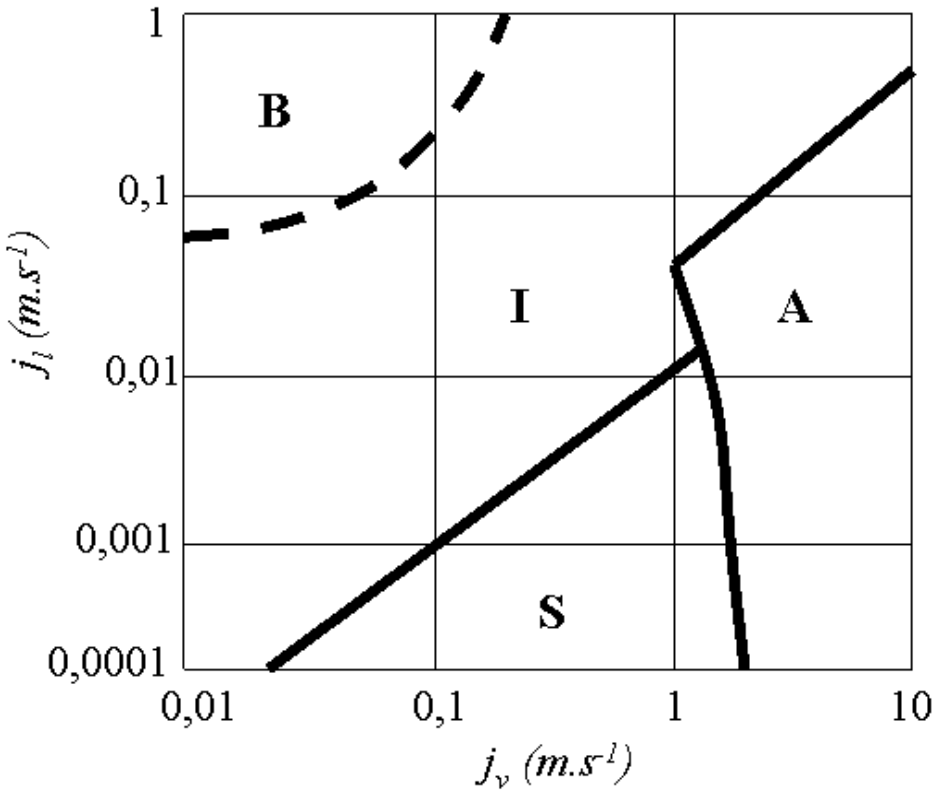


Figure I- 6 : Carte des différents régimes pour les mini canaux verticaux ascendants, Colin [2004] (B=Bulles, I=Intermittent ou écoulements à poches et agités, A=Annulaire et S=Stratifié).

La plupart des cartes des différents régimes d'écoulements proposés dans la littérature concernent des écoulements adiabatiques et donc sans changement de phase. Il s'agit souvent d'un fluide couplé avec un gaz injecté (généralement de l'air).

2. Distribution

Les échangeurs de chaleur compacts constituent désormais des composants essentiels des machines frigorifiques. Ce sont généralement des échangeurs réfrigérant/air pouvant servir de condenseurs et/ou d'évaporateurs. Ils peuvent être composés de tubes plats du côté du réfrigérant et d'ailettes du côté de l'air (Figure I- 7). Ces tubes plats sont percés de mini-canaux qui sont alimentés à l'aide d'un distributeur, afin d'utiliser l'échangeur de chaleur dans une configuration d'écoulements parallèles. Les condenseurs avec des canaux de petites tailles sont utilisés pour la climatisation grâce à leurs meilleurs coefficients de transfert et leur réduction de charge par rapport aux échangeurs conventionnels. Cependant les évaporateurs, contrairement aux condenseurs, sont alimentés par un fluide diphasique, liquide et gaz, ce qui favorise une mauvaise répartition du fluide entre les canaux. D'après **Mueller et Chiou [1983]** et également **Kitto et Robbertson [1989]**, la mauvaise distribution dans les échangeurs de chaleurs est due à :

- la conception mécanique, telle que le design du distributeur et des canaux, et la tolérance de fabrication,
- la mauvaise distribution causée par le transfert de chaleur,
- la difficulté à distribuer les deux phases à cause de leur séparation et de l'instabilité du débit,
- la formation d'encrassement et de corrosion.

Pour donner un exemple, dans un évaporateur, une distribution non uniforme provoque une faible alimentation en liquide pour certains canaux, aboutissant à un phénomène d'assèchement et donc à des mauvaises performances de transfert de chaleur. D'après **Kulkami *et al.* [2004]**, une mauvaise distribution peut conduire à une réduction des performances jusqu'à 20%.

Concernant la distribution d'un fluide monophasique, plusieurs études ont fourni suffisamment de résultats afin de pouvoir prédire d'une façon raisonnable, le comportement de celui-ci (**Acrivos et al. [1959]**, **Bajura et Jones [1976]**, **Datta et Lajundar [1980]**, **Bassiouny et Martin [1984]**, **Nakamura et al. [1989]**, **Kim et al. [1955]**, **Oh et al. [2006]** et **Poggi [2008]**)

La distribution des fluides diphasiques est bien plus complexe. Les premières études avaient pour but de comprendre le comportement d'un flux diphasique à une simple jonction en T (**Hong [1976]**, **Saba et Lahey [1984]**, **Seeger *et al.* [1986]**, **Reimann et Seeger [1986]**, **Reimann *et al.* [1988]**, **Azzopardi [1999]**, **Stacey *et al.* [2000]**, **Lee et Lee [2001]**, **Levac *et al.* [2002]**, **Das *et al.* [2005]**, **Wren *et al.* [2005]** et aussi **Tae et Cho [2006]**). Des modèles ont été développés afin de prédire le comportement du fluide, mais principalement pour des régimes annulaires et avec des sections de diamètre important (**Azzopardi et Whalley [1982]**, **Azzopardi [1984]**, **Shoham *et al.* [1987]**, **Hwang *et al.* [1988]**, **Buel *et al.* [1994]**, **Watanabe *et al.* [1998]**).

Dans cette partie, l'influence de plusieurs paramètres sur la distribution diphasique est étudiée pour des distributeurs reliés à plusieurs canaux avec des petits diamètres ($\leq$ 5 mm). Parmi les premiers travaux, celui de **Watanabe *et al.* [1995]** a étudié la distribution diphasique du R-11 pour des canaux verticaux et horizontaux, observant l'influence de la charge thermique. Par la suite, **Osakabe *et al.* [1999]** ainsi que **Horiki et Osakabe [1999]** ont étudié la distribution de l'eau contenant des bulles d'air. L'influence de facteurs géométriques et des conditions expérimentales sont discutés ci-dessous.

Concernant l'approche numérique, des modèles ont été développés (**Watanabe *et al.* [1995]**, **Oliet *et al.* [2007]**, **Lee [2009]**, **Albanque *et al.* [2010]**), afin de tenter d'identifier un modèle CFD approprié pour la prédiction de la distribution des deux phases (**Fei et Hrnjak [2004]**, **Li *et al.* [2005]**, **Choi *et al.* [2006]** et **Ahmad *et al.* [2007]**), mais les systèmes étudiés étaient caractérisés par un faible nombre de canaux.

Plusieurs auteurs ont déjà réalisé un état de l'art sur la distribution diphasique dans les mini canaux. **Webb et Chung [2004]** ont étudié l'influence de la géométrie entre les canaux sur la distribution. **Hrnjak [2004]** présente une vue d'ensemble sur les différentes options pour distribuer d'une façon homogène aussi bien un fluide monophasique que diphasique. Il présente également un moyen d'estimer la qualité de la distribution. Pour la distribution diphasique au niveau de la jonction distributeur-canal, **Lee [2006]** a décrit des études expérimentales et des modèles développés pour des jonctions en T, double T et plusieurs canaux.

De récentes études attestent de l'intérêt croissant des chercheurs dans ce domaine. Dans la suite du chapitre, après une présentation des distributions typiques des fluides diphasiques dans des échangeurs de chaleur compacts, des boucles d'essais permettant la caractérisation de la distribution seront décrites. De même, un état de l'art sur les paramètres généralement étudiés dans la littérature sera effectué. Une comparaison entre les différents résultats obtenus par les auteurs et les orientations des canaux sera faite, et enfin, certaines solutions développées pour améliorer la distribution diphasique seront exposées.

Considérant l'influence majeure des facteurs géométriques et des conditions opératoires sur la distribution diphasique, les auteurs ont développé des bancs d'essais afin d'étudier certains paramètres d'intérêt. Pour chaque étude, un échangeur spécifique a donc été développé afin de permettre l'observation des paramètres choisis. Pour comparer les résultats obtenus avec les différentes géométries, tout en évitant la description de toutes les sections d'essais, seules les différences entre les échangeurs seront décrites. Les principales caractéristiques de cet échangeur de référence, basées sur celles le plus souvent rencontrées, concernant principalement le distributeur et le tube d'entrée de même diamètre et de même axe, et également le distributeur connecté à plusieurs canaux sont visibles sur la Figure I- 7.

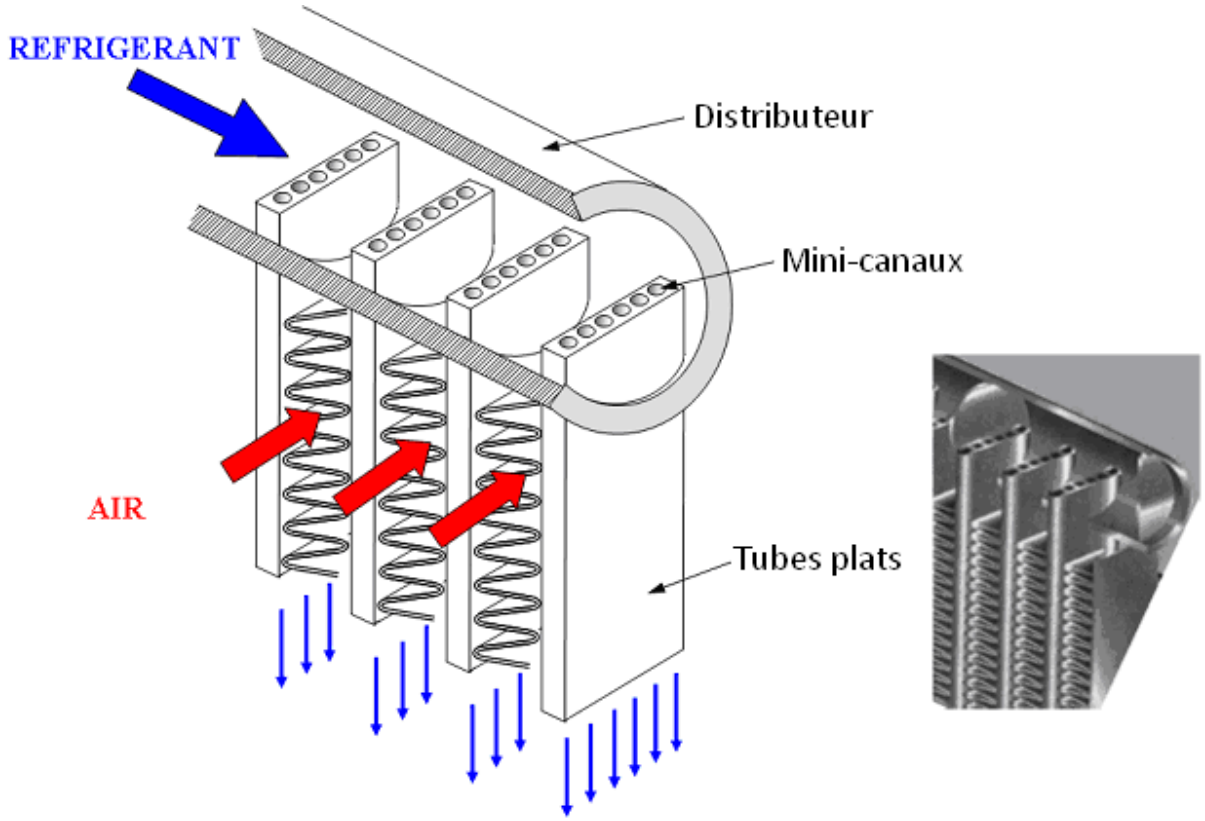


Figure I- 7 : Distributeur connecté à plusieurs canaux plats.

2.1 Distributions typiques et bancs d'essais

2.1.1. Géométrie de l'échangeur

Différentes techniques de distribution d'un fluide sont illustrées sur la Figure I- 8 (a) et la Figure I- 8 (b). Le réfrigérant alimente l'échangeur par l'intermédiaire d'un distributeur soit vertical soit horizontal. Dans le cas où la direction de l'écoulement à l'entrée est parallèle au distributeur, le trajet de l'écoulement peut être soit de type U (Figure I- 8 (a)) soit de type Z (Figure I- 8 (b)).

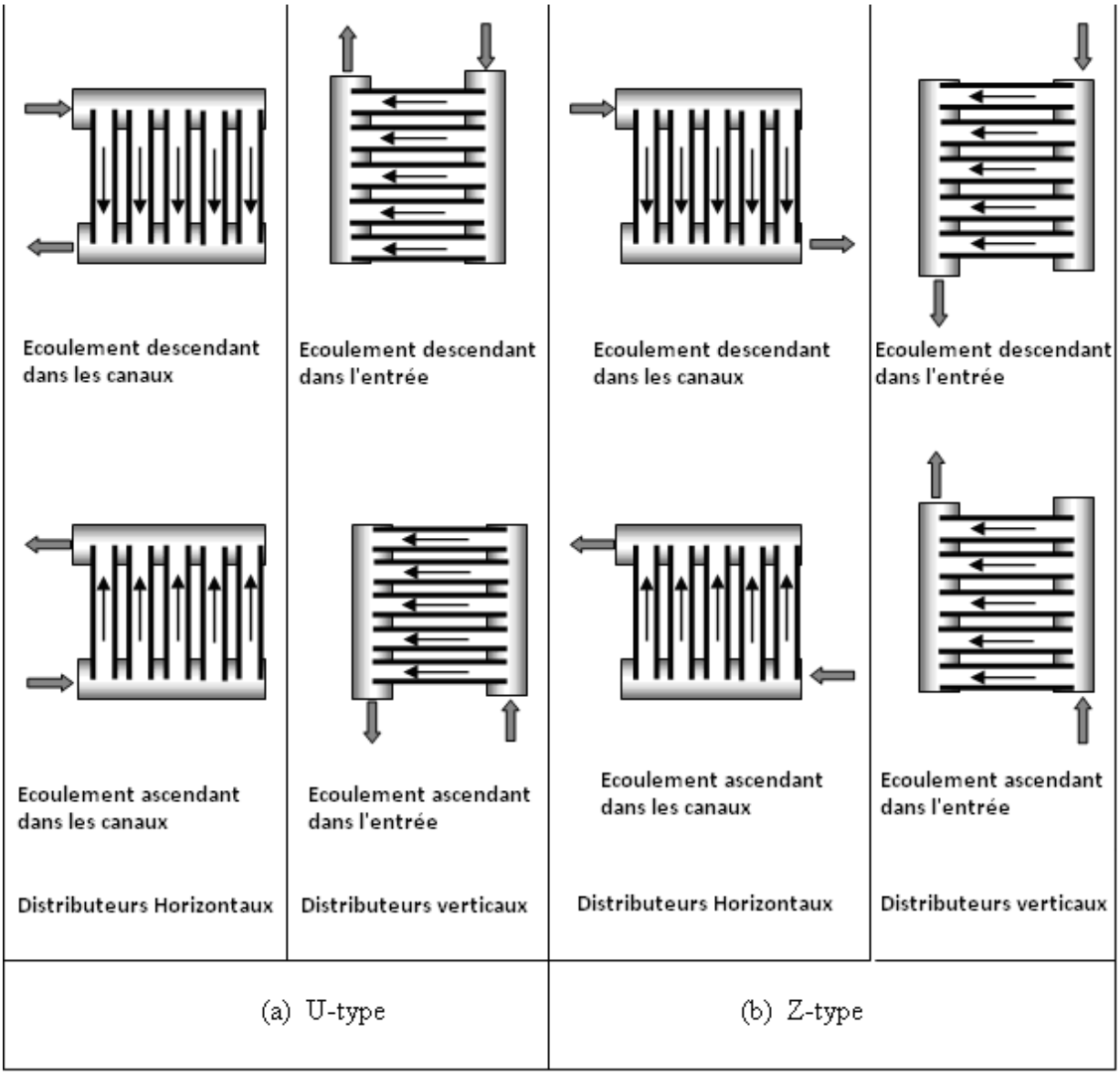


Figure I- 8 : Configurations d'échangeurs pour les échangeurs à multiples canaux.

Certains échangeurs peuvent être alimentés par un écoulement du réfrigérant perpendiculaire au distributeur ou avec un certain angle oblique. De telles situations seront prises en compte dans ce qui suit.

Dans de nombreux travaux expérimentaux, il est difficile de mesurer simultanément la phase liquide et la phase gazeuse dans les canaux ou encore dans le distributeur. Pour des soucis de mesure, la phase liquide doit être séparée de la vapeur ou du gaz avant le passage dans les débitmètres. Il est important de noter que, dans ce cas, le collecteur en sortie est supprimé afin d'être remplacé par un système de mesure du débit et de la pression. Les distributions dans un échangeur réel ne sont pas parfaitement reproduites ; de ce fait, plusieurs interprétations doivent être faites pour les adapter aux installations réelles. Une autre simplification consiste à utiliser un écoulement eau-air afin d'éviter le changement de phase et donc de faciliter les mesures de débits du liquide et du gaz. De ce fait, les expériences sur la distribution diphasique peuvent être séparées en deux catégories : avec et sans changement de phase.

2.1.2. Système eau-air

Un système complet permettant une alimentation en eau et en air est présentée sur la Figure I- 9. La section d'essais est détaillée sur la Figure I- 10.

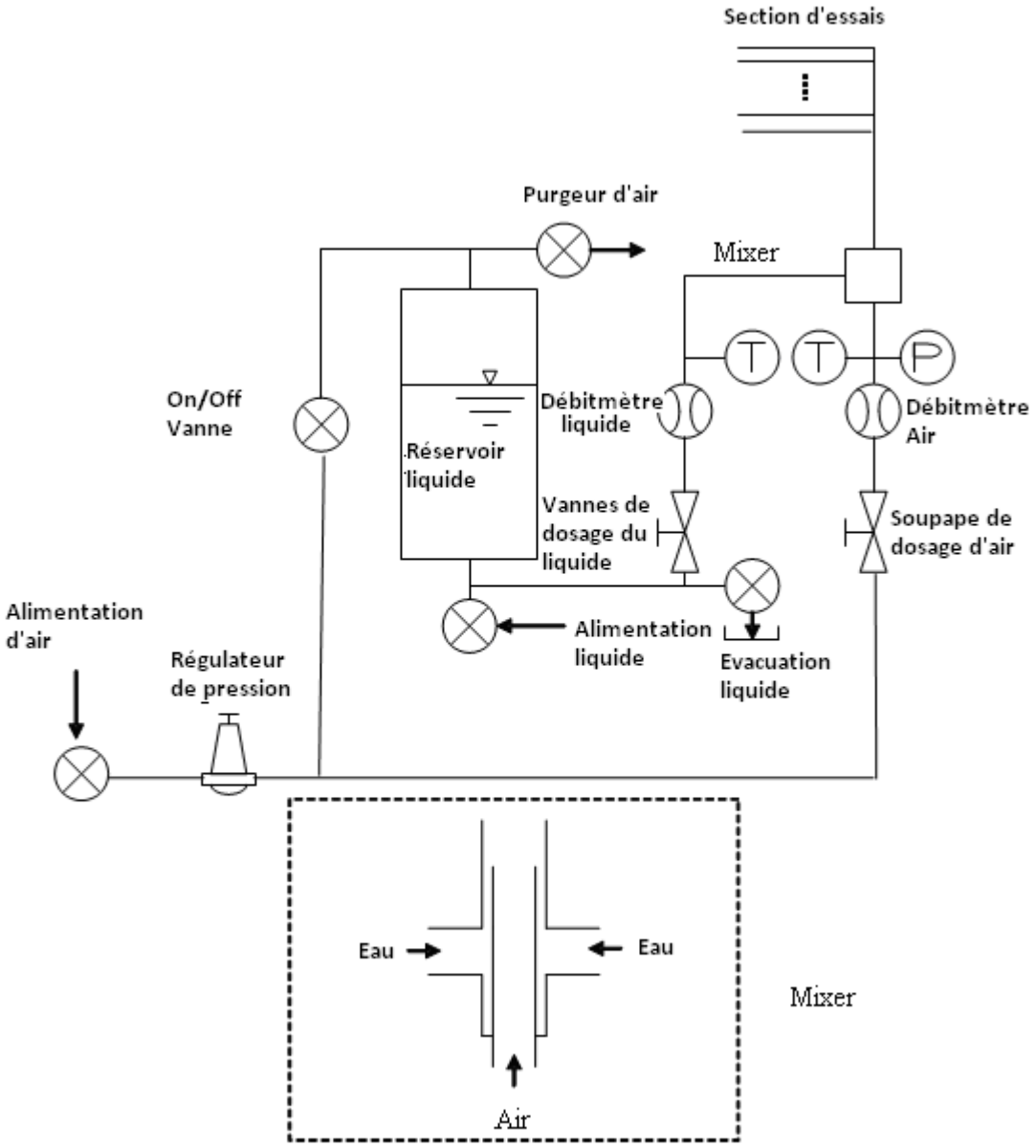


Figure I- 9 : Section d'essais pour des études sur la distribution en mélange eau-air, Lee [2009].

La solution souvent privilégiée pour quantifier la distribution consiste à mesurer le titre massique et le débit du fluide parcourant chaque canal. Un système de vannes permet de diriger le fluide afin d'en mesurer le débit liquide parcourant chaque canal.

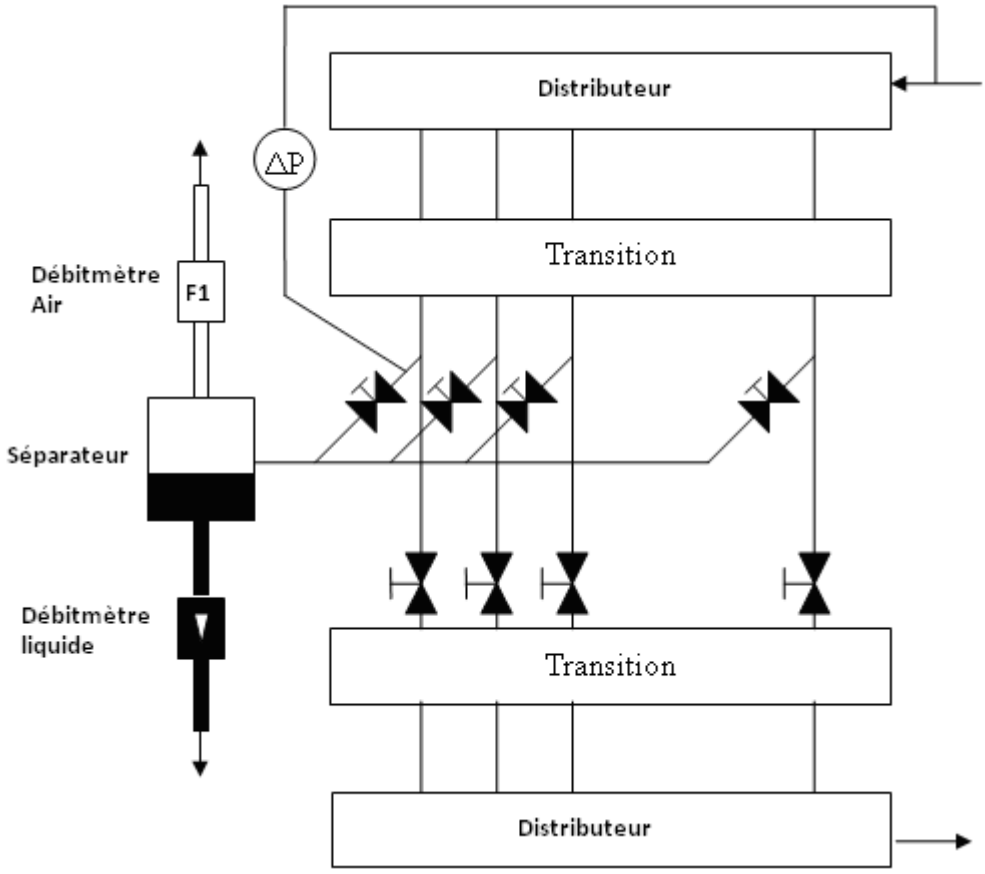


Figure I- 10 : Section d'essais (Kim et al. 2010).

2.1.3. Réfrigérants avec changement de phase.

Afin d'approcher les conditions réelles, des systèmes ont été développés pour contrôler le titre massique et le débit d'un réfrigérant à l'entrée du distributeur. Comme présenté sur la Figure I- 11, les principaux éléments de ces systèmes sont la section d'essais (évaporateur), une pompe et deux échangeurs : un condenseur et un préchauffeur. Le débit est commandé en by-passant une quantité appropriée de liquide de la pompe ou régulée directement en contrôlant la pompe. Le titre massique est géré par la régulation de la puissance fournie par le préchauffage.

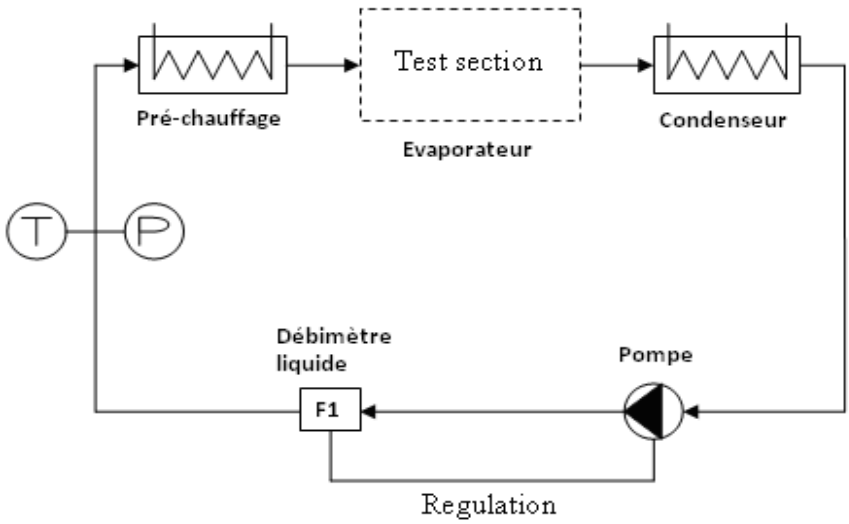


Figure I- 11 : Schéma de la boucle d'essais pour l'étude de la distribution d'un réfrigérant avec changement de phase.

Considérant les études sur la distribution, deux procédés de mesure sont utilisés. Dans la première section d'essais, présentée sur la Figure I- 12, la caractérisation du fluide traversant chaque canal est faite par condensation de la phase vapeur et par la mesure de la totalité du débit liquide dans des condenseurs. Le débit liquide est mesuré avec des débitmètres installés à la sortie de chaque condenseur. Ce type d'installation a été utilisé par **Bernoux et al. [2001]** pour étudier la distribution du R-113. Un distributeur cylindrique était connecté à huit canaux de section rectangulaire. Une section d'essais similaire a été par la suite utilisée par **Ahmad et al. [2009]** avec comme fluide le HFE-7100. **Poggi et al. [2007]** se sont basés sur ce protocole de mesure pour étudier également le HFE-7100. Dans la dernière étude, la section d'essais consistait en un distributeur cylindrique connecté à huit tubes plats composés de plusieurs canaux.

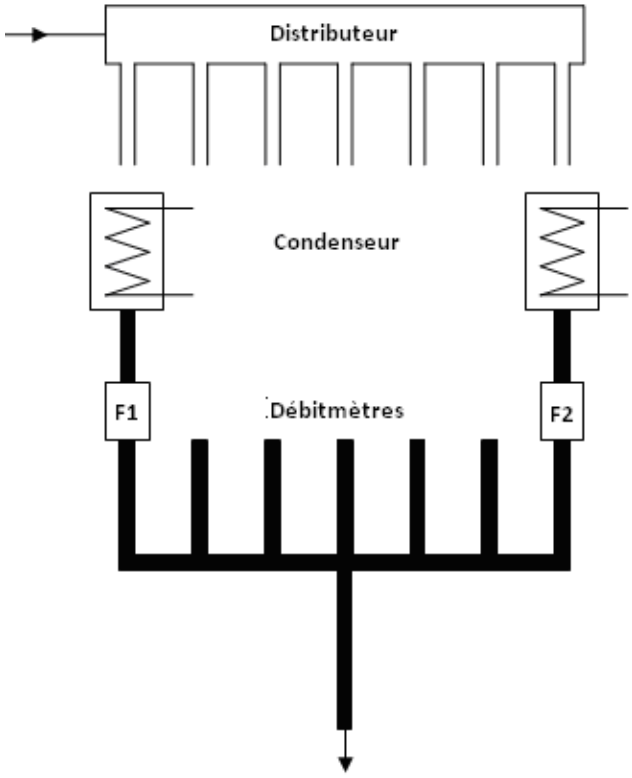


Figure I- 12 : Schéma de la section d'essais pour des mesures simultanées, Poggi et al. [2007].

Chacun des condenseurs étant thermiquement isolé la connaissance du débit et des températures d'entrée et de sortie des deux fluides permettait alors d'estimer le titre massique du fluide à la sortie des canaux par un bilan enthalpique.

Un autre système, permettant également de mesurer le débit et le titre dans chaque tube simultanément est présenté sur la Figure I- 13. Le fluide parcourant chaque tube entre dans un séparateur isolé thermiquement. De cette façon, la phase liquide et la phase gazeuse sont recueillies séparément avant de circuler à travers les débitmètres. Les débits et le titre massique de chaque tube sont alors bien connus. Un tel système nécessite d'avoir un séparateur, un débitmètre pour le liquide et un débitmètre pour le gaz pour chaque tube.

Dans leurs expériences, **Watanabe et al. [1995]** ont utilisé ce type d'installation pour qualifier la distribution du R-11. Ce protocole a également été utilisé par **Cho et Cho [2004, 2006**] pour étudier la distribution du R-22 entre quinze tubes plats. Afin d'éviter d'avoir trop de débitmètres, uniquement six lignes étaient équipées.

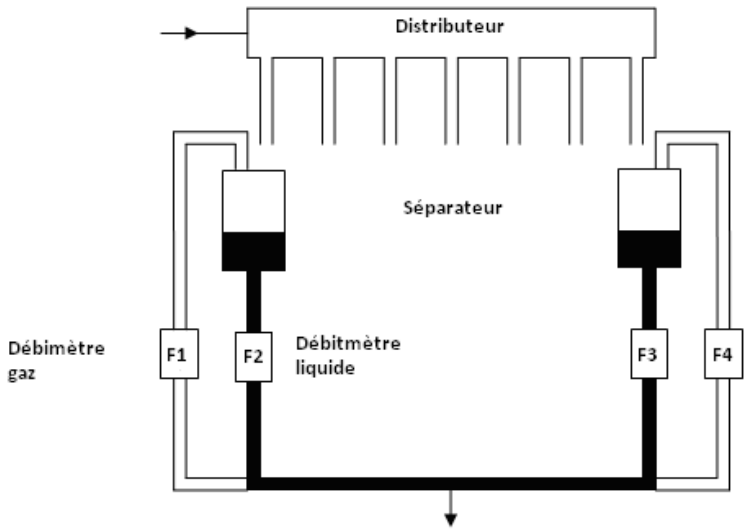


Figure I- 13 : Schéma de la section d'essais pour des mesures simultanées, Cho et Cho [2004, 2006].

Un tel système offre l'avantage de pouvoir mesurer le titre massique et les débits de l'échangeur entier en une seule fois. Cependant, l'absence de collecteur en sortie introduit une distribution de pression spécifique au niveau du distributeur, différente de celle rencontrée dans un échangeur réel.

La seconde section d'essais présentée sur la Figure I- 14, comprend seulement un débitmètre et un condenseur. Un système de vannes permet au fluide circulant dans un tube d'être collecté sans affecter les autres. Le fluide du canal choisi traverse alors un condenseur puis un débitmètre, le titre massique étant calculé par le biais d'un bilan enthalpique.

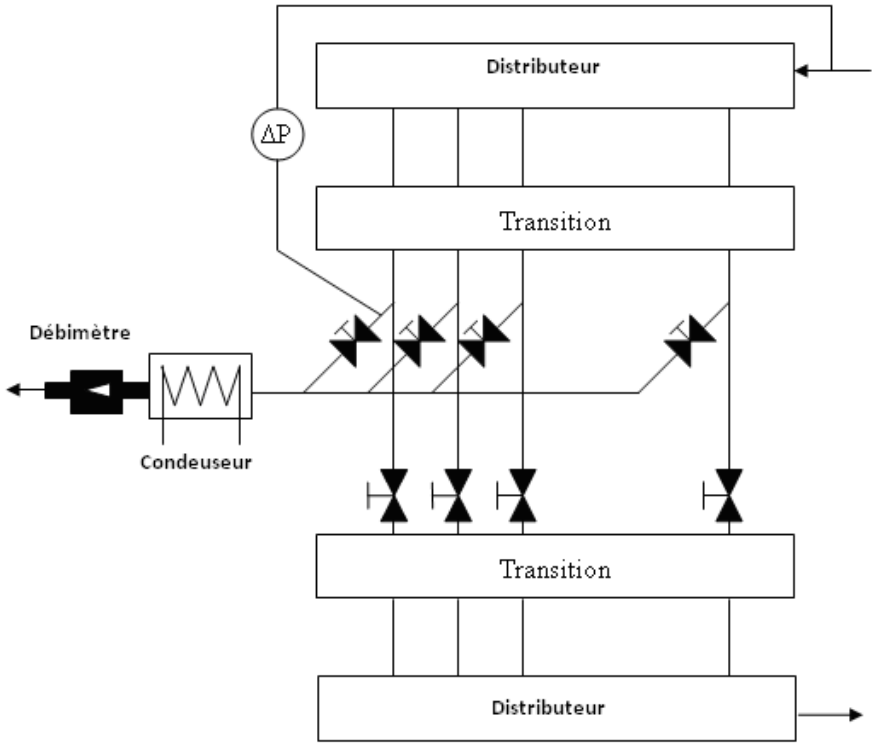


Figure I- 14 : Schéma de la section d'essais mesurant les canaux successivement, Kim et Sin [2006].

Cependant, changer le trajet du fluide change la pression de sortie et de ce fait, le débit mesuré. Il est alors nécessaire de s'assurer que le système de mesure n'affecte par la quantité à mesurer. La différence de pression entre l'entrée du distributeur et le tube étudié est initialement mesurée sans utiliser le système de mesure du débit. Pendant la mesure, la vanne localisée du côté du condenseur est ajustée afin de reproduire cette différence de pression. De cette façon, le débit est alors identique dans le tube étudié.

Ce type de montage a été utilisé par **Kim et Lee [2006]**, **Kim et al. [2007]**, **Kim et al. [2010]** et **Kim et Kim [2010]** pour caractériser la distribution du R-134a entre dix tubes plats multicanaux. **Hwang et al. [2007]** a utilisé une configuration similaire pour étudier la distribution du R-410A entre trente tubes multicanaux. Pour simplifier le montage, les tubes ont été assemblés par groupes de trois avant la première transition (Figure I- 14), la seconde a été supprimée.

Ce système offre plusieurs avantages par rapport au précédent. Premièrement, la présence d'un collecteur permet de se rapprocher d'une configuration réelle, mais également d'étudier l'influence des paramètres de sortie. Deuxièmement, la nécessité d'avoir seulement un condenseur et un débitmètre simplifie l'installation et permet d'étudier des échangeurs composés d'un plus grand nombre de canaux. Cependant, ce système devient complexe avec des tubes multicanaux. En effet, le by-pass nécessaire pour la mesure ne peut pas être fait avec des tubes multicanaux et le recours à des tubes cylindriques pour le by-pass et des vannes est alors requis.

3. Paramètres géométriques

Cette partie présente une vue d'ensemble des paramètres géométriques étudiés dans la littérature et décrit leurs effets sur la distribution. Les articles ont été regroupés en plusieurs parties suivant le paramètre étudié. Cependant, il n'est pas facile de choisir le meilleur paramètre d'intérêt et certains paragraphes peuvent donc se recouvrir. Pour simplifier, la forme du distributeur n'a pas été prise en compte, on a seulement indiqué lorsque celle-ci est différente d'une forme cylindrique.
Par la suite, la distribution diphasique est caractérisée par l'évolution des ratios le long des distributeurs :

-pour le débit liquide, le ratio $\alpha_{l,i} = \frac{\dot{m}_{l,i}}{\left(\dot{M}_l / N\right)}$, où $m_{l,i}$ est le débit massique dans le i^{th} canal et M_l le débit total de liquide à l'entrée du distributeur.

-pour le débit gazeux, le ratio $\alpha_{g,i} = \frac{\dot{m}_{g,i}}{\left(\dot{M}_g / N\right)}$, où $m_{g,i}$ est le débit massique dans le i^{th} canal et M_g le débit total de gaz à l'entrée du distributeur.

3.1 Le tube d'entrée précédant le distributeur

3.1.1. Orientation et emplacement

La distribution d'un fluide diphasique dans le distributeur est hautement dépendante de la connexion du tube d'entrée. **Cho et Cho [2004, 2006]** ont étudié expérimentalement la distribution diphasique du R22 avec trois configurations présentées sur la Figure I- 15. La section d'essais était un distributeur cylindrique avec quinze tubes multicanaux. Deux orientations de distributeur ont été testées : vertical et horizontal avec canaux verticaux

Pour les distributeurs verticaux ayant une entrée perpendiculaire aux canaux (configuration a), la phase liquide dans les canaux décroît le long du distributeur. Pour les deux autres configurations, la phase liquide s'accumule au fond du distributeur et alimente principalement les premiers canaux. Une forte alimentation est également observée pour les canaux faisant face à l'entrée située au milieu du distributeur. Pour les trois configurations, le débit de gaz augmente le long du distributeur.

Concernant les distributeurs horizontaux, avec une entrée perpendiculaire aux canaux (a), le liquide est principalement réparti dans les premiers canaux. Considérant une entrée parallèle aux canaux, le jet de liquide impacte sur la paroi intérieure et est divisé de manière symétrique entre les deux côtés du distributeur. Les mesures montrent que le débit de liquide diminue des deux côtés de l'entrée à la fin du distributeur. La configuration inclinée permet une distribution similaire, bien qu'elle soit légèrement modifiée par l'orientation. La phase gazeuse suit la même tendance que la phase liquide pour les trois configurations.

Les auteurs ont conclu que quelle que soit la configuration du distributeur, les meilleurs résultats sont obtenus avec l'entrée parallèle aux canaux. Cette configuration profite de la vitesse initiale du fluide entrant dans le distributeur.

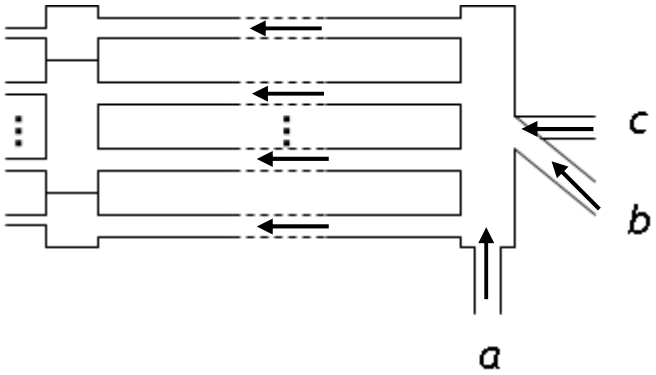


Figure I- 15 : Entrées du distributeur : perpendiculaire aux canaux (a), inclinée (b) et parallèle aux canaux (c).

Une étude similaire a été menée par **Hwang et al. [2007]** pour un distributeur horizontal et des tubes multicanaux en écoulement ascendant. Ils ont comparé deux configurations d'entrée différentes, similaires aux cas (a) et (c), et deux réfrigérants : R-410A et R-134a. Pour une entrée perpendiculaire aux canaux, le liquide est distribué d'une manière uniforme dans une majeure partie du distributeur, excepté les premiers canaux qui sont faiblement alimentés. En considérant la seconde configuration, les résultats concordent avec ceux de **Cho et Cho [2004, 2006]**, à savoir une distribution symétrique, avec cette fois une augmentation de l'alimentation dans les canaux proches de l'extrémité du distributeur. Cette différence est liée à l'orientation des canaux et de ce fait à l'influence de la gravité.

La phase gazeuse suit une tendance opposée à celle de la phase liquide pour les deux configurations. Encore une fois, les résultats montrent une meilleure distribution pour une entrée parallèle aux canaux.

Li et al. [2010] ont récemment analysé la distribution de l'air et de l'eau pour un distributeur cylindrique horizontal connecté à des canaux cylindriques verticaux en écoulement descendant avec deux orientations d'entrée et quatre configurations possibles. Celles-ci sont présentées sur la Figure I- 16. Les configurations notées 2-1 et 2-2 permettent une répartition du liquide décroissante le long du distributeur. Les configurations 2-3 et 2-4 donnent lieu à une distribution caractérisée par une symétrie au milieu du distributeur. Une meilleure distribution est obtenue pour un tube d'entrée au milieu du distributeur, notamment pour la configuration 2-3. Les auteurs ont également étudié l'effet de la variation du diamètre des canaux le long du distributeur, mais la configuration 2-2 ne montre aucune influence majeure.

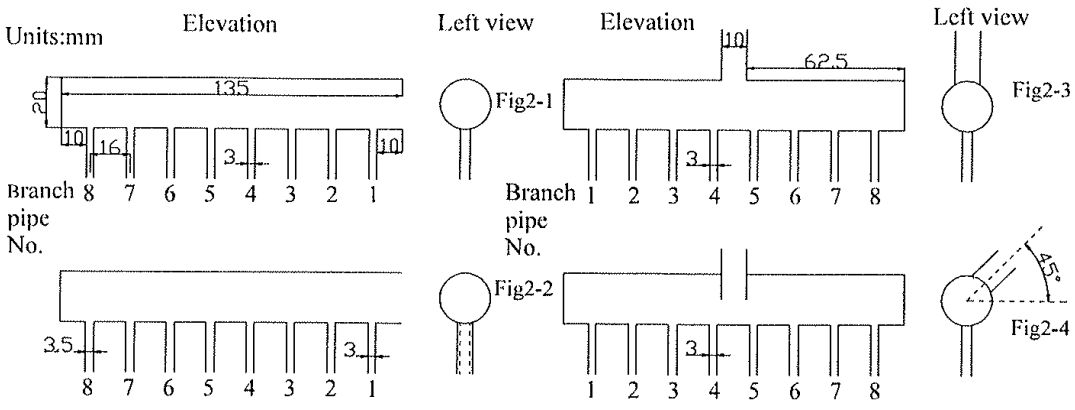


Figure I- 16 : Configurations pour l'entré et sortie des canaux, Li et al. [2010].

Finalement, **Kim et al. [2008, 2010]** ont étudié l'effet de trois configuration d'entrées et de sorties sur la distribution du mélange eau-air et du R-134a. Les trois configurations sont présentées sur la Figure I- 17. L'échangeur était composé d'un distributeur cylindrique horizontal et de dix tubes multicanaux en écoulement descendant.

Avec le mélange eau-air, ces auteurs ont étudié l'influence de la profondeur d'insertion des canaux dans le distributeur. Pour la configuration sans insertion et avec une entrée parallèle au distributeur, l'eau alimente principalement les premiers canaux. Pour l'entrée inclinée, l'eau impacte la paroi du distributeur et est alors dirigée vers le fond. La conséquence est donc une forte alimentation des premiers et derniers canaux au dépend de ceux du milieu. Pour l'entrée verticale, l'eau se heurte à la partie inférieure du distributeur et est alors contrainte d'aller directement dans ces canaux faisant face. Comparé à la configuration normale, moins d'eau approvisionne les derniers canaux mais plus pour les premiers, ceux du milieu étant encore sous alimentés. La distribution de l'air est opposée à celle de l'eau, bien que la différence soit beaucoup moins significative pour celle-ci.

Avec une intrusion des canaux jusqu'au milieu du distributeur et avec une configuration parallèle, l'eau se heurte au premier canal et la quantité qui ne pénètre pas dans les premiers canaux est envoyée vers le fond du distributeur. Une faible quantité de liquide qui by-pass le premier tube se heurte alors au second tube et se comporte de la même façon que pour le premier. Ce phénomène continue de tube en tube jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'eau disponible pour une séparation. La distribution obtenue présente une forte alimentation des premiers et derniers canaux. Pour les configurations normale et verticale, l'eau impacte les premiers tubes, comme pour la configuration parallèle, mais la quantité d'eau séparée est plus faible. La conséquence est alors une alimentation moins importante des premiers canaux au bénéfice de ceux du milieu. La distribution de l'air est opposée à celle de l'eau. Les résultats montrent qu'une meilleure distribution est obtenue pour la configuration verticale, la configuration normale permettant cependant une meilleure distribution que la configuration parallèle.

Pour le R134a, uniquement la configuration sans intrusion a été étudiée. Quelle que soit l'orientation de l'entrée, les premiers canaux sont fortement alimentés en liquide. L'effet se révèle être plus important pour une entrée parallèle que pour les deux autres configurations, avec quasiment aucune alimentation liquide après le sixième canal. Pour l'entrée normale et verticale, le liquide heurte la paroi et le fond du distributeur respectivement, forçant le liquide à un écoulement descendant. Bien que la première moitié du distributeur soit suralimentée, le liquide se réparti dans le distributeur et une petite quantité du liquide alimente les derniers canaux. La distribution gazeuse est généralement inverse à celle du liquide. Les auteurs ont conclu que la meilleure distribution est alors obtenue avec la configuration normale et verticale, l'entrée normale permettant des résultats légèrement meilleurs.

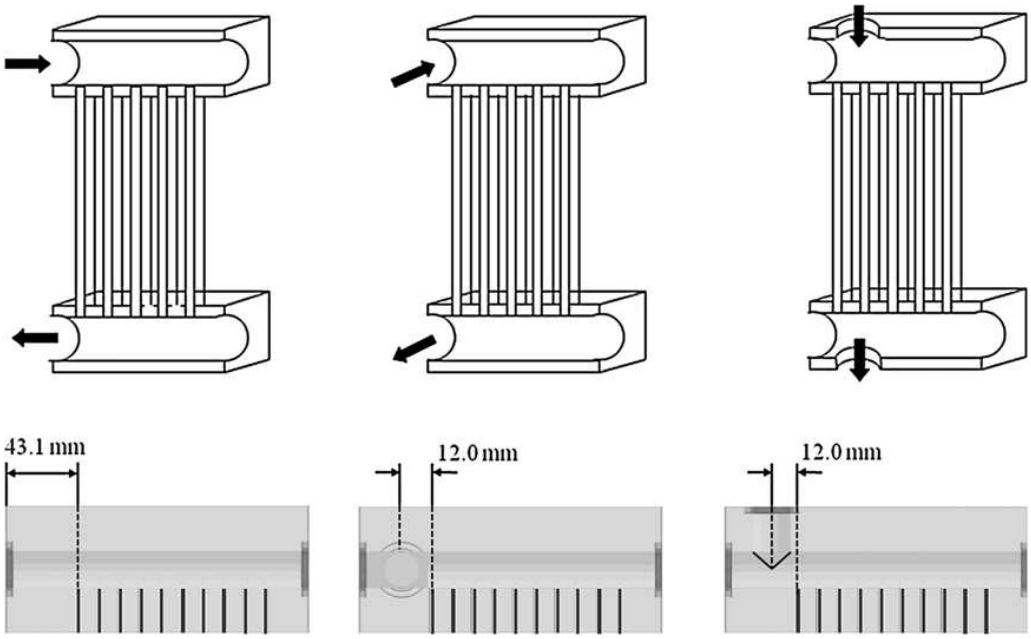


Figure I- 17 : Trois configurations d'entrée et de sortie, parallèle, normale et verticale, Kim et al. [2010].

L'effet de l'orientation du tube d'entrée a donc été étudié par de nombreux auteurs, avec différents fluides et géométrie pour plusieurs orientations. Dans chaque cas, les meilleurs résultats sont obtenus avec l'entrée parallèle aux canaux. Cette configuration diminue l'effet d'hétérogénéité causée par le placement de l'entrée, notamment pour les distributeurs horizontaux. Il a été noté que la plupart des échangeurs micro canaux utilisés dans la climatisation, sont conçus avec une entrée parallèle aux canaux.

3.1.2. Longueur

La longueur du tube d'entrée peut influencer le régime d'écoulement dans le distributeur. **Vist et Pettersen [2004]** ont étudié son influence sur la distribution diphasique de R-134a dans un échangeur de chaleur compact. La section d'essais consistait en un distributeur cylindrique avec dix canaux cylindriques. Deux longueurs d'entrée ont été testées, 250 et 55mm pour un distributeur horizontal et des canaux verticaux ascendant. Une meilleure distribution est obtenue avec l'entrée la plus courte. Une explication possible est que, dans ce cas, le fluide n'a pas assez de temps pour atteindre un régime d'écoulement stable. De ce fait, la distribution est améliorée puisque les deux phases sont encore mélangées. Les auteurs ont alors conclu que la distribution est fortement liée au régime d'écoulement à l'entrée du distributeur.

3.1.3. Diamètre du tube d'entrée et du distributeur

Des auteurs ont étudié l'influence du rapport entre le diamètre du tube d'entrée et celui du distributeur sur la distribution diphasique.

Bernoux [2001] a analysé l'influence du diamètre du tube d'entrée, en utilisant une section d'essais composée d'un distributeur cylindrique horizontal associé à huit canaux rectangulaires verticaux en écoulement descendant. Le fluide utilisé était du R-113. Les résultats ont montré une très mauvaise distribution lorsque le diamètre du tube d'entrée est égal à celui du distributeur, donnant lieu à un écoulement stratifié qui alimente alors préférentiellement les premiers canaux en liquide. L'utilisation d'un tube d'entrée avec un diamètre plus petit, améliore la distribution diphasique. Cela provoque un écoulement à bouchons voire annulaire dans le tube d'entrée dû aux

plus grandes vitesses du liquide et du gaz et du jet liquide formé à l'entrée du distributeur. L'impact au fond du distributeur augmente encore la dispersion de l'écoulement.

Une autre approche, combinant un tube d'entrée avec un diamètre constant et différents diamètres pour le distributeur a été considérée par **Ahmad et al. [2009]**. La section d'essais était similaire à celle utilisée par **Bernoux [2001]**, mais avec du HFE-7100 comme fluide. Trois diamètres de distributeur ont été étudiés : 50, 30 et 17,3 mm avec un diamètre de tube d'entrée égal à 17,3 mm. Avec le distributeur de plus grand diamètre, un jet liquide se forme à son entrée, se heurtant à son fond, notamment pour les débits les plus importants (Figure I- 18). Les résultats montrent que la diminution du diamètre du distributeur minimise le retour du fluide après son impact et diminue la dispersion de celui-ci. Lorsque les deux diamètres sont égaux, la structure de l'écoulement est totalement changée, causant un changement d'une structure en jet à une structure stratifiée. La distribution est alors détériorée. Les premiers canaux sont fortement alimentés en liquide. La phase gazeuse suit la tendance opposée, alimentant plus les derniers canaux. Les régimes d'écoulements sont présentés sur la Figure I- 18.

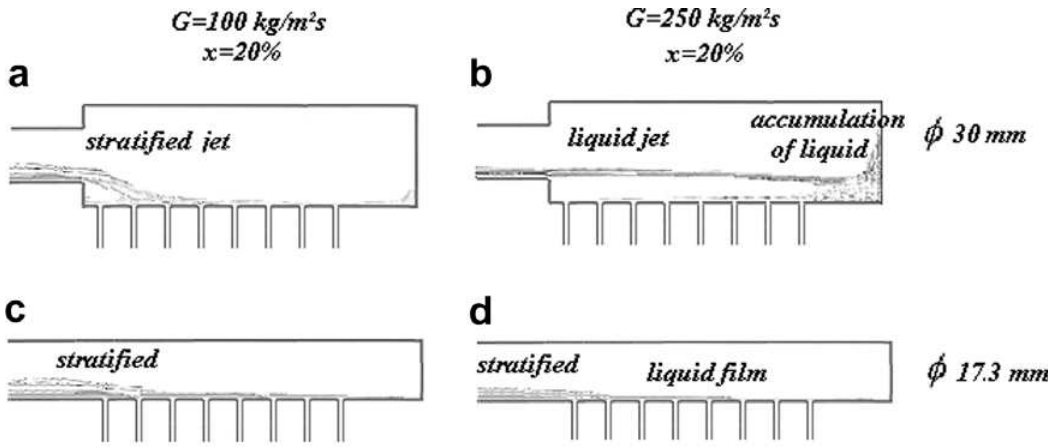


Figure I- 18 : Schéma des écoulements en fonction du diamètre du distributeur, Ahmad et al. [2009].

Finalement, une troisième approche par **Vist et Petterson [2004]** a été envisagée, consistant à utiliser deux ensembles de tube d'entrée et de distributeur possédant le même diamètre. Deux diamètres différents ont été testés : 8 et 16 mm. Ils ont étudié l'influence de ces paramètres sur la distribution d'un mélange eau-air pour un distributeur horizontal avec des canaux verticaux, l'écoulement pouvant être ascendant ou descendant. La phase gazeuse présente une meilleure distribution pour le plus petit diamètre et également pour les débits importants. En ce qui concerne la phase liquide, aucune différence notable n'a été observée.

Pour la géométrie étudiée, à savoir une entrée parallèle aux canaux, augmenter le diamètre du distributeur, ou alors diminuer le diamètre du tube d'entrée, provoque la formation d'un jet à l'entrée du distributeur, ce qui améliore la distribution. D'un autre côté, une faible différence a été observée pour la distribution diphasique dans un distributeur ayant le même diamètre que l'entrée, pour deux ensembles de diamètres.

3.2 Distributeur

3.2.1. Longueur du distributeur ou nombre de canaux.

Les sections d'essais généralement développées sont composées d'une entrée de faible longueur avec un distributeur connecté à cinq à trente canaux. Les vrais échangeurs de chaleur peuvent

contenir jusqu'à des centaines et parfois des milliers de canaux, conduisant à des distributeurs plus longs. Etudier l'effet du changement du nombre de canaux à l'aide d'un modèle, permet d'avoir une première approche du comportement du fluide dans un échangeur réel.

Une première étude a été menée par **Bernoux et al. [2001]**, la section d'essais permettant de d'alimenter de huit à quatre canaux, comme exposé sur la Figure I- 19. Avec la diminution du nombre de canaux, l'hétérogénéité de la distribution est réduite, les premiers canaux étant moins suralimentés, et les derniers moins sous-alimentés.

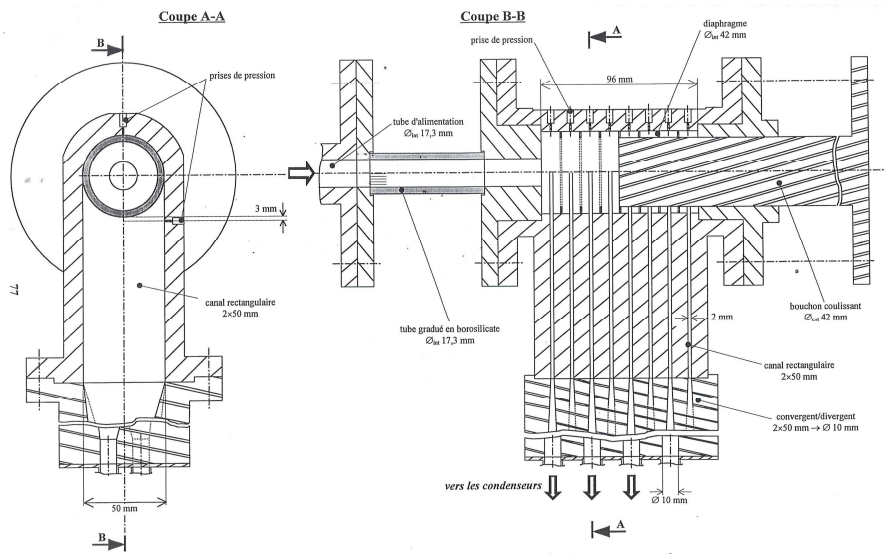


Figure I- 19 : Schéma du dispositif utilisé pour changer le nombre de canaux, Bernoux et al. [2001].

Une approche similaire a été développée par **Hwang et al. [2007]**, consistant à réduire le nombre de tubes multicanaux de trente à huit. Deux placements d'entrées ont été testés, parallèle et perpendiculaire aux canaux. Les résultats ont montré une faible influence du nombre de canaux sur la distribution.

Le même protocole a été développé par **Kim et Han [2007]**, qui ont continué le travail de **Kim et Sin [2006]**, avec un nombre de tube multicanaux réduit de trente à dix. Le diamètre du distributeur et la distance entre les canaux n'ont pas été changés. Un mélange eau-air a été utilisé comme fluide. Pour un distributeur horizontal et des canaux verticaux avec des écoulements aussi bien ascendants que descendants, la tendance générale de la distribution n'a pas été affectée par ce changement du nombre de canaux. Un effet apparait en considérant la différence entre le débit liquide reçu par les canaux suralimentés et ceux sous-alimentés. Cette différence est plus petite pour un nombre de canaux plus faible, la distribution étant ainsi plus uniforme. Un phénomène similaire a été observé pour la distribution de l'air et conduit à la même conclusion. L'effet de plusieurs paramètres tels que le débit massique, le titre massique, ou encore la profondeur de pénétration des canaux a également été observé et apparait plus prononcé avec trente canaux.

Les résultats obtenus par **Hwang et al. [2007]** ainsi que **Kim et Han [2007]** ont révélé des tendances contradictoires. Deux différences peuvent expliquer ceci. Premièrement, les résultats présentés par **Kim et Han [2007]** correspondent à une vitesse massique de 100 kg/m^2.s, tandis que les résultats de **Hwang et al. [2007]** sont pour une vitesse massique de 194 kg/m^2.s. La seconde différence qui est mieux à même d'expliquer le comportement observé, est le fluide utilisé pour les tests. En effet, **Kim et Han [2007]** ont travaillé avec un mélange eau-air, alors que **Hwang et al. [2007]** ont travaillé avec du R-410A.

En considérant les résultats obtenus avec les canaux verticaux en écoulements ascendants, insérés jusqu'au milieu du distributeur, **Kim et Han [2007]** ont observé qu'une grande partie de l'eau alimentait les canaux du fond. Pour la même configuration, **Hwang et al. [2007]** ont observé une augmentation de l'alimentation dans les premiers canaux, qui sont sous-alimentés, jusqu'à un plateau, le liquide étant uniformément distribué dans une grande partie du distributeur. La différence entre les deux fluides peut être responsable des comportements en contradiction. Des problèmes liés aux propriétés différentes entre le mélange eau-air et le réfrigérant diphasique et leur impact sur les résultats expérimentaux ont été étudiés par **Kim et Kim [2010]** ainsi que **Leblay et al. [2010]**.

3.2.2. Espacement entre canaux

Quelques auteurs ont examiné l'influence de la distance qui sépare les tubes entre eux sur la distribution. **Hwang et al. [2007]** ont testé trois espacements pour trente canaux avec le même distributeur. Avec la plus grande distance entre les canaux, la distribution présente une forme « d'escalier » plus prononcée. Néanmoins, les distributions liquide et gazeuse ne sont que très peu affectées par la variation de l'espacement, quelle que soit la position de l'entrée.

Pour éviter toute interaction avec un autre phénomène et afin de pouvoir étudier spécifiquement l'influence de l'espacement, **Lee [2009]** a développé une section d'essais composée d'un distributeur vertical de section droite carrée en écoulement ascendant avec deux canaux horizontaux. Deux espacements ont été testés : 9 et 49 mm. Avec l'espacement le plus faible, le second canal reçoit moins de liquide que le premier. Comme montré sur la Figure I- 20, l'espace entre les deux canaux est insuffisant pour redistribuer le film liquide perturbé par le premier canal. L'effet reste le même pour différents débits et la gamme de titre massique de vapeur utilisés dans les expériences.

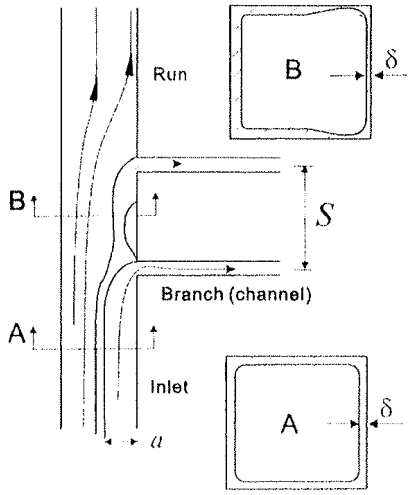


Figure I- 20 : Schéma des deux sections, avant et après le premier canal, Lee [2009].

Récemment, **Lee [2010]** a testé l'influence de ce paramètre avec la même configuration mais cette fois avec six canaux. Deux distances entre les canaux ont été testées : 10 et 21,6 mm. L'auteur a noté que la distribution était relativement insensible à l'espacement entre les canaux, la configuration de l'écoulement dans le distributeur restant quasiment inchangée. La distribution est donc par conséquent, faiblement affectée.

La distance entre les canaux a donc un effet sur la distribution mais les deux auteurs montrent que l'influence de ce paramètre est faible dans les situations étudiées.

3.2.3. Profondeur d'intrusion des canaux

Un autre paramètre largement étudié dans la littérature et spécifique aux échangeurs de chaleur à micro canaux est la profondeur d'insertion des canaux. En effet, l'intrusion des tubes multicanaux, qui à l'origine était simplement un artifice pour simplifier l'assemblage de ces échangeurs, constitue une série d'obstacles qui peuvent modifier le comportement de l'écoulement diphasique.

Les premiers auteurs qui ont analysé ce paramètre pour une distribution diphasique sont **Horiki et Osakabe [1999]** et **Osakabe et al. [1999]**. Ils ont mené des expériences sur une section d'essais composée d'un distributeur cylindrique connecté à quatre canaux cylindriques. Le fluide utilisé était de l'eau, dans laquelle des bulles d'air ont été introduites et dont la quantité augmentait graduellement. Ils ont étudié l'influence de la vitesse de la phase liquide et la profondeur d'intrusion des canaux sur la distribution. Leurs résultats ont montré que l'intrusion des canaux jusqu'au milieu du distributeur améliore significativement la distribution liquide. Aucune information n'est donnée sur la distribution de la phase gazeuse.

Ensuite, les travaux de **Lee et Lee [2004]** et **Lee [2010]** ont eu pour but d'examiner la distribution d'un mélange eau-air dans un distributeur rectangulaire connecté à six tubes, présentés sur la Figure I- 21. La profondeur d'intrusion est définie en tant que ratio de la profondeur de pénétration h dans le distributeur de diamètre D. Plusieurs profondeurs ont alors été testées : h/D=0, 1/8, 1/4, et 1/2. L'influence du débit et du titre massique à l'entrée du distributeur a également été observée.
Pour les configurations où il n'y a pas d'intrusion des canaux, les premiers canaux sont suralimentés et les derniers sous-alimentés. Cette tendance s'inverse en augmentant la profondeur d'intrusion. En effet, l'intrusion des canaux force le liquide à alimenter les derniers canaux aux dépens des premiers. Un changement de configuration de l'écoulement s'effectue, en passant d'un écoulement annulaire à une configuration complexe dont la pénétration des canaux semble être responsable. Les auteurs ont observé que pour un débit donné, la profondeur d'insertion pouvait être ajustée afin d'améliorer la distribution. Comme montré sur la Figure I- 21, l'intrusion des canaux dans le distributeur perturbe fortement l'écoulement et provoque un mélange des deux phases. En conséquence, l'influence du débit et du titre massique sur la distribution, diminue lorsque la profondeur d'intrusion augmente.

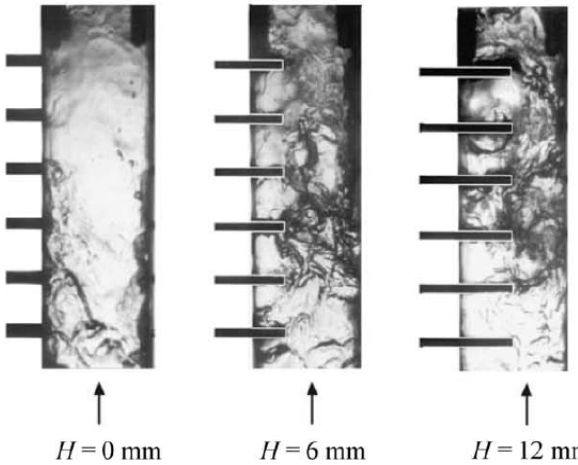


Figure I- 21 : Effet de la profondeur d'intrusion sur la distribution, Lee et Lee [2004].

Des études similaires ont été menées par **Kim et Sin [2006]** et **Kim et Han [2008]** pour un distributeur horizontal circulaire avec respectivement trente et dix tubes multicanaux. Le mélange eau-air a été utilisé comme fluide. Différentes profondeurs d'intrusion ont été testés avec des débits

ascendant et descendant dans les canaux : h/D = 0, 1/4, et 1/2. Les tendances observées sont les mêmes que cela soit avec trente ou dix tubes multicanaux.

Deux sens d'écoulements ont été testés : descendants et ascendants. Pour l'écoulement descendant, la distribution est fortement affectée par l'intrusion des canaux. Plus cette intrusion est importante, plus le liquide alimente les derniers canaux aux dépens des premiers. La phase gazeuse est pratiquement uniformément répartie avec aucune intrusion. Cependant lorsqu'il y a une intrusion des canaux, le gaz alimente préférentiellement les premiers canaux au dépend des derniers. Pour comprendre cela, il faut analyser l'influence de la pénétration des canaux dans le distributeur sur la configuration de l'écoulement. Une partie de l'eau entrant dans le distributeur se heurte au premier canal ; l'écoulement est alors divisé, une petite partie entre dans ce premier canal et le reste est projeté vers l'extrémité du distributeur. Le même effet se répète de canal en canal jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de liquide. La distance de projection dépend du débit, du titre massique et également de la profondeur d'intrusion. Les pertes de pression augmentent si l'un des paramètres augmente. Avec aucune pénétration, le débit et le titre massique ne changent pas significativement la distribution.
Pour les canaux avec écoulements ascendants sans pénétration, la phase liquide alimente principalement les derniers canaux et peu les premiers. La phase gazeuse est assez bien distribuée. Le liquide alimente d'autant plus les derniers canaux que la profondeur de pénétration augmente.
Les résultats de **Kim et Han [2008]** avec le mélange eau-air ont été comparés à ceux de **Kim et Kim [2010]** pour la même section d'essais, en étudiant les mêmes paramètres mais avec du R-134a diphasique. Ils ont remarqué des différences au niveau du comportement des deux fluides. Le rapport des densités entre le liquide et la vapeur du R-134a est approximativement neuf fois plus important que pour le mélange eau-air. Cette différence semble donner lieu à des régimes d'écoulements différents, l'écoulement à l'entrée étant stratifié pour le réfrigérant et annulaire pour le mélange eau-air. Les auteurs ont observé que l'effet de la profondeur d'insertion était plus important pour un régime annulaire, lié vraisemblablement à une vitesse de gaz plus importante. De plus, une meilleure distribution liquide est obtenue pour un écoulement stratifié que pour un écoulement annulaire.

Le même paramètre a été étudié par **Webb et Chung [2004]** pour un distributeur horizontal connecté à vingt tubes multicanaux à écoulement descendant avec du R-404A comme fluide. Avec aucune pénétration, le liquide alimente principalement les premiers canaux et cette alimentation diminue le long du distributeur. Pour un titre massique faible (x=0,3), la distribution est améliorée avec l'augmentation de la profondeur d'intrusion. Pour des titres plus élevés (x=0,8), l'influence de l'intrusion dépend de sa valeur. Par exemple, une pénétration de 10 mm permet une meilleure distribution que pour 0 mm et également que pour 20 mm.
Une autre possibilité examinée par **Koyama et al. [2006]** consiste à faire varier la profondeur de l'intrusion le long du distributeur. Deux sections d'essais ont été assemblées, chacune composée d'un distributeur cylindrique horizontal connecté à six tubes multicanaux et avec comme fluide de travail, le R-134a. Pour la première section d'essais, la profondeur d'intrusion correspondait à h/D=1/2. Pour la seconde, la valeur était de h/D=0,675 pour les trois premiers tubes et de 0 pour les trois suivants. Le critère alors étudié étant l'influence de la profondeur d'intrusion et du titre massique sur la distribution diphasique et sur les pertes de pressions le long du distributeur (où est le verbe ?). Des pertes de pressions similaires ont été observées pour les deux sections d'essais, mais la distribution était légèrement meilleure pour le second échangeur (celui avec différentes profondeurs d'intrusion).
Aucune conclusion générale ne peut être faite concernant l'influence de la profondeur d'intrusion sur la distribution. Cela dépend de paramètres tels que l'orientation, le titre massique ou le débit. La pénétration des canaux peut améliorer comme détériorer la distribution.

4. Effets de l'orientation et des caractéristiques de l'écoulement

L'orientation du distributeur et des canaux peut avoir un effet significatif sur la distribution. L'influence du titre massique, du débit et de la profondeur d'intrusion a été étudiée pour deux configurations principales: avec un distributeur vertical (écoulement ascendant et descendant) avec des canaux horizontaux, et avec un distributeur horizontal et des canaux verticaux (écoulement ascendant, descendant et oblique).

Pour caractériser les effets des différents paramètres sur la distribution, des graphiques particuliers ont été définis. Une échelle spéciale est utilisée dans les figures présentant la distribution liquide ou gazeuse. Sur l'axe des ordonnées, c'est le ratio massique du liquide ou du gaz qui est choisi. Ce paramètre indique la proportion du débit massique de la phase dans le canal, comparé à un débit correspondant à une distribution parfaitement homogène. L'axe des abscisses est séparé en trois parties qui correspondent à trois parties distinctes du distributeur. Ces parties ne sont pas forcément de taille identique. La partie du milieu peut être plus importante que les autres. La première partie correspond à la partie proche de l'entrée, la deuxième aux canaux du milieu et enfin la troisième correspond aux canaux situés à la fin du distributeur. Dans chaque partie, la valeur représentée correspond à la moyenne arithmétique des ratios obtenus.

4.1 Distributeur vertical

La distribution diphasique est fortement influencée par la gravité ; l'écoulement ascendant et descendant peuvent avoir des comportements totalement différents et sont donc étudiés séparément.

4.1.1. Distributeur avec écoulement ascendant

Lee [2009] a étudié un distributeur vertical avec écoulement ascendant. La Figure I- 22 est une visualisation du comportement de l'écoulement dans le distributeur associée avec une représentation de la configuration de l'écoulement. Celui-ci peut être séparé en trois zones : A, B et C. Dans la partie A, la quantité de liquide diminue le long du distributeur. Dans la dernière région, notée C, une recirculation apparait due à l'extrémité du distributeur ; la conséquence est une faible diminution du débit liquide dans les canaux le long du distributeur. Entre les deux zones, la phase liquide alimente les canaux dans une direction opposée à l'écoulement de l'entrée. Ce phénomène est provoqué par les effets combinés de l'écoulement provenant de la zone A et la recirculation de la zone C. Une tendance opposée est observée pour la phase gazeuse, mais avec une ampleur moindre. Cette configuration d'écoulement est observée, quel que soit le débit de liquide et est spécifique à cette configuration de distributeur.
Ces trois régions peuvent être assimilées aux trois parties du distributeur qui sont définies dans l'introduction de cette partie. et qui permet de tracer les différents graphiques de cette partie.

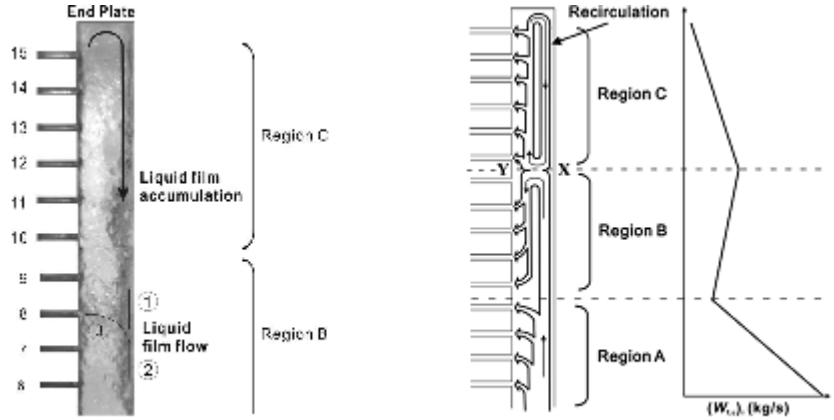


Figure I- 22 : Configuration d'écoulement de chaque zone, Lee [2009].

4.1.1.1. Titre massique

Le titre massique utilisé dans cette partie est le titre massique à l'entrée du distributeur. L'effet de ce paramètre sur la distribution liquide est présenté sur la Figure I- 23. Généralement, dans la première partie du distributeur, le débit de liquide dans les canaux augmente avec le titre massique. Dans la zone du milieu, l'influence du titre n'est pas significative pour **Lee [2009]**, alors qu'une augmentation est observée pour **Lee et Lee [2004]**. Le fond du distributeur montre deux tendances opposées : la distribution liquide est détériorée avec l'augmentation du titre massique pour **Lee et Lee [2004]** alors qu'elle est constante pour **Lee [2009]**. Ces effets peuvent être expliqués par la quantité de mouvement du fluide. Pour des titres plus importants, avec un débit massique constant, la quantité de mouvement du fluide est plus faible et la phase liquide est donc moins poussée vers la fin du distributeur. La différence entre les deux auteurs peut s'expliquer par une différence de débit. En effet, dans l'étude de **Lee et Lee [2004]** la vitesse massique est de G=70 kg.m^{-2}.s^{-1} alors que dans celle de **Lee [2009]** elle est de G=165 kg.m^{-2}.s^{-1}, en plus de ne pas avoir le même nombre de canaux.

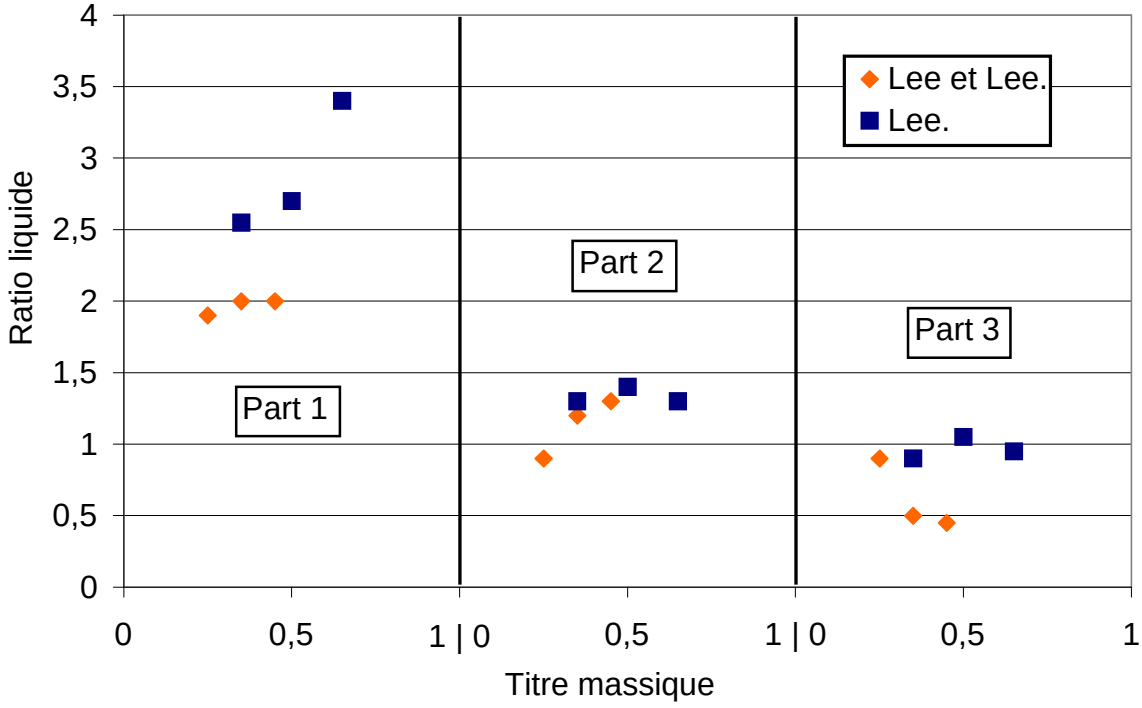


Figure I- 23 : Influence du titre massique à l'entrée sur la distribution liquide pour un distributeur vertical avec écoulement ascendant.

La phase gazeuse est, elle aussi, influencée par le titre massique, comme montré sur la Figure I- 24. Les premiers canaux sont plus alimentés par le gaz lorsque le titre augmente tandis que les autres ne voient pas de changement significatif. Les tendances de la distribution gazeuse sont les mêmes que celles de la distribution liquide à savoir une augmentation de l'alimentation des premiers canaux et une influence très faible sur les autres. Avec de plus grands titres massiques, la distribution liquide se détériore mais la distribution gazeuse est améliorée.

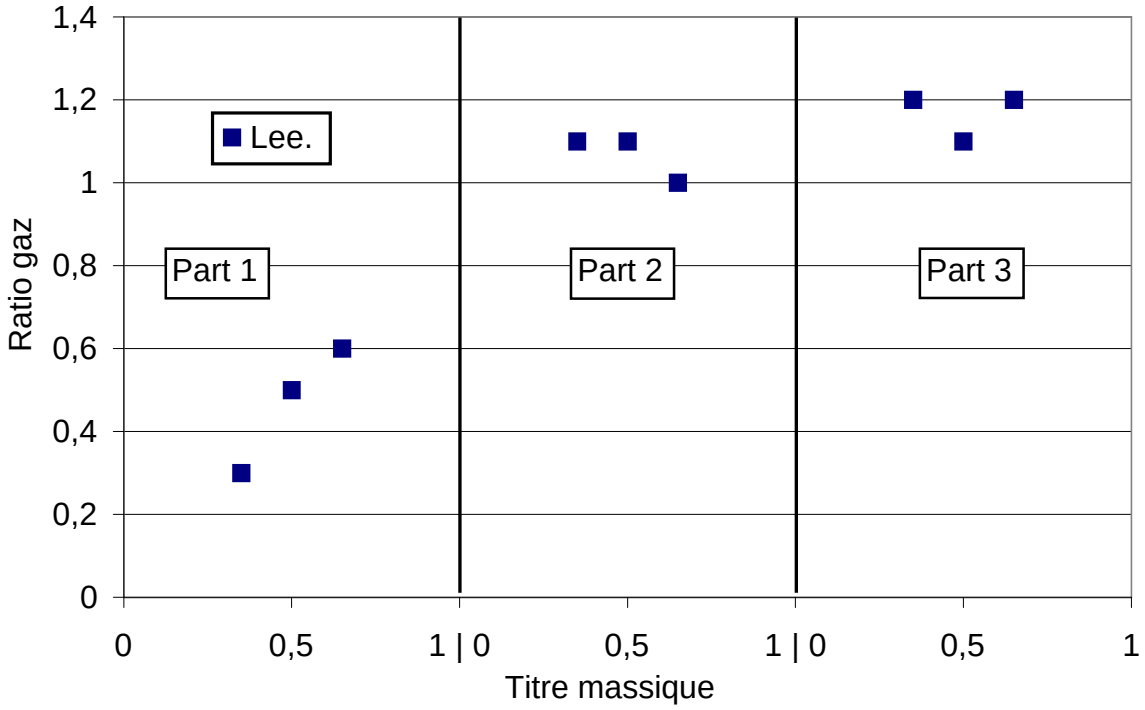


Figure I- 24 : Influence du titre massique sur la distribution gazeuse pour un distributeur vertical avec écoulement ascendant.

4.1.1.2. Densité de flux massique

Ce paramètre est calculé pour la section de passage du distributeur et est un bon indicateur de l'écoulement traversant le tube. L'effet de la densité de flux massique est examiné sur la Figure I- 25 et la Figure I- 26. Pour de faibles débits, les premiers canaux sont suralimentés en liquide tandis que la tendance inverse est observée pour les derniers canaux. Pour **Lee et Lee [2004]**, l'augmentation du débit diminue l'alimentation des premiers canaux en liquide au profit des derniers. **Lee [2009]** présente sensiblement les mêmes valeurs mais les tendances ne sont pas vraiment prononcées, notamment par le fait que le diamètre hydraulique est différent. En effet, celui-ci est plus petit que pour les premiers auteurs. La distribution liquide est plus uniforme pour des débits massiques importants.

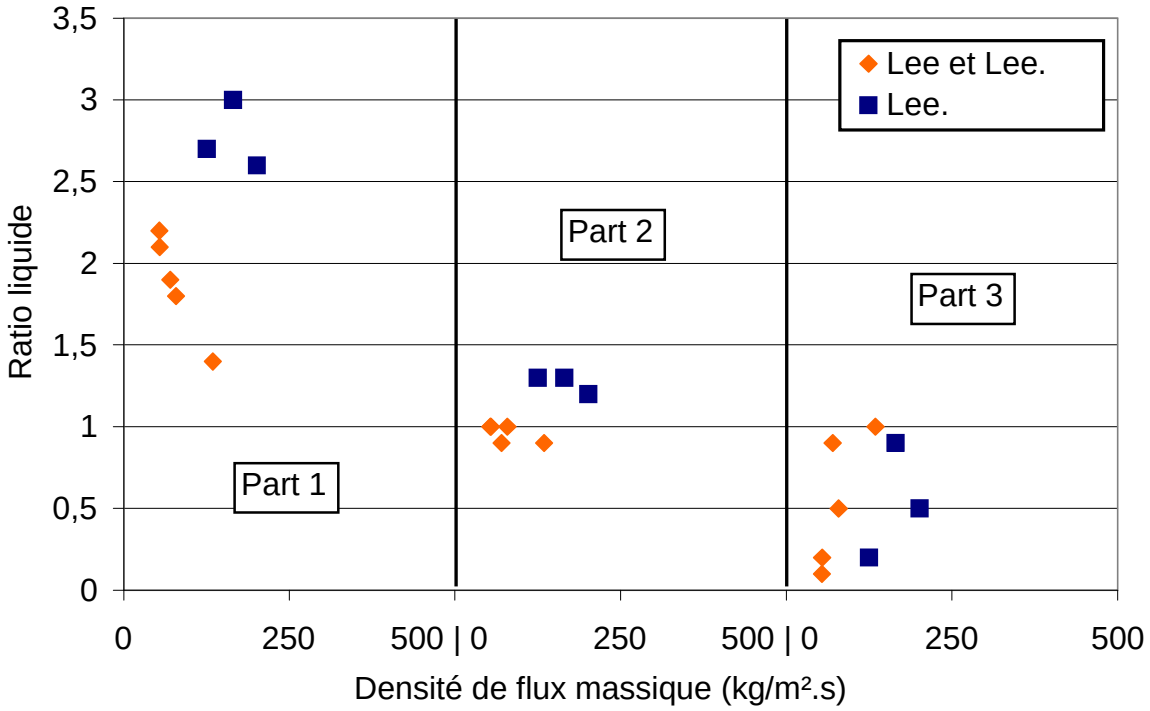


Figure I- 25 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution liquide pour un distributeur vertical avec écoulement ascendant.

La phase gazeuse (Figure I- 26) est également plus uniforme lorsque la densité de flux massique augmente. La quantité de mouvement des deux phases augmentant à l'entrée du distributeur, cela tend à améliorer la distribution. La même différence observée pour la phase liquide entre les deux expériences peut être faite pour la phase gazeuse également.

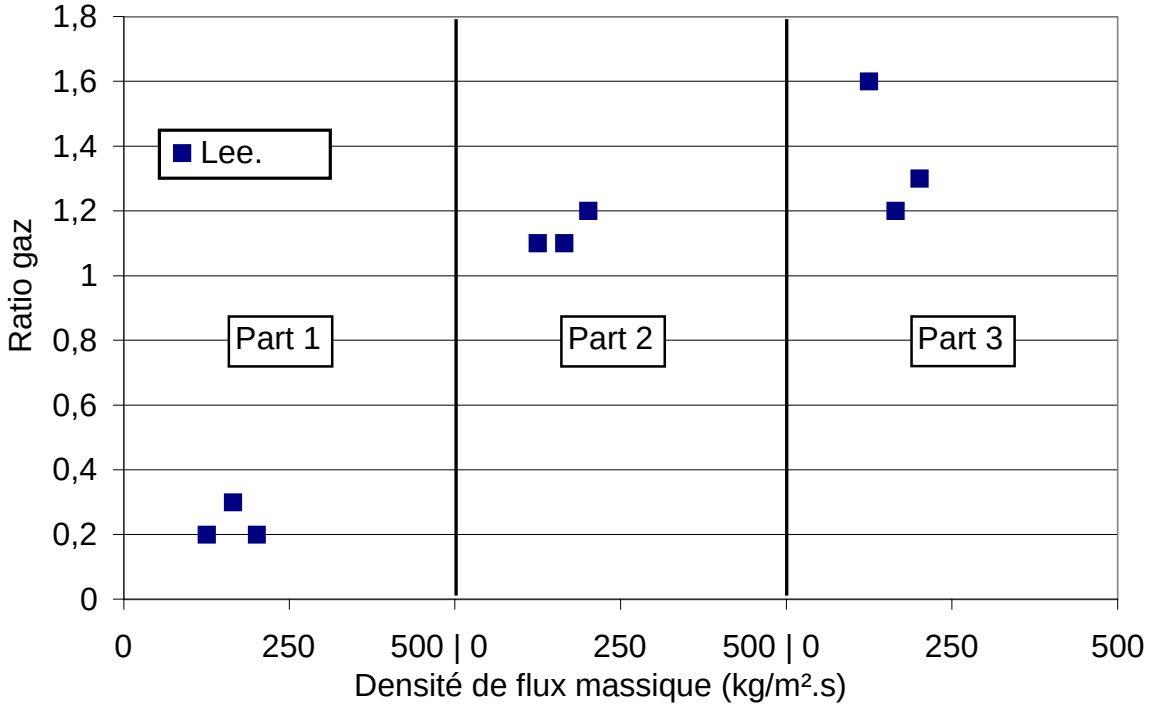


Figure I- 26 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution gazeuse pour un distributeur vertical avec écoulement ascendant.

4.1.1.3. Profondeur d'insertion

La profondeur d'insertion des canaux dans le distributeur a un effet important sur la distribution diphasique. L'impact de la phase liquide sur les canaux, modifie le régime d'écoulement. La distribution est alors changée. Sur la Figure I- 27, seule la phase liquide est montrée car il n'y avait pas de données pour la phase gazeuse.

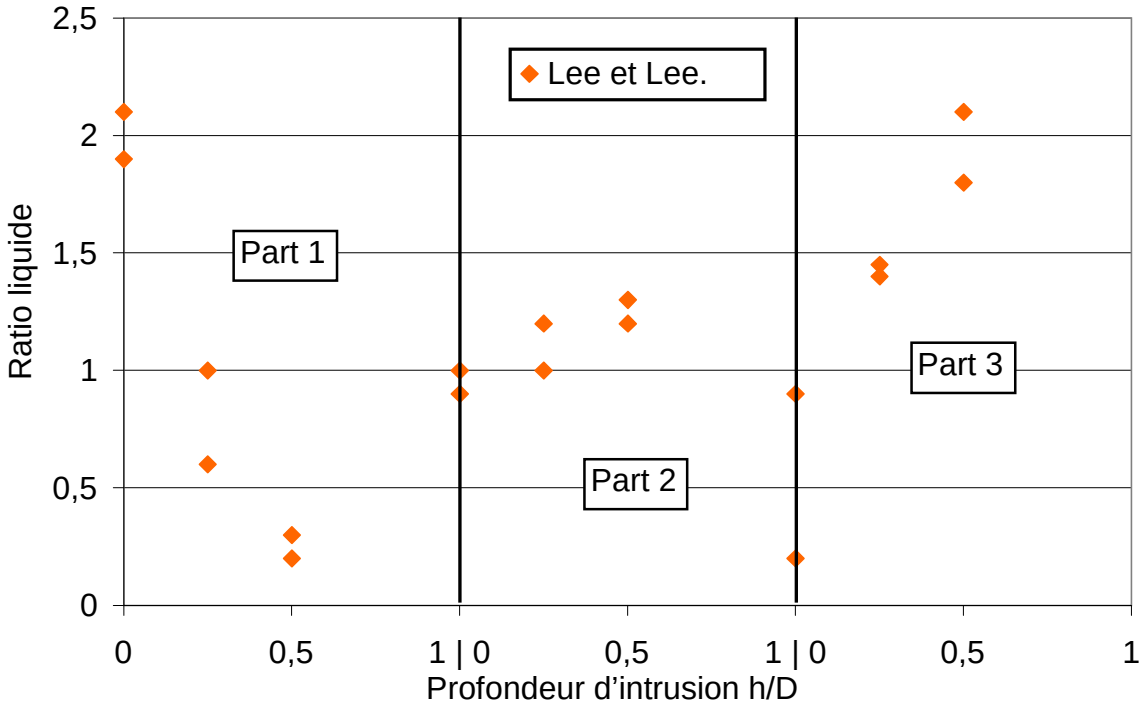


Figure I- 27 : Influence de la profondeur d'insertion sur la phase liquide pour un distributeur vertical avec écoulement ascendant.

La distribution sans l'intrusion des canaux dans le distributeur est quasiment opposée à celle avec. La Figure I- 27 montre que l'alimentation des premiers canaux est forte sans insertion mais devient faible avec la présence des canaux dans le distributeur. A l'inverse, les derniers canaux sont faiblement alimentés en liquide pour h/D=0 et deviennent fortement alimentés pour une insertion plus importante. Comme précédemment vu sur la Figure I- 21, différents écoulements naissent de différentes profondeurs d'insertion. Le régime d'écoulement est fortement affecté par ce paramètre. Plus l'intrusion est importante, plus l'écoulement est perturbé.

Les trois paramètres présentés sont donc très liés les uns aux autres. L'amélioration de la distribution par le biais d'un d'entre eux peut être compensé par la détérioration de celle-ci provoqué par un autre.

4.1.2. Distributeur avec écoulement descendant

L'analyse de l'écoulement descendant a été menée par **Poggi [2008]**. Les essais ont été faits avec une intrusion correspondant à h/D=0,5. De ce fait, les tendances montrées dans cette partie peuvent être différentes pour un écoulement dans un distributeur où il n'y a pas d'insertion des canaux.

4.1.2.1. Titre massique

Le titre massique a un effet sur la distribution, notamment sur la fin du distributeur, comme présenté sur la Figure I- 28. Les parties du début et du milieu sont faiblement influencées par la variation du titre massique, alors que dans les derniers canaux on observe un changement notable. Ils sont en effet plus alimentés lorsque le titre massique augmente. La phase liquide s'accumule dans le fond du tube sous l'effet de la gravité et alimente alors les derniers canaux. L'insertion des canaux provoque un impact d'une grande partie du fluide sur le premier canal, qui est alors projetée vers le fond du distributeur. La Figure I- 29 montre une illustration de cet effet.

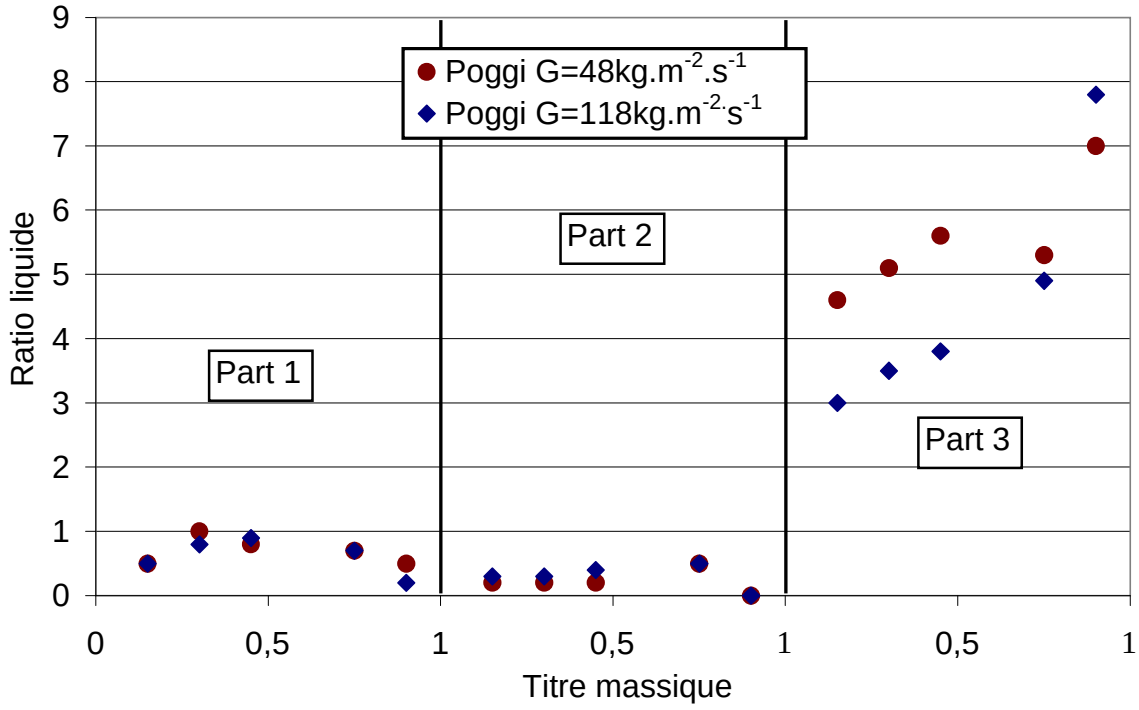


Figure I- 28 : Influence du titre massique sur la distribution liquide pour un distributeur vertical avec écoulement descendant.

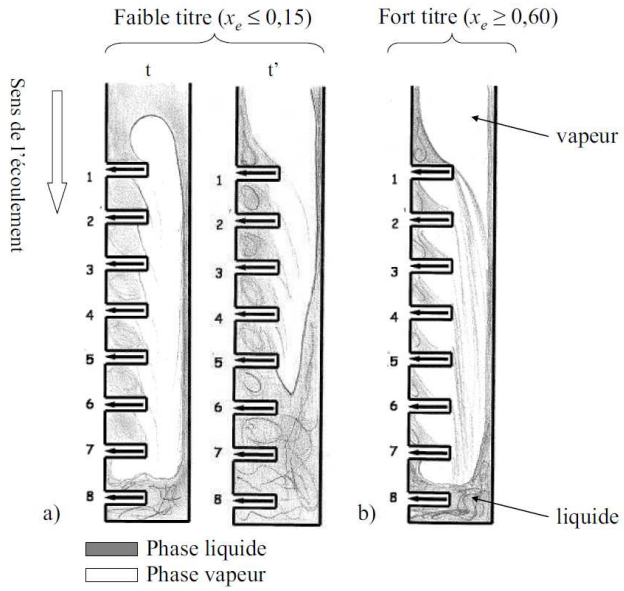


Figure I- 29 : Schéma de l'effet du titre massique sur l'écoulement dans le distributeur, Poggi [2008].

La phase gazeuse est également affectée par la variation du titre massique mais dans une moindre mesure que la phase liquide. La Figure I- 30 montre une amélioration de la distribution. Pour une vitesse massique G = 48 kg.m^{-2}s^{-1}, la distribution gazeuse tend à être moins uniforme pour les faibles titres massiques. Pour un débit plus important, la distribution est quasiment homogène quel que soit le titre massique et donc aucune influence notable n'est observée.

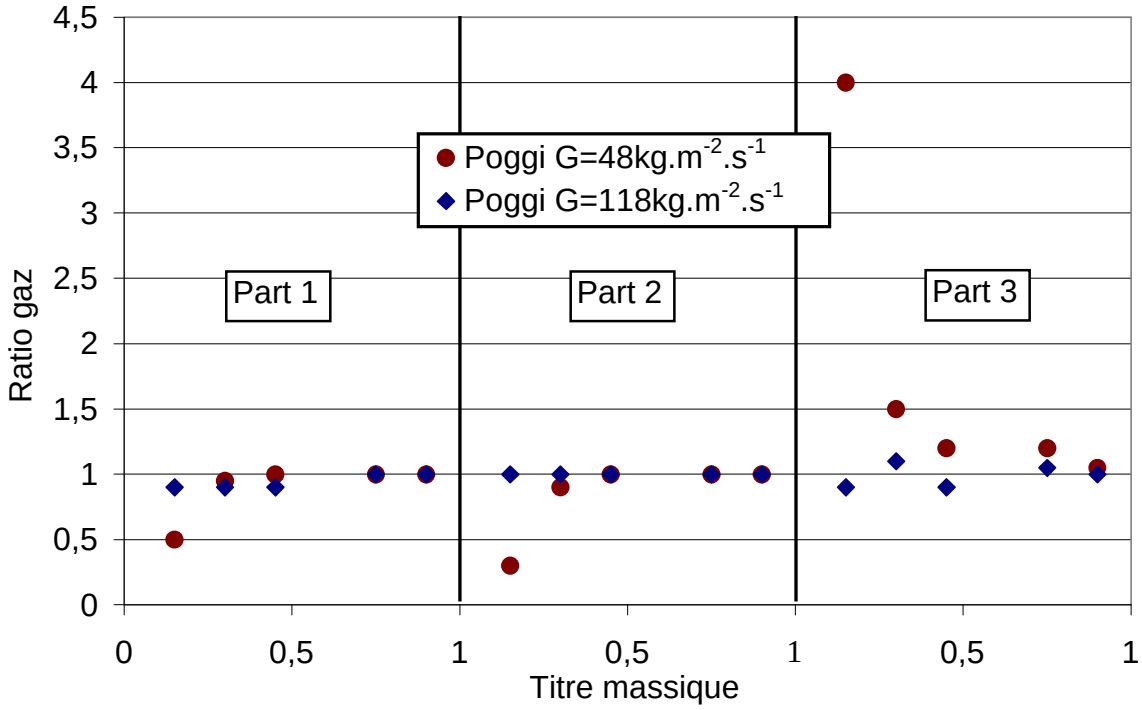


Figure I- 30 : Influence du titre massique sur la distribution gazeuse pour un distributeur vertical avec écoulement descendant.

4.1.2.2. Densité de flux massique

La variation de la densité de flux massique impacte sur la quantité de mouvement du fluide, de la même manière que pour l'écoulement ascendant. La quantité de mouvement augmente lorsque la densité de flux massique augmente. La phase liquide se heurte alors au fond du distributeur plus rapidement, ce qui accentue la dispersion de cette phase. La Figure I- 31 montre différentes expériences avec plusieurs titres massiques. Les derniers canaux sont généralement moins alimentés pour des forts débits massiques. Les autres canaux ne sont que faiblement perturbés par ces variations.

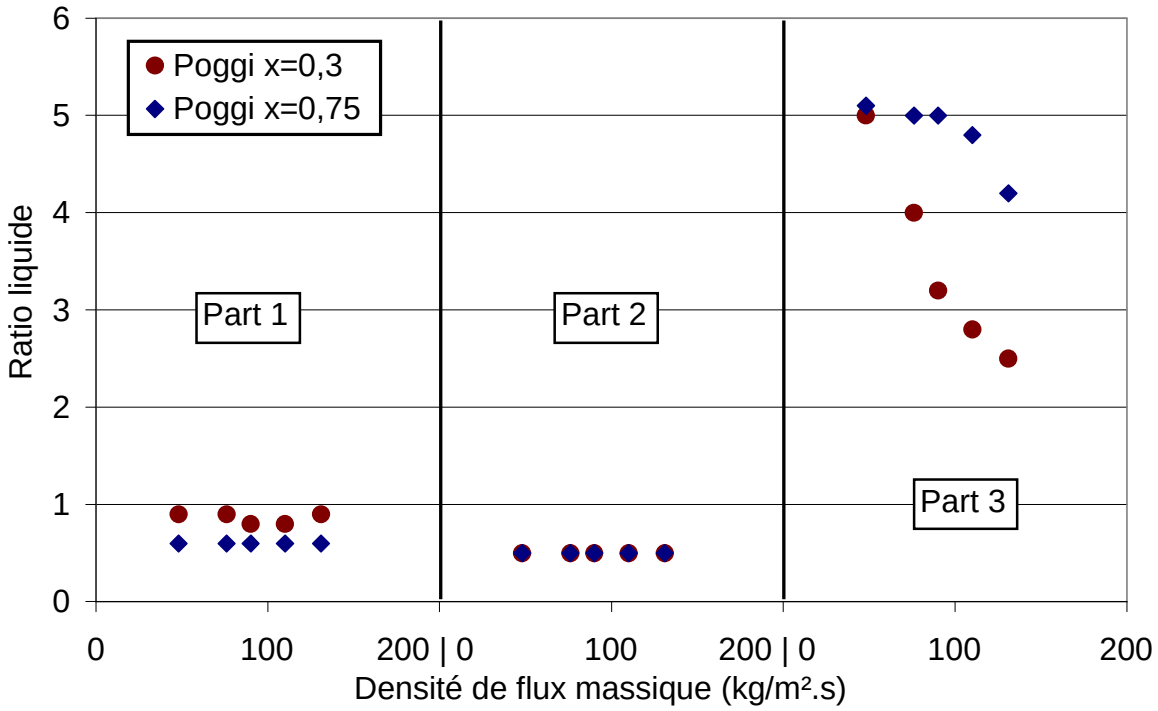


Figure I- 31 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution liquide pour un distributeur vertical avec écoulement descendant.

Plus la densité de flux massique est important, meilleure est la distribution. Ce paramètre n'a pas d'effet significatif sur la distribution gazeuse. Les résultats sont présentés sur la Figure I- 32 qui montre que les derniers canaux sont légèrement plus alimentés que les autres.

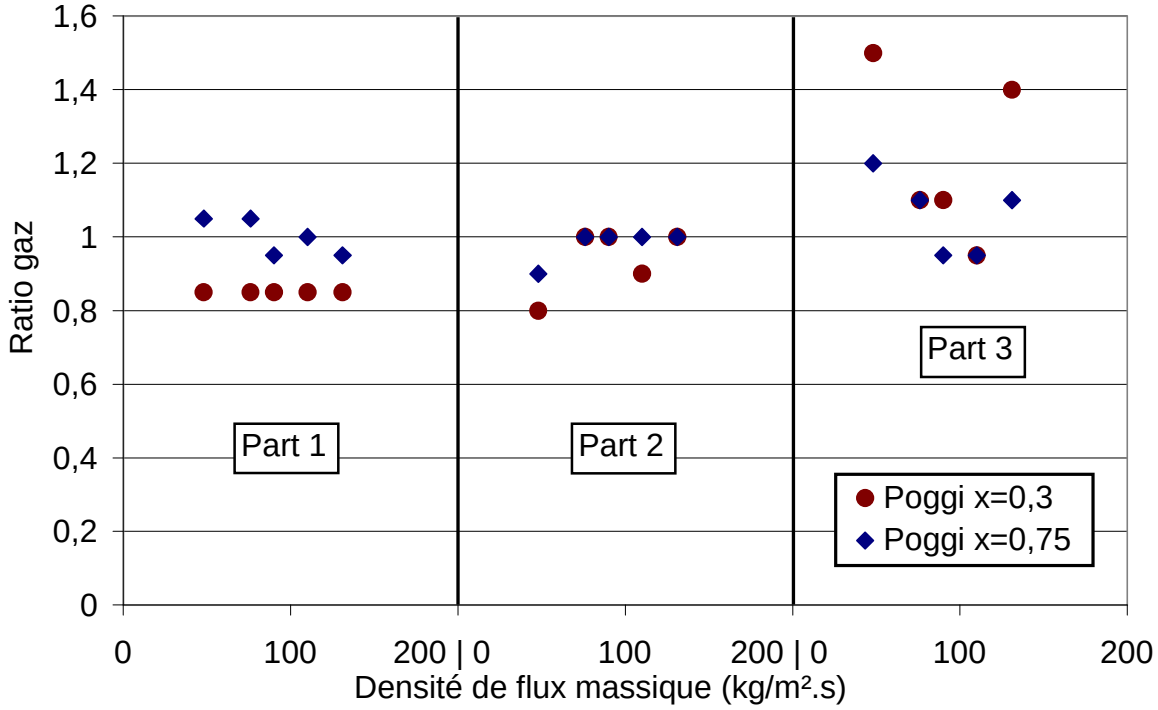


Figure I- 32 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution gazeuse pour un distributeur vertical avec écoulement descendant.

4.2 Distributeur horizontal

Les distributeurs horizontaux sont plus souvent utilisés que les distributeurs verticaux. Il y a également deux configurations possibles avec ce type de distributeur, une configuration avec les canaux verticaux en écoulement ascendant et l'autre en écoulement descendant.
La gravité joue un effet non négligeable sur la distribution. Pour l'écoulement descendant, la gravité force le liquide à passer dans les premiers canaux alors que pour un écoulement ascendant, le liquide alimente préférentiellement les derniers canaux.

Teclemariam et al. [2003] ont étudié l'effet de l'orientation des canaux sur la distribution diphasique. Trois orientations de canaux ont été testées simultanément : vertical descendant, oblique à 45° descendant et horizontal, comme présenté sur la Figure I- 33. Les résultats ont montré différentes distributions en fonction de l'orientation des canaux. Plus de liquide alimente les canaux verticaux et plus de gaz alimente ceux horizontaux.

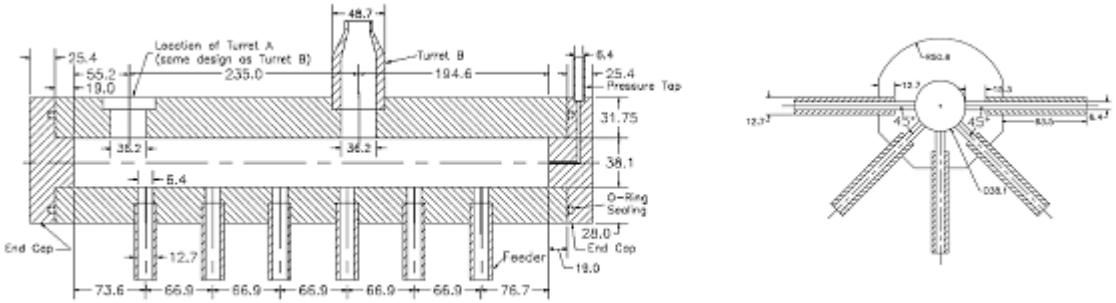


Figure I- 33 : Schéma de la section d'essais de Teclemariam et al. [2003].

Kim et Sin [2006] ont étudié la distribution avec un distributeur horizontal et les deux directions pour l'écoulement dans des canaux verticaux (ascendant et descendant). La section d'essais comprenait 30 tubes multicanaux avec différentes profondeurs d'intrusion dans le distributeur. La distribution du mélange eau-air a été analysée en mesurant le débit dans chaque canal. L'influence du débit massique, du titre massique et également de la profondeur d'insertion a été observée à travers différentes configurations.
Ahmad et al. [2009] ont également examiné la distribution pour les deux directions d'écoulement dans des canaux verticaux avec un distributeur horizontal. Leur section d'essais n'était composée que de huit canaux parallèles qui pouvaient être pivotés afin d'obtenir un écoulement ascendant ou descendant. Il y a une différence par rapport aux autres articles, le diamètre du tube d'entrée est plus petit que celui du distributeur, ce qui peut donner naissance à des observations différentes. Dans la seconde partie de leur étude, ils ont ajouté un dispositif de dispersion conduisant à des nouvelles configurations d'écoulement dans le distributeur. Ils ont alors observé une amélioration de la distribution diphasique.
Vist et Pettersen [2004] ont également exploré ces deux configurations. Ils avaient à leur disposition deux distributeurs avec dix tubes en parallèle mais avec un diamètre interne différent. Le premier possédait un diamètre interne de 8 mm (ID8) et le second de 16 mm (ID16). En plus de l'une influence du débit massique et du titre massique, ils ont étudié l'influence de la géométrie du distributeur et de la longueur du tube d'entrée. Ils en ont conclu que plus la longueur d'entrée est petite, plus la distribution est améliorée, mais concernant le diamètre du distributeur, peu de différences ont été observées.
Cho et Cho [2004, 2006] ont analysé l'effet de l'orientation du distributeur. Ils ont alors montré que l'orientation a un impact majeur sur la distribution diphasique mais également sur les pertes de charge. La gravité augmente les pertes de pression pour les distributeurs horizontaux.

4.2.1. Canaux avec écoulement ascendant

Pour les canaux verticaux à écoulement ascendant, la phase liquide alimente fortement les derniers canaux. La phase gazeuse suit la tendance inverse, en se dirigeant principalement vers les premiers canaux. La Figure I- 34 montre une illustration d'un distributeur horizontal dans ces conditions.

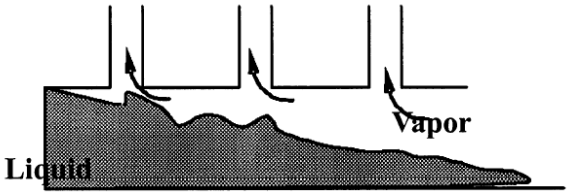


Figure I- 34 : Illustration de la distribution dans un distributeur horizontal avec des canaux verticaux et écoulement ascendant, Webb et Chung [2004].

4.2.1.1. Titre massique

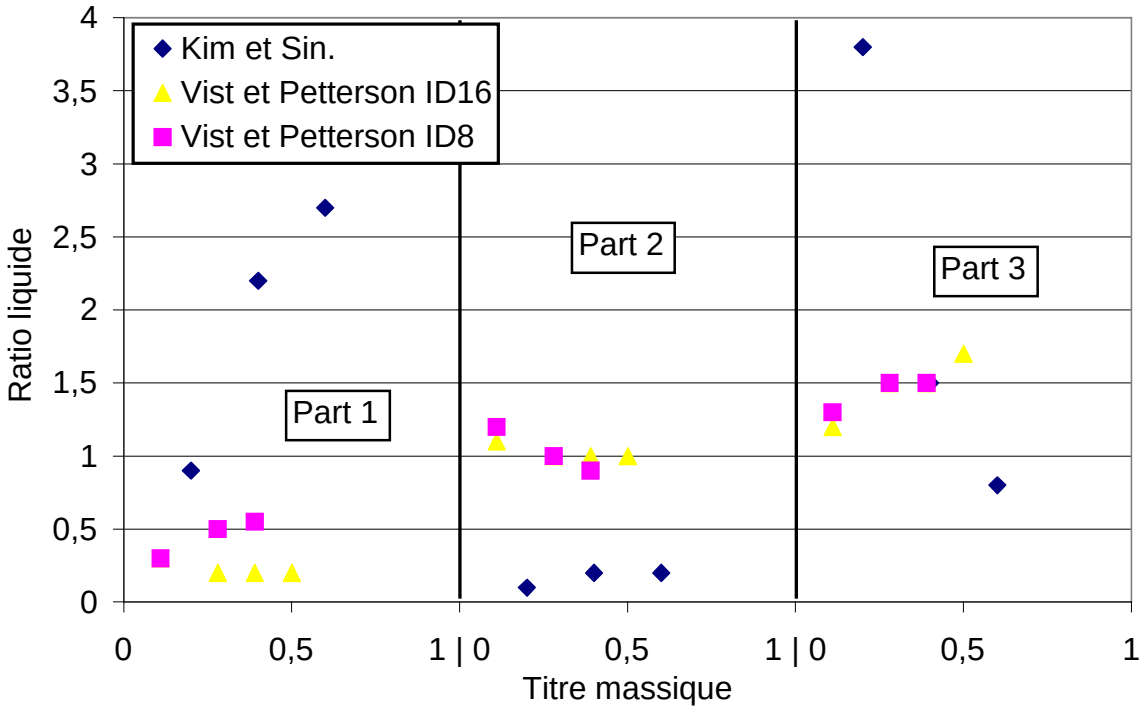


Figure I- 35 : Influence du titre massique sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant.

La Figure I- 35 montre deux tendances opposées pour les derniers canaux. Pour comprendre ces différences, il faut détailler les conditions expérimentales. **Kim et Sin [2006]** ont étudié la distribution avec un faible débit massique, alors que **Vist et Pettersen [2004]** ont fait des essais avec un débit massique élevé. Le fluide est projeté plus rapidement vers le fond du tube avec un débit massique plus important.

Vist et Pettersen [2004] ont donc utilisé un débit massique important, ce qui fait que le liquide atteint rapidement le fond du distributeur. L'augmentation du titre massique n'a pas de réelle influence sur la distribution dans les différents canaux.
Kim et Sin [2007] ont étudié avec un débit plus faible comme expliqué précédemment, et le titre massique a un effet différent sur le film liquide. Ce film est réparti sur la circonférence du

distributeur pour des forts titres massiques, alors que pour des titres plus faibles, le film est plus épais sur la partie inférieure du tube. Le ratio liquide qui atteint la fin du distributeur est alors plus faible pour des titres plus petits, la tendance opposée est donc observée pour les premiers canaux.

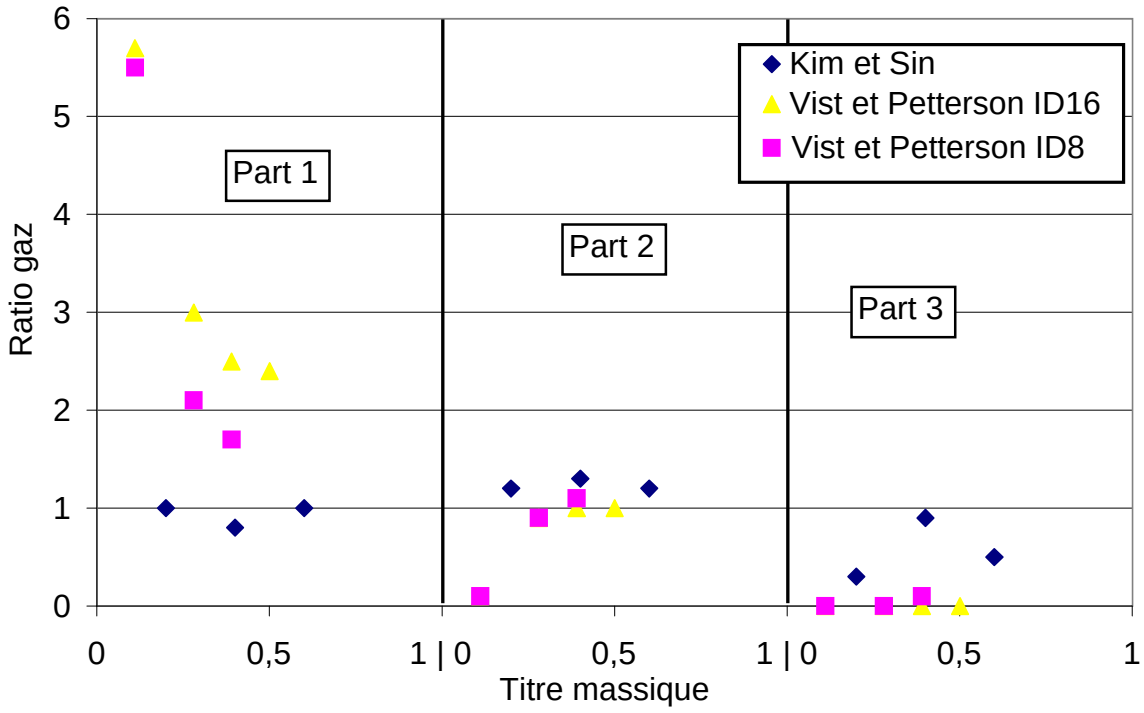


Figure I- 36 : Influence du titre massique sur la distribution gazeuse pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant.

La phase gazeuse présentée sur la Figure I- 36 montre des tendances différentes selon les auteurs. Pour les expériences de **Vist et Petterson [2004]** : les premiers canaux sont moins alimentés lorsque le titre augmente, tandis que ceux du milieu et du fond le sont plus. Pour **Kim et Sin [2006]**, la distribution n'est pas sensiblement perturbée par le changement du titre massique.
Avec l'augmentation du titre massique, le gaz peut plus facilement atteindre le fond du distributeur et alimenter les canaux sans être limité par le liquide.

4.2.1.2. Densité de flux massique

La densité de flux massique a déjà été mentionnée car les deux paramètres (titre massique et densité de flux massique) sont liés. Comme expliqué précédemment, la densité de flux massique influence la quantité de mouvement du fluide ; une densité de flux massique plus importante provoque une quantité de mouvement plus grand. Le film liquide est également réparti d'une façon uniforme sur la circonférence du distributeur pour les débits les plus importants. Les résultats sont présentés sur la Figure I- 37.

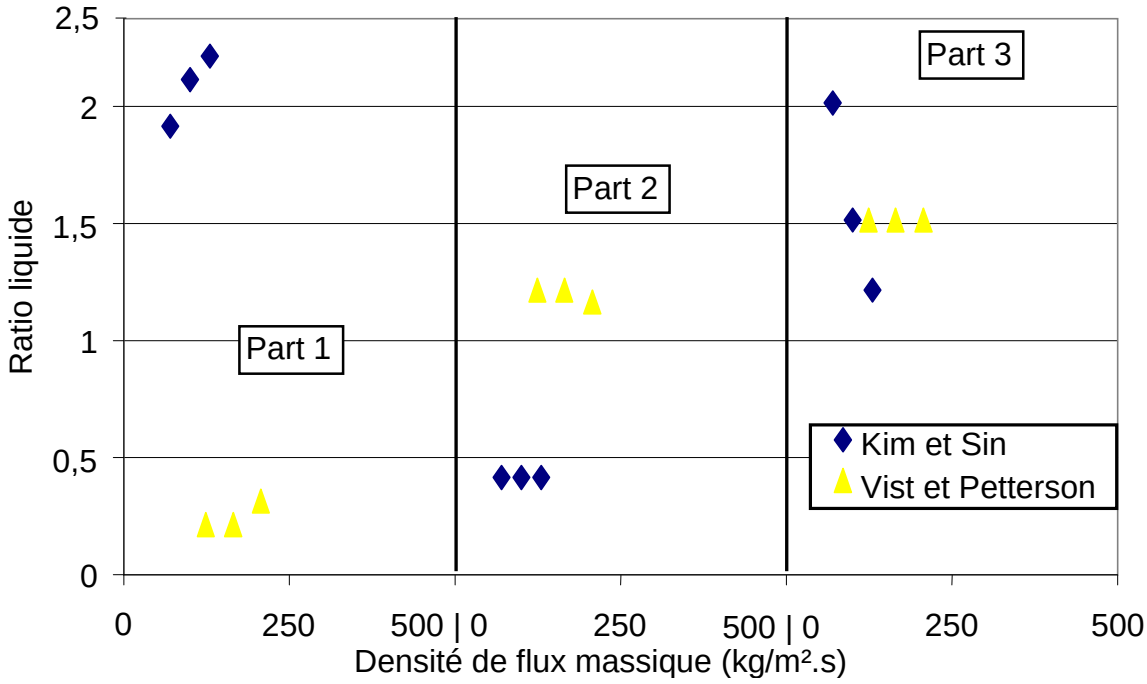


Figure I- 37 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant.

Encore une fois des comportements différents sont observés selon les auteurs. Les expériences de **Kim et Sin [2006]** montre que pour des débits massiques importants, les premiers canaux sont plus alimentés en liquide. En effet, le film liquide se répartit plus uniformément sur la circonférence donc moins de liquide ne se trouve sur la partie inférieure. Pour les autres auteurs, les ratios ne sont pas fortement influencés par la variation de la densité de flux massique. La différence entre les deux auteurs peut s'expliquer par la différence des titres massiques de 0,4 pour **Kim et Sin [2006]** et de 0,27 pour **Vist et Pettersen [2004]**.

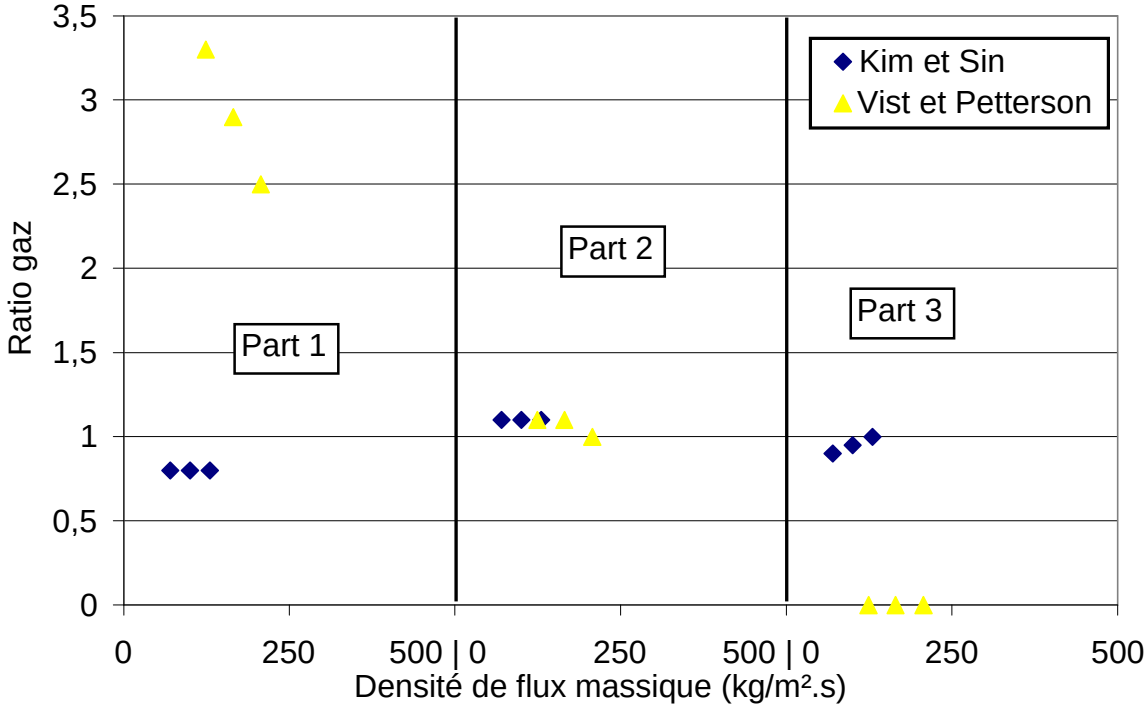


Figure I- 38 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution gazeuse pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant.

La Figure I- 38 présente des différences entre les deux expériences, qui sont liées au titre massiques. Dans l'étude de **Vist et Pettersen [2004]**, le titre massique est inférieur à l'autre étude (0,27 contre 0,4). Cette différence montre alors une diminution du gaz dans les premiers canaux lorsque la densité de flux massique augmente. Pour **Vist et Pettersen [2004]**, le gaz est alors entrainé par le liquide plus en aval du distributeur.
Kim et Sin [2006] ont remarqué une légère diminution de la phase gazeuse dans les premiers canaux, ce qui n'apparait pas sur la Figure I- 38. Cependant, la distribution de cette phase est améliorée avec l'augmentation de la densité de flux massique, contrairement à la phase liquide.

4.2.1.3. Profondeur d'insertion.

L'effet de la profondeur d'insertion des canaux dans le distributeur a seulement été analysé par **Kim et Sin [2006]**. Les auteurs ont testé trois profondeurs d'intrusion différentes : *h/D*=0, 1/4 et1/2.

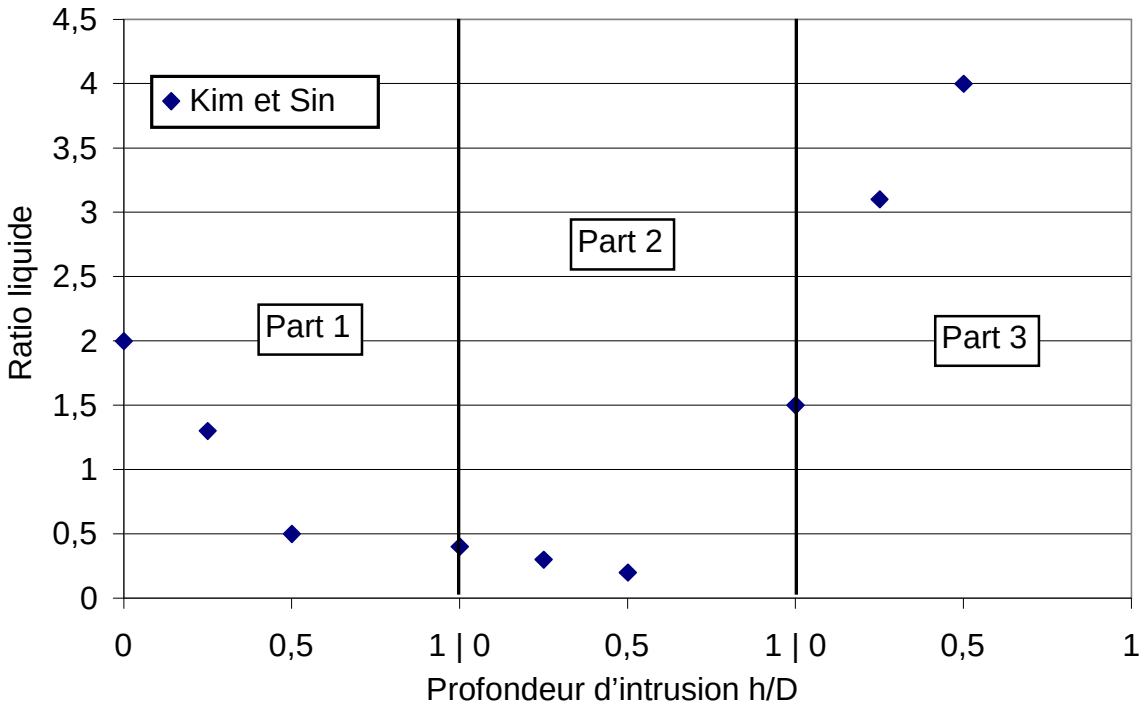


Figure I- 39 : Influence de la profondeur d'insertion sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant.

La Figure I- 39 montre la distribution de la phase liquide. Sans insertion, les premiers canaux sont largement alimentés en liquide. L'augmentation de la profondeur d'insertion provoque une diminution de l'alimentation des canaux dans cette partie du distributeur. La tendance opposée apparait pour l'extrémité du distributeur, la phase liquide alimente plus les canaux lorsque la profondeur d'insertion augmente. La phase liquide se heurte aux premiers canaux et est alors projetée vers le fond du distributeur : de ce fait, le liquide passe préférentiellement dans les derniers canaux.

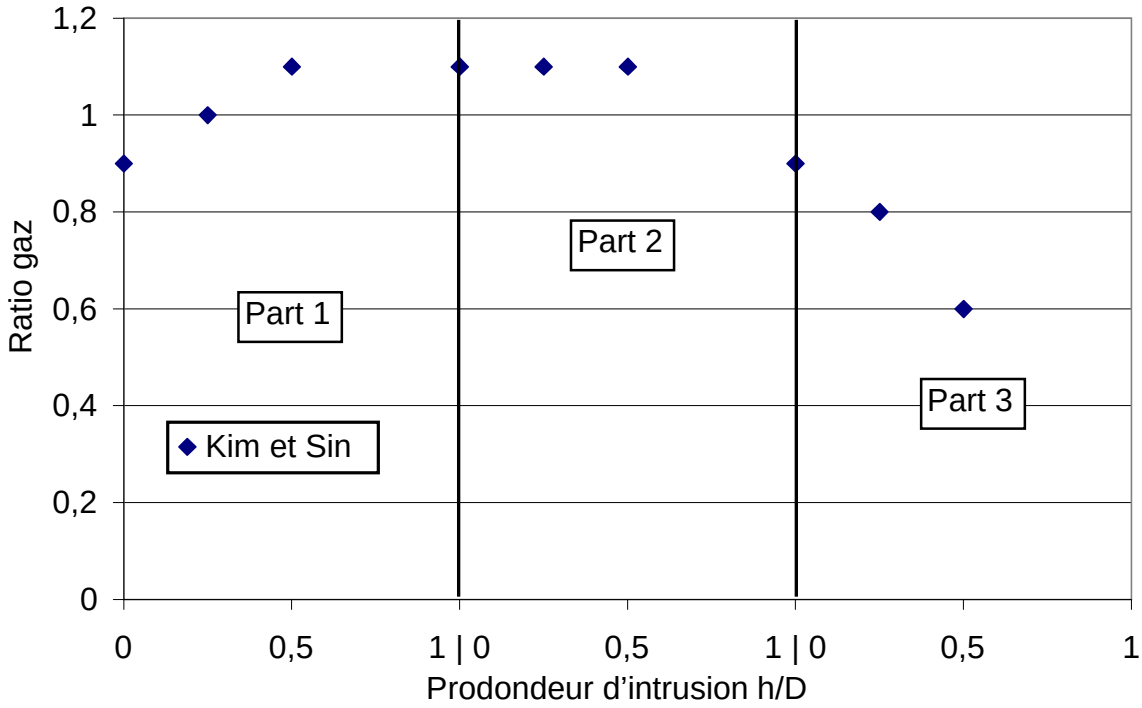


Figure I- 40 : Influence de la profondeur d'insertion sur la distribution gazeuse pour des canaux verticaux avec écoulement ascendant.

L'intrusion des canaux a également un effet sur la distribution gazeuse, comme montré sur la Figure I- 40. Les tendances pour cette phase sont l'inverse de celles de la phase liquide : avec une intrusion des canaux plus prononcée, le gaz alimente préférentiellement les premiers canaux aux dépens des derniers. La Figure I- 41 est une illustration de la structure de l'écoulement observée dans le distributeur pour différentes profondeurs d'insertion. La phase liquide rempli le fond du distributeur et le gaz ne peut donc pas alimenter les derniers canaux. Pour les premiers canaux, la profondeur d'intrusion provoque là encore une projection du liquide vers le fond du distributeur et de ce fait une diminution de leur alimentation en liquide et l'augmentation du gaz. Cet exemple correspond à un régime annulaire, les tendances peuvent être différentes pour un régime stratifié.

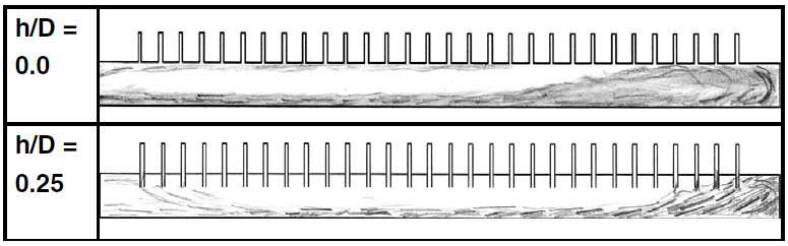


Figure I- 41 : Schéma de l'effet de l'intrusion des canaux dans le distributeur pour un écoulement ascendant, Kim et Sin [2006].

4.2.2. Canaux avec écoulement descendant

Le comportement pour un écoulement descendant dans les canaux est l'opposé de celui pour un écoulement ascendant : une forte alimentation en liquide dans les premiers canaux et inversement, une forte alimentation en gaz dans les derniers. La Figure I- 42 illustre un distributeur horizontal avec des canaux verticaux et un écoulement descendant.

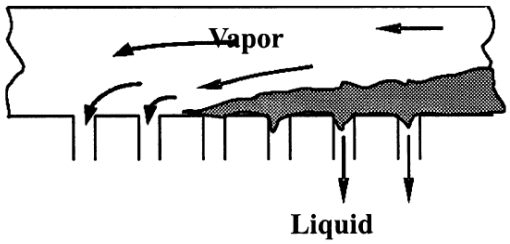


Figure I- 42 : Schéma de l'écoulement dans un distributeur horizontal avec des canaux verticaux en écoulement descendant, Webb et Chung [2004].

Teclemariam et al. [2003] ont étudié la distribution diphasique avec un distributeur horizontal et des canaux verticaux en écoulement descendant. L'originalité de ce distributeur est d'être conçu avec deux entrées potentielles, l'une positionnée au milieu de celui-ci et parallèlement aux canaux. L'autre est placée sur un côté perpendiculairement aux canaux. Six tubes sont connectés au distributeur avec aucune intrusion. La distribution a été analysée en fonction du titre massique et de la densité de flux massique.
L'étude de **Webb et Chung [2004]** fournit les résultats de la distribution pour des canaux descendant connectés à un distributeur horizontal. Cette étude mentionne également différents auteurs comme Bernoux, Kim, Lee, etc.

4.2.2.1. Titre massique

Pour une augmentation du titre massique, le régime d'écoulement devient annulaire. La phase liquide est alors plus facilement dirigée vers le fond du distributeur. La Figure I- 43 montre les données de différentes études.

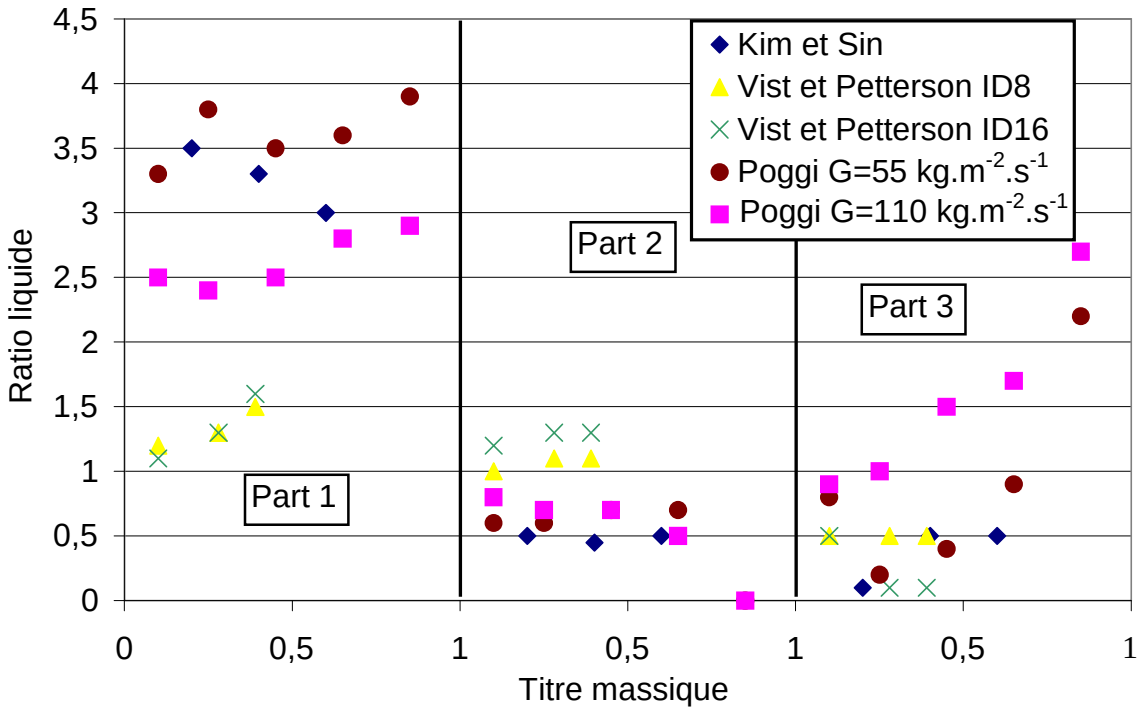


Figure I- 43 : Influence du titre massique sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement descendant.

Il est à noter une certaine dispersion des résultats sur la distribution liquide. Toutefois on identifie quelques tendances lourdes : pour des titres plus importants, la phase liquide tend à alimenter

préférentiellement les premiers canaux ainsi que les derniers**. Kim *et al* [2006]** ont observé une tendance différente dans leurs expériences, la phase liquide alimente moins les premiers canaux avec l'augmentation du titre massique. Les canaux localisés au milieu du distributeur ne voient pas de tendance significative, sauf pour **Poggi [2008]** pour les forts titres.

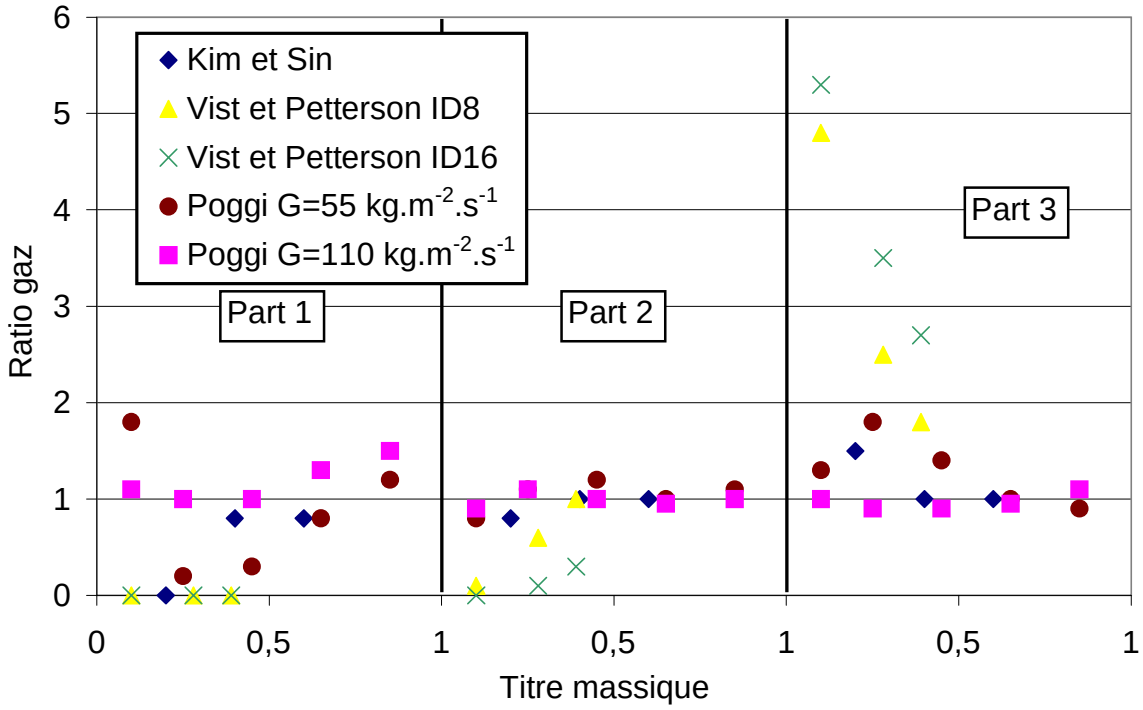


Figure I- 44 : Influence du titre massique sur la distribution gazeuse pour des canaux verticaux avec écoulement descendant.

La Figure I- 44 montre que pour **Kim et Sin[2006]** et de **Poggi [2008]** la distribution gazeuse est quasiment uniforme pour chaque valeur du titre massique. Les résultats de **Vist et Pettersen [2004]** présentent une tendance différente des autres expériences : l'alimentation du gaz décroit significativement dans les derniers canaux avec l'augmentation du titre massique. Les autres canaux sont alors plus alimentés par cette même phase.

4.2.2.2. Densité de flux massique surfacique

Plus la densité de flux massique est importante, plus la quantité de mouvement du fluide est grande et plus le liquide va atteindre facilement le fond du distributeur.

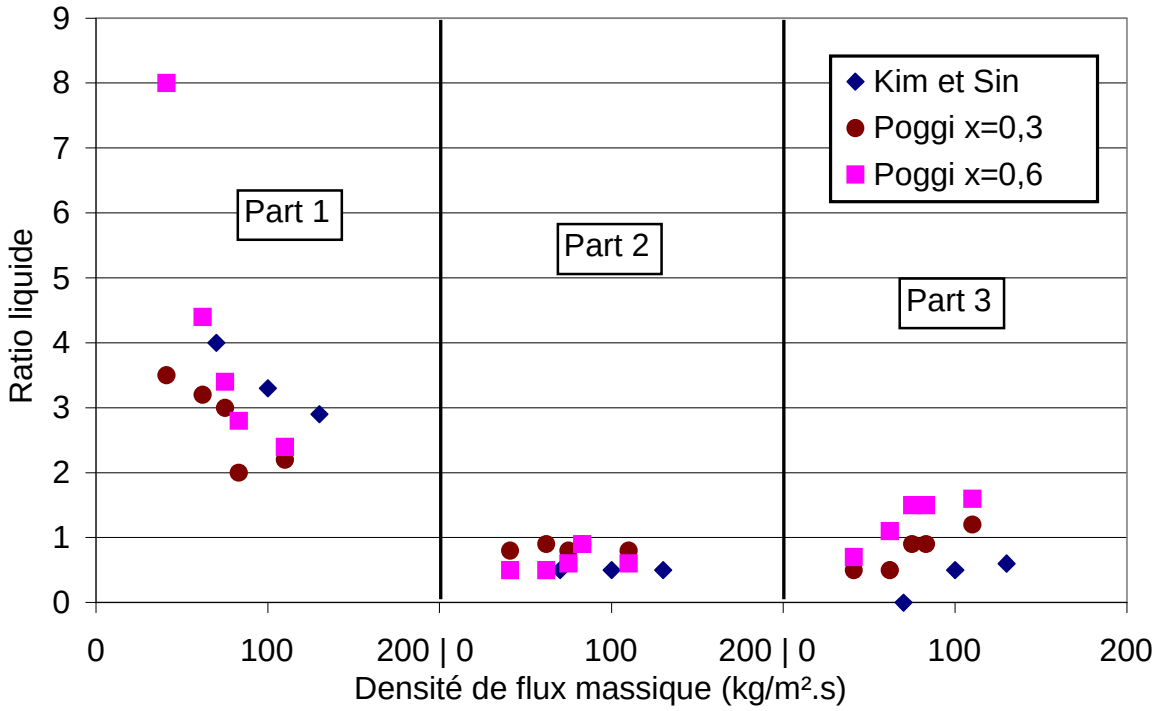


Figure I- 45 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement descendant.

Le ratio du liquide diminue pour les premiers canaux lorsque le débit augmente, comme exposé sur la Figure I- 45. La tendance opposée est observée à la fin du distributeur : pour des débits plus importants, la phase liquide alimente plus ces canaux. Une meilleure distribution est obtenue pour des valeurs de débits plus importantes.
La dépendance de la distribution gazeuse par rapport à la densité de flux massique est similaire à celle par rapport au titre massique : aucune tendance précise ne se dégage, comme le montre la Figure I- 46.

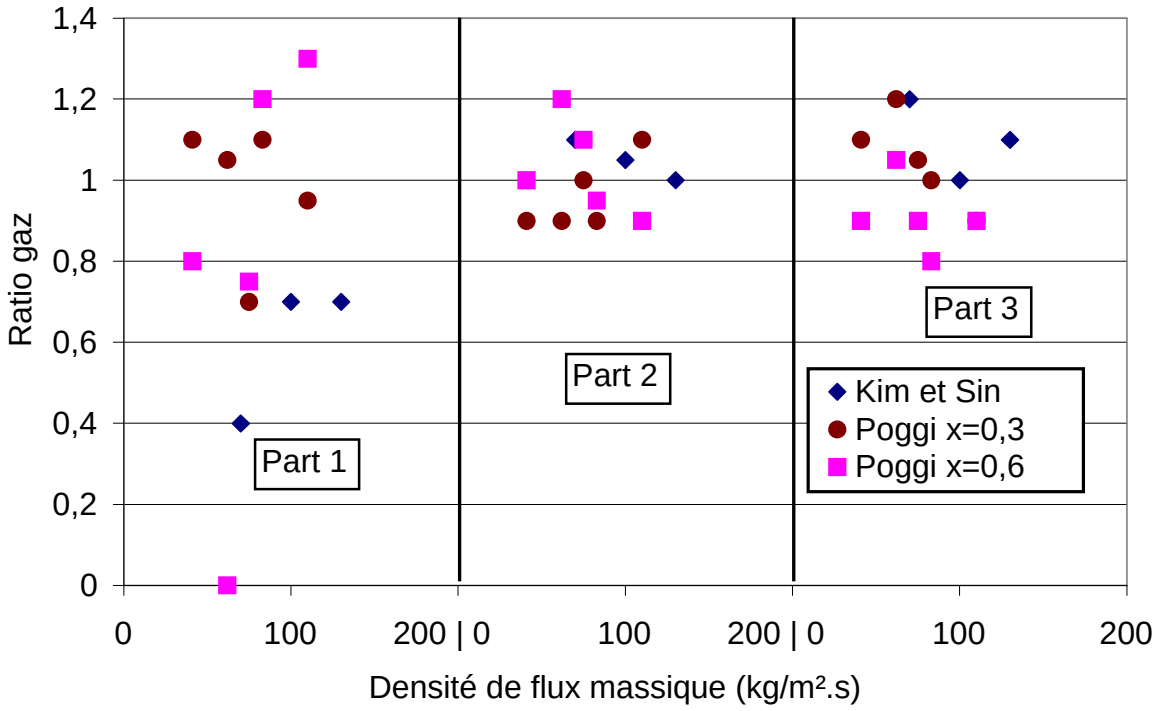


Figure I- 46 : Influence de la densité de flux massique sur la distribution gazeuse pour des canaux verticaux avec écoulement descendant.

La Figure I- 47 schématise l'influence de la densité de flux massique sur la configuration de l'écoulement dans le cas où le diamètre du tube d'entrée est plus faible que celui du distributeur. Lorsque le débit augmente, l'impact sur le fond du distributeur devient plus important et la dispersion est alors accentuée.

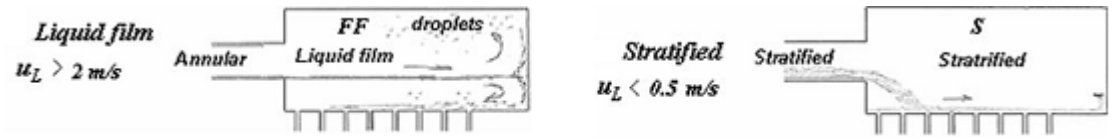


Figure I- 47 : Schéma de l'effet de la variation de la densité de flux massique pour un distributeur horizontal, Ahmad et al. [2009].

4.2.2.3. Profondeur d'insertion

Comme expliqué précédemment, l'augmentation de la profondeur d'insertion joue un rôle majeur sur la distribution. La gravité a également son effet, le liquide impactant chaque canal l'un après l'autre. Chaque choc permet au canal impacté d'être légèrement alimenté, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de liquide disponible.

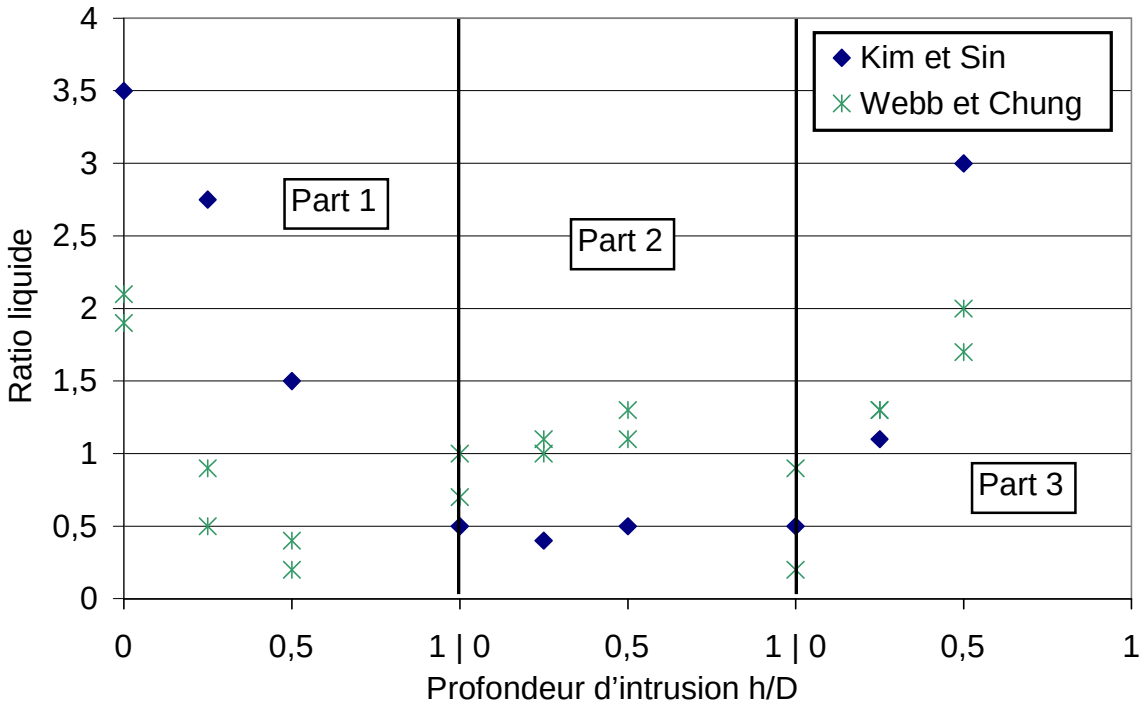


Figure I- 48 : Influence de la profondeur d'insertion sur la distribution liquide pour des canaux verticaux avec écoulement descendant.

Comme présenté sur la Figure I- 48, l'alimentation des premiers canaux est diminuée avec l'insertion des canaux, tandis que la tendance inverse est observée pour la fin du distributeur. Pour des intrusions importantes, le liquide est plus rapidement projeté vers les derniers canaux. Ce phénomène est amplifié par la densité de flux massique et également le titre massique. Pour les canaux situés au milieu, peu de changements sont observés, mais ceux-ci sont fonctions de la géométrie de l'échangeur et notamment du nombre de canaux.

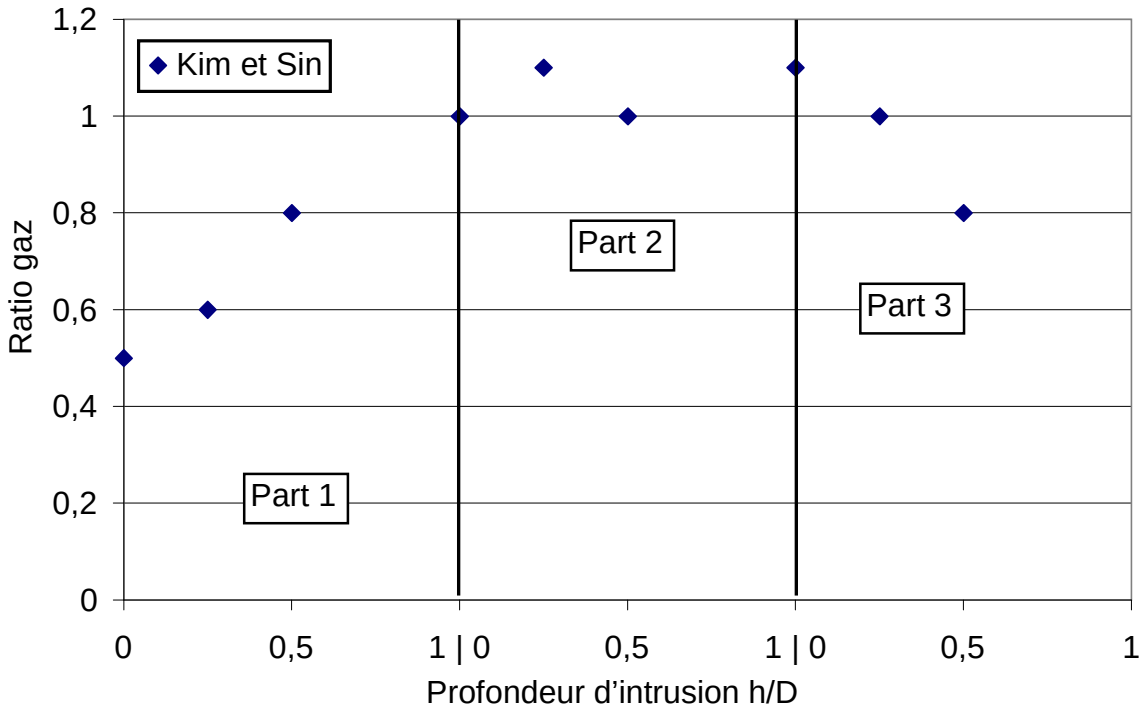


Figure I- 49 : Influence de la profondeur d'insertion sur la distribution gazeuse pour des canaux verticaux avec écoulement descendant.

L'effet de l'insertion des canaux dans le distributeur sur la phase gazeuse est présenté sur la Figure I- 49. Sans intrusion, les premiers canaux sont faiblement alimentés, mais se rapproche d'un débit uniforme lorsque celle-ci augmente. Les derniers canaux ont un comportement opposé premiers, à savoir que lorsque la profondeur d'insertion augmente, le débit de gaz dans ces canaux diminue. La Figure I- 50, montre un schéma représentant l'effet de l'insertion des canaux sur le comportement de l'écoulement dans le distributeur.

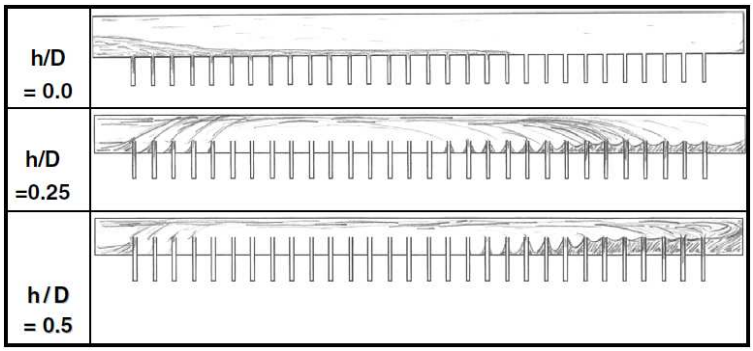


Figure I- 50 : Schéma de l'effet de l'insertion des canaux dans le distributeur sur la configuration de l'écoulement, Kim et Sin [2006].

Ce schéma montre bien que le liquide est projeté vers la partie supérieure du distributeur et atteint ensuite le fond de celui-ci. La phase liquide apparait entre les canaux, avec une quantité moindre pour le milieu du distributeur.

4.3 Canaux inclinés

Taitel et al. [2003, 2006] ont étudié la distribution dans des canaux inclinés avec une orientation ascendante. Le principal objectif de ces deux études a été d'observer la distribution du fluide dans quatre canaux parallèles pour différentes inclinaisons de 0 à 15°.
Dans ces revues, le ratio du fluide dans chaque canal n'est pas déterminé, mais le nombre de canaux dans lesquels il y avait un débit (le fluide stagnant dans les autres). Les résultats ont montré un lien entre le nombre de canaux et le débit massique initial. La distribution avec des faibles débits est simple : seulement un canal est alimenté. L'augmentation de ce paramètre permet au liquide d'alimenter de plus en plus de canaux. La transition entre deux configurations est supposée être liée aux pertes de charge. La configuration de l'écoulement est celle qui minimise les pertes de pression.
Teclamariam et al. [2003] ont analysé l'influence de l'inclinaison. Un distributeur horizontal était connecté à des canaux inclinés d'un angle de 45° avec un écoulement descendant ; il y avait également des canaux verticaux descendants et horizontaux (cf. Figure I- 33). Toutes les directions fonctionnaient en même temps. Les performances des canaux obliques étaient toujours entre les performances des deux autres directions.

4.4 Conclusion

A la vue des éléments bibliographiques, la diversité des conditions expérimentales des études réalisées sur la distribution (géométrie, titre massique, densité de flux massique, …) rend la réalisation de prédictions difficile dans d'autres conditions.
La distribution est largement influencée par différents paramètres qui de plus peuvent interférer entre eux. Si la distribution est améliorée en changeant un seul paramètre, elle peut se comporter totalement différemment si un second paramètre entre également en jeu.
Cependant, la dispersion semble améliorer la distribution liquide dans la plupart des cas. De plus, la phase liquide est celle qui est le plus influencée par les paramètres et généralement celle qui est le moins uniforme. La phase gazeuse est également influencée par la variation de différents paramètres mais souvent dans une moindre mesure que le liquide.

5. Amélioration de la distribution diphasique.

De nombreuses d'études ont été menées par le passé pour trouver des mécanismes permettant d'améliorer la distribution diphasique dans les échangeurs de chaleur. Plusieurs auteurs ont proposé ou étudié des systèmes pour provoquer la dispersion du fluide en ajoutant des systèmes de mélange ou de séparation du débit soit à l'entrée du distributeur soit dans le distributeur directement.

5.1 Dispositif dans le tube d'entrée

5.1.1. Dispositifs de mélange

Vist [2003] a étudié l'influence sur la distribution de mélangeurs statiques, présentés sur la Figure I- 51. Ils consistent en une série d'obstacles sous forme de spirale, localisés à l'entrée du distributeur. Ces dispositifs permettent de créer une séparation du fluide en deux couches dans chaque élément du mélangeur. L'ajout de ces différents dispositifs peut générer un mélange homogène à l'entrée des tubes.

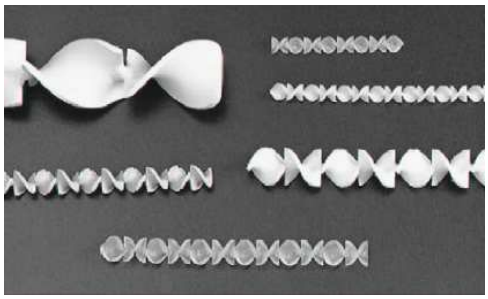


Figure I- 51 : Exemple de mélangeurs statiques.

5.1.2. Dispositifs de dispersion

Un autre moyen pour obtenir une meilleure distribution consiste à disperser l'écoulement par l'ajout d'un dispositif de dispersion.
Plusieurs auteurs, **Fei et Hrnjak [2004]** et **Marchitto et al. [2008]** ont menée des expériences sur la création d'un brouillard dans le distributeur. Ils ont étudié l'influence de l'insertion d'un simple trou servant d'atomiseur. **Fei et Hrnajk [2004]** ont étudié un échangeur consistant en un distributeur rectangulaire horizontal avec cinq canaux circulaires verticaux avec écoulement descendant et comme fluide, le R134a. Ils n'ont observé aucune amélioration sur la distribution. La présence de l'atomiseur (Figure I- 52) provoque la formation d'un jet à l'entrée du distributeur. Le jet se heurte alors à la paroi au fond du distributeur et un écoulement inversé est alors observé. Le liquide s'accumule alors et forme un « bassin » d'eau proche de l'entrée. Ce phénomène conduit donc à une forte alimentation des premiers canaux. Cela tend à diminuer lorsque le débit massique augmente et également lorsque le titre massique augmente.

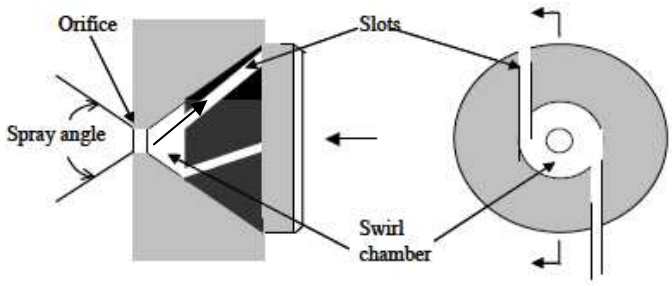


Figure I- 52 : Atomiseur à tourbillons, Fei et Hrnjak [2004].

Marchitto et al. [2008] ont travaillé sur une section d'essais composée d'un distributeur circulaire horizontal connecté à seize canaux rectangulaires parcourus par un écoulement ascendant. Un mélange eau-air a été utilisé pour les tests. Le dispositif produisait un jet à l'intérieur du distributeur, affectant la configuration de l'écoulement. Contrairement aux premiers auteurs, la distribution liquide et gazeuse a été améliorée sur une large gamme de vitesse d'air. Pour des faibles vitesses, la distribution liquide était particulièrement améliorée pour les premiers canaux ; pour des vitesses plus importantes, cette amélioration se répand dans l'ensemble du distributeur.
Un ajout similaire dans le distributeur a été examiné par **Ahmad et al. [2009]**. Le dispositif est présenté sur la Figure I- 53 (a). Les auteurs ont remarqué une amélioration de la distribution. En effet, le trou d'atomisation génère une perte de pression, ce qui provoque la formation d'un jet avec une grande vitesse dans le distributeur. La désintégration du jet en gouttes se produit à une certaine distance du trou, dépendant des conditions d'écoulement. Le jet impacte le fond du distributeur, formant un écoulement de gouttes. Si la vitesse n'est pas assez grande, le liquide accumulé au fond du distributeur suralimente les derniers canaux aux dépens des premiers. Le régime d'écoulement est présenté sur la Figure I- 54.

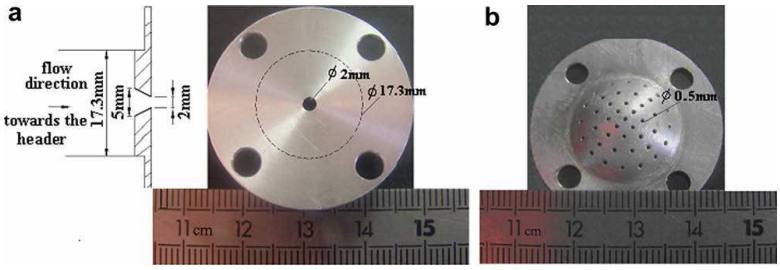


Figure I- 53 : Dispositif à l'entrée du distributeur : trou de dispersion (a) et grille (b), Ahmad et al. [2009].

Les résultats obtenus par **Marchitto et al. [2008]** et **Ahmad et al. [2009]** montre une amélioration de la distribution alors que **Fei et Hrnjak [2004]** notent une détérioration. Cette détérioration est la conséquence de la recirculation observée, ce qui non seulement provoque une formation d'un « bassin » de liquide proche de l'entrée mais également perturbe le jet. L'écoulement inverse peut être une conséquence de la géométrie du distributeur. En effet, ce phénomène n'a pas été observé par **Ahmad et al. [2009]** avec la même orientation des canaux. Deux paramètres géométriques peuvent expliquer cette différence : **Fei et Hrnjak [2004]** ont utilisé un distributeur rectangulaire avec des canaux cylindriques d'un diamètre plus petit que la largeur du distributeur, tandis que **Ahmad et al. [2009]** ont utilisé un distributeur circulaire avec des canaux rectangulaires dont la largeur était égale au diamètre du distributeur. Dans le premier cas, la partie de l'écoulement inverse qui n'alimente pas les canaux circule de chaque côté de ceux-ci sur un plan horizontal jusqu'à l'entrée du distributeur. Dans le second cas, l'écoulement inverse est coincé au fond du distributeur et est forcé d'alimenter les canaux.

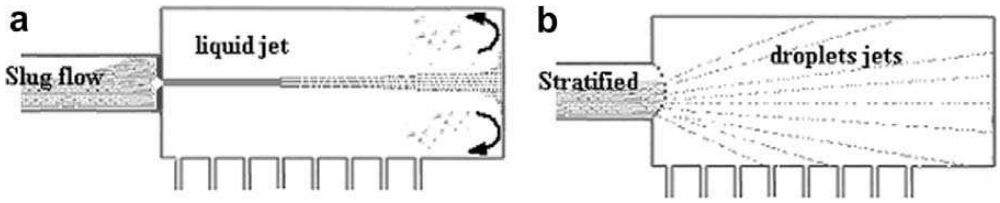


Figure I- 54 : Régime d'écoulements après les deux dispositifs de dispersion. (a) Trou de dispersion et (b) grille, Ahmad et al. [2009].

Pour conclure, la présence d'un dispositif de dispersion à l'entrée du distributeur semble améliorer la distribution par la formation d'un jet et sa désintégration au fond du distributeur. Le problème de la circulation inverse a cependant été mis en avant par **Fei et Hrnjak [2004]** et la géométrie du distributeur doit être prise en compte pour ce phénomène.

D'autres types de dispersions ont été étudiés par **Fei et Hrnjak [2004]** et **Ahmad et al. [2009]**. Cela consiste en l'ajout d'un système de dispersion à l'entrée du distributeur, à travers un atomiseur ou une grille. Les deux systèmes permettent une amélioration de la distribution.
Ahmad et al. [2009] ont utilisé la grille présentée sur la Figure I- 53 : Dispositif à l'entrée du distributeur : trou de dispersion (a) et grille (b), Ahmad et al. [2009].
(b), et ont remarqué une amélioration de la distribution. La grille ne disperse pas mais fragmente le fluide à l'entrée du distributeur, ce qui provoque des jets de fines gouttes dans différentes directions. Lorsque le titre massique augmente, la distribution de liquide est encore améliorée. Les régimes d'écoulements obtenus avec les deux dispositifs sont présentés sur la Figure I- 54. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Les auteurs ont montré que favoriser les impacts et la fragmentation améliore la distribution diphasique qui est directement liée à la configuration de l'écoulement.
Fei et Hrnjak [2004] ont pris l'avantage d'utiliser un atomiseur à tourbillons qui provoque la formation d'un brouillard dans le distributeur. Cependant, les auteurs ont pointé des problèmes liés

à l'angle de pulvérisation, comprenant notamment une zone de recirculation. Ce problème peut être résolu en réduisant cet angle de pulvérisation.

5.1.3. Déversoirs

D'autres méthodes ont été étudiées telles que l'intrusion de déversoirs ayant pour but de diminuer la section de passage dans le distributeur. **Webb et Chung [2004]** ont étudié la distribution diphasique du R-404a dans un distributeur horizontal avec vingt canaux descendant. Ils ont testé des déversoirs avec différentes hauteurs : 1/4 ; 1/2 et 3/4 du diamètre du distributeur, mais également des obstacles avec de trous de diamètres différents. Selon les auteurs, les déversoirs n'affectent pas particulièrement l'écoulement dans le distributeur mais uniquement le niveau du liquide dans la première partie du distributeur. D'un autre côté, les obstacles avec les trous permettent un changement d'un régime stratifié à un écoulement en jet pour de forts titres massiques. Une amélioration significative de la distribution a été obtenue lorsque ces obstacles avaient des trous de petit diamètre.

5.2 Dispositifs dans le distributeur.

Une autre possibilité pour favoriser une meilleure distribution dans les échangeurs de chaleur est d'introduire des obstacles ou des dispositifs à l'intérieur du distributeur, consistant essentiellement à créer des restrictions au niveau de l'écoulement. Plusieurs types d'insertion ont été étudiés.

L'influence des restrictions dues à l'intrusion des canaux dans le distributeur a été étudiée par plusieurs auteurs et a également été exposée précédemment.
Une intrusion très similaire a été examinée par **Bernoux [2000]** pour un distributeur circulaire horizontal connecté à huit canaux verticaux descendant. En effet, cette fois les canaux ne sont pas introduits dans le distributeur mais l'introduction d'obstacles (en tant que diaphragme) à l'intérieur du distributeur est présentée sur la Figure I- 55. Deux diamètres pour les obstacles ont également été étudiés tout en gardant le même diamètre pour le distributeur.
Pour les expériences avec le diamètre de l'entrée égal à celui du distributeur et pour un écoulement stratifié, les diaphragmes détérioreront la distribution liquide. Les premiers canaux sont alors fortement alimentés, comparés aux autres. La phase gazeuse n'est pas significativement influencée par ces ajouts. Lorsque le diamètre de l'entrée est plus petit, un écoulement en jet est présent. L'ajout de diaphragme avec un grand diamètre améliore alors la distribution diphasique. Inversement, la présence de diaphragmes avec un petit diamètre détériore cette distribution.

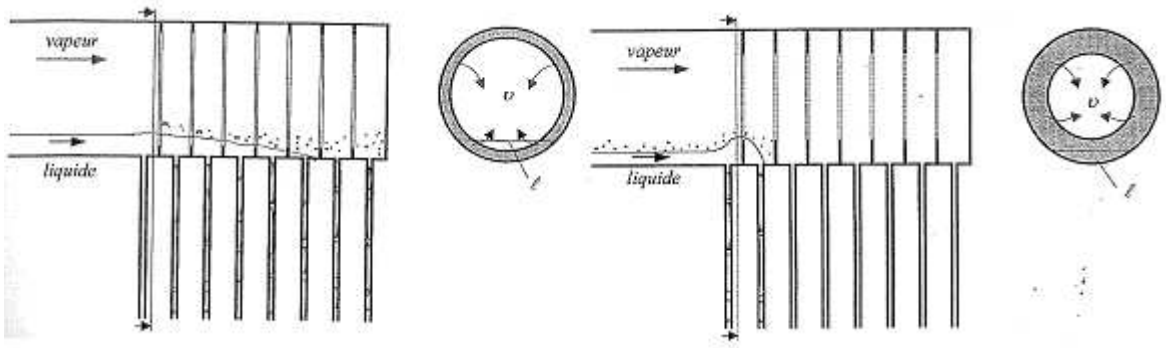


Figure I- 55 : Distributeur avec diaphragmes, Bernoux [2000].

Le même genre d'obstacle a été étudié par **Fei et Hrnjak [2004]** qui ont comparé l'échangeur présenté précédemment à un échangeur à plaque réel. Pour un écoulement stratifié, les obstacles

ont un effet négatif sur la distribution. En effet, le liquide est stoppé et alimente alors principalement les premiers canaux. Pour un écoulement en jet, un écoulement inverse est observé sans les obstacles est supprimé au tour du jet et la distribution est améliorée et stabilisée pour une gamme de 10 à 20% de titre massique et de 30 à 60 g/s pour le débit d'eau. Les effets négatifs sont l'accumulation de liquide à la fin du distributeur et le blocage du jet de dispersion à son entrée.
Les résultats obtenus par ces trois auteurs montrent qu'en utilisant des diaphragmes en tant qu'obstacles dans le distributeur, la distribution est améliorer pour un écoulement en jet, mais lorsque celui-ci est stratifié, la distribution est détériorée.

Une meilleure distribution est également analysée par **Marchitto et al. [2009]** avec l'ajout d'un dispositif en forme de flute directement dans le distributeur. Trois orientations de ce dispositif ont été testées, comme montré sur la Figure I- 56. Les seize trous font face aux seize trous des canaux lorsque l'angle est de 0°. Les résultats montrent le bénéfice de ce dispositif, notamment lorsque celui-ci est orienté dans la direction opposée aux canaux, avec un angle de 180°. La phase gazeuse est contenue dans la flute et libérée tout au long du distributeur, quel que soit son débit.
Le diamètre des trous a également été étudié, mais aucune influence notable n'a été observée sur la distribution, contrairement aux pertes de pression. En effet, les trois diamètres testés : 3, 4,5 et 6 mm présentent différentes pertes de pression. Pour les deux diamètres les plus larges les valeurs sont sensiblement proches, par contre pour les trous de 3 mm, ces pertes de pression étaient plus importantes. Leurs résultats montrent que l'existence d'un diamètre des trous inférieur à une certaine valeur créé des pertes de charge importantes.

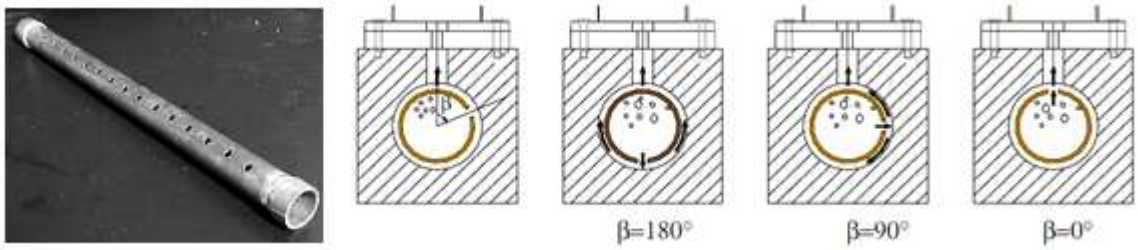
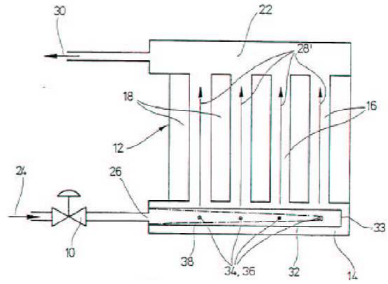
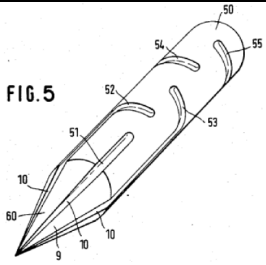


Figure I- 56 : Schéma de la flute par Marchitto et al. [2009].

Des systèmes similaires ont été brevetés respectivement par **Osthues, Petz et Zeitvogel [1998, US Patent 5,806,586 par Ernst Flitsch GmbH and Co.]** et **Humpolik et Staff [1985, US Patent 4,513,587]** comme montré sur la Figure I- 57 (a) et la Figure I- 57 (b). Dans le premier cas, le dispositif consiste en l'ajout d'un corps poreux dans le distributeur et le second cas présente un distributeur venturi en forme de cône qui permet une dispersion de l'écoulement liquide sous forme de gouttes. Une meilleure distribution est attendue dans les deux systèmes.



(a) Invention de Osthues *et al.* [1998]



(b) Invention de Humpolik *et al.* [1985]

Figure I- 57 : Dispositifs dans le distributeur pour l'amélioration de la distribution.

5.3 Modification du distributeur

Toutes les solutions précédemment exposées sont basées sur un distributeur circulaire ou rectangulaire. Certains auteurs ont tenté de résoudre le problème de la distribution à travers le développement d'autres géométries de distributeur. Une de ces solutions, mentionnée par **Bergles *et al.* [2003]**, est présentée sur la Figure I- 58. Cette configuration est basée sur l'uniformisation des pertes de pression. Cette approche qui est efficace pour un écoulement monophasique, peut être, lorsque l'espace et le coût le permettent, selon les auteurs, utilisée pour uniformiser la distribution diphasique. Néanmoins, comme relevé par **Hrnjak [2004]**, cela ne va pas permettre une bonne distribution de la distribution diphasique du fait que la séparation des phases se produit à chaque embranchement dû à la différence des propriétés de la phase liquide et de la phase gazeuse.

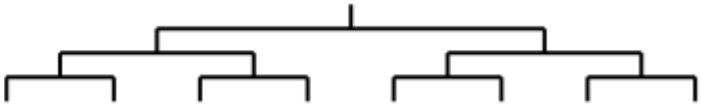


Figure I- 58 : Distributeur avec plusieurs branches.

Une étude par **Wen et al. [2008]** a été faite sur trois configurations de distributeur pour le R-134a comme fluide. Les deux premiers distributeurs sont présentés sur la Figure I- 59. Le premier dispositif (a, b) est un distributeur venturi connecté avec un tube lisse. Le second (a, c) est le même distributeur venturi mais connecté avec un tube avec des micro-ailettes en spirales. Le dernier dispositif est montré sur la Figure I- 60 est un distributeur dans un laminoir.

a

b

c

Figure I- 59 : Distributeur venturi (a) connecté avec un tube lisse (b) ou un tube avec des micro-ailettes en spirales (c), Wen et al. [2008].

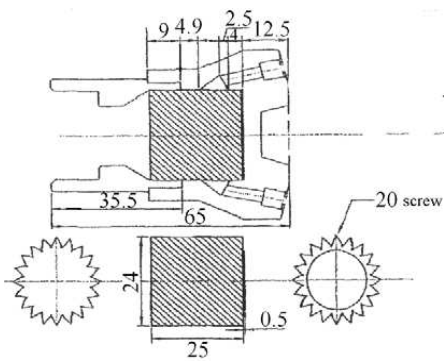


Figure I- 60 : Distributeur dans un laminoir, Wen et al. [2008].

La section d'essais était composée d'un distributeur vertical à écoulement descendant, connecté à treize canaux horizontaux. Les meilleurs résultats et donc la meilleure distribution est obtenue pour le second dispositif : le tube venturi connecté avec un tube à micro-ailettes en spirales.

Précédemment, le travail de **Teclemariam et al. [2003]** a été présenté : le distributeur présentant deux entrées. Cette idée avait déjà été envisagée par **Hughes, Struss et Boeroen [1992, US Patent 5,157,944]** et leur invention est présentée sur la Figure I- 61.

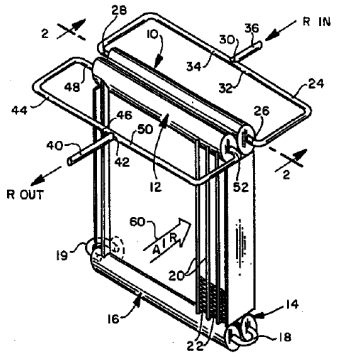


Figure I- 61 : Invention de Hughes et al. [1992].

Un distributeur centrifuge à tourbillons, montré sur la Figure I- 62, a été présenté par **Schneider et Byrd [1991, US Patent, 5,059,226]**.

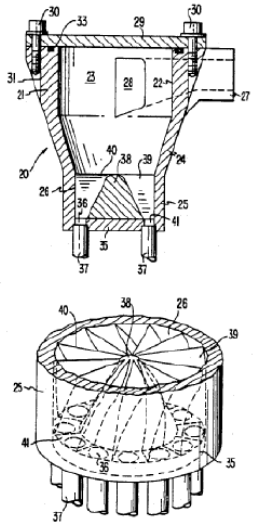


Figure I- 62 : Invention de Schneider et al. [1999].

Burk, Salze et Wolf [1994, DE 4,319,19] ont proposé un distributeur avec une réduction de la section de passage dans le distributeur. La section de passage diminue le long du distributeur, afin d'améliorer la distribution diphasique. Ce dispositif est illustré sur la Figure I- 63.

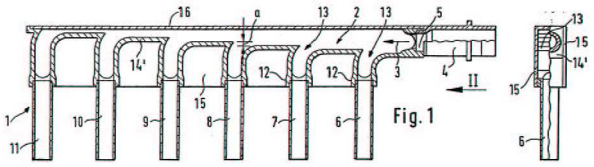


Figure I- 63 : Invention de Burk et al. [1994].

Une autre approche, envisagée par **Hrnjak [2004]**, est de séparer les deux phases. Dans ce distributeur, présenté sur la Figure I- 64, la phase liquide s'accumule entre les canaux et la vapeur s'accumule en haut. Chaque phase est distribuée indépendamment dans les canaux. L'égalité des pressions hydrostatiques permet une distribution du liquide uniforme, pendant que l'uniformisation des pertes de pressions assurée par une profondeur d'intrusion égale, provoque une distribution uniforme de la phase gazeuse.

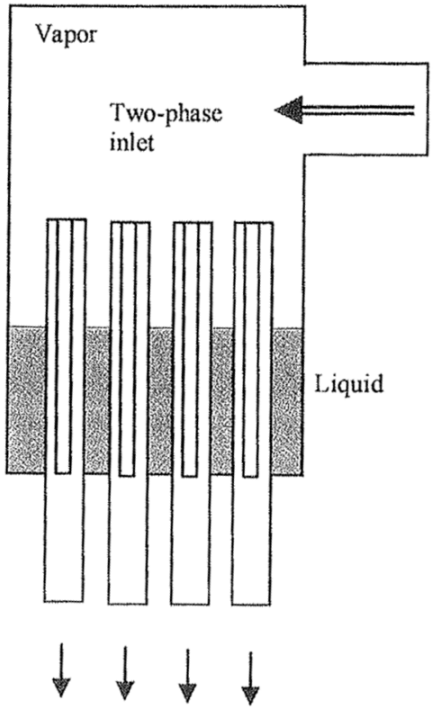


Figure I- 64 : Distributeur basé sur la séparation des phases, Hrnjak [2004].

6. Conclusion

Les écoulements diphasiques sont difficilement caractérisables, aussi bien dans leur profil de pertes de pression que pour leur distribution. Plusieurs auteurs ont étudié ces différents problèmes et ont essayé de les résoudre.

La distribution diphasique est un problème important dans les échangeurs, et beaucoup d'études ont été menées afin de comprendre ce phénomène et pouvoir l'améliorer. Les travaux expérimentaux conduits jusqu'à ce jour mettent en avant la complexité de ce phénomène et les difficultés inhérentes à la distribution diphasique d'un fluide. Des études numériques ont fourni des bons résultats pour des fluides monophasiques mais restent imprécises pour la distribution diphasique.

Cette partie a permis de présenter un état de l'art des études expérimentales sur le sujet. En considérant l'influence majeure de la géométrie sur la distribution du liquide et du gaz, les paramètres étudiés dans la littérature ainsi que leur effet ont été exposés.
Les données obtenues par différents auteurs et pour différentes configurations d'orientations du distributeur et des canaux, ont ensuite été confrontées entre elles. Il apparait clairement que ces paramètres étudiés sont très liés entre eux et qu'une amélioration de la distribution doit être un compromis entre les trois paramètres mis en avant (titre massique, densité de flux massique et profondeur d'insertion).
Finalement, des approches pour améliorer cette distribution diphasique ont été présentées. Les solutions proposées consistent généralement à générer un brouillard dans le distributeur, ou à séparer les deux phases ou encore les mélanger avant de les distribuer.

Les études présentées dans cette partie ne concernent que des échangeurs ayant des caractéristiques différentes des échangeurs utilisés dans l'industrie ou le tertiaire, notamment par exemple au niveau du nombre de canaux. En effet, l'étude d'un distributeur avec des centaines de canaux présenterait un problème métrologique, amplifié par l'ajout d'un collecteur. Des méthodes non intrusives pour qualifier la distribution diphasique dans de tels cas ont été présentées dans un article de revue de **Hrnjak [2004]**.

En cherchant comment intégrer une méthode active dans un échangeur afin d'améliorer la distribution plusieurs paramètres ont été pris en compte. En effet, la distribution semble améliorée lorsque la phase liquide est pulvérisée ou dispersée. De même, lorsque la structure de l'écoulement est « cassée » les phases sont mieux réparties. Cependant, la méthode ne doit pas ajouter trop de pertes de pression au risque de dégrader le procédé. Nous avons donc balayé différentes méthodes possibles et avons choisi parmi elles les ultrasons. En effet, depuis plusieurs années, les ultrasons sont utilisés dans les procédés pour différentes raisons. Le chapitre 2 se concentre donc sur les ultrasons, ses différentes utilisations et technologies et plus précisément celle que nous avons choisie d'étudier.

Chapitre II : Les ultrasons.

Le choix de la technologie des ultrasons s'inscrit dans une poursuite de l'introduction d'ultrasons dans les procédés afin d'améliorer l'efficacité de ceux-ci. La méthode d'utilisation des ultrasons choisie pour améliorer la distribution diphasique est la nébulisation. En effet cette technologie permet la création d'une fontaine, qui peut alors être dirigée vers les canaux reliés au distributeur. De plus, la création des fontaines perturbe la structure de l'écoulement et peut également créer une atomisation de la phase liquide. Cependant aucune étude n'a été faite regroupant la distribution diphasique et les ultrasons. De plus, les ultrasons dans un milieu en mouvement (avec un écoulement) sont peu étudiés. Et plus précisément, l'atomisation d'un liquide en mouvement n'a pas du tout été étudié. Le croisement de ces deux domaines est donc un nouveau champ d'investigation.

Ce chapitre permet de définir certaines généralités sur les ultrasons afin de mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu. Ensuite, les différentes utilisations des ultrasons seront exposées pour voir l'étendue des possibilités de cette technologie. Enfin, l'atomisation sera étudiée plus en détail, notamment par le biais de différentes études, dans le but de comprendre la logique de l'utilisation d'ultrasons dans un distributeur.

1. Généralités sur les ultrasons

1.1 Définitions

Les ultrasons sont, par définition, les ondes acoustiques ayant une fréquence supérieure à celles qui sont audibles par l'oreille humaine, c'est-à-dire de l'ordre de 16 à 20 kHz. Parmi les ultrasons, il est traditionnel de distinguer plusieurs classes. Les ultrasons basse fréquence sont ceux dont la fréquence est comprise entre 20 et 100 kHz. Compte tenu de leur puissance (supérieure à 10 W) ils sont également dits ultrasons de puissance et peuvent modifier le milieu de propagation. Entre 100 kHz et 1 MHz se trouvent des ultrasons haute fréquence de puissance intermédiaire. Au delà de 1 MHz, la puissance ultrasonore est généralement inférieure à 10 W et n'affecte pas le milieu de propagation. On parlera alors d'ultrasons de faible puissance. Au-delà de 1 GHz, on parlera d'hypersons.

L'énergie contenue dans une forme d'onde peut être convertie en une autre, comme par exemple à l'interface de deux milieux. Ces ondes ont des caractéristiques de propagation différentes (phase, vitesse, dispersion, atténuation, etc.). Dans une onde acoustique, il y a plusieurs composantes ; les principales sont les ondes de compression longitudinales et les ondes de cisaillement transversales. Les premières permettent d'observer un déplacement de la matière parallèle au sens de propagation de l'onde, alors que les secondes présentent un déplacement perpendiculaire au sens de propagation.

La longueur d'onde λ d'une onde est liée à la vitesse du son c dans le milieu ainsi que la fréquence de l'onde f, comme exposé sur la formule suivante :

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad \text{(II.1)}$$

La Figure II- 1 montre différentes longueurs d'ondes pour différentes fréquences mais également pour deux milieux différents. En effet, l'indice *w* permet d'identifier la longueur d'onde dans de l'eau et l'indice *a* dans de l'air.

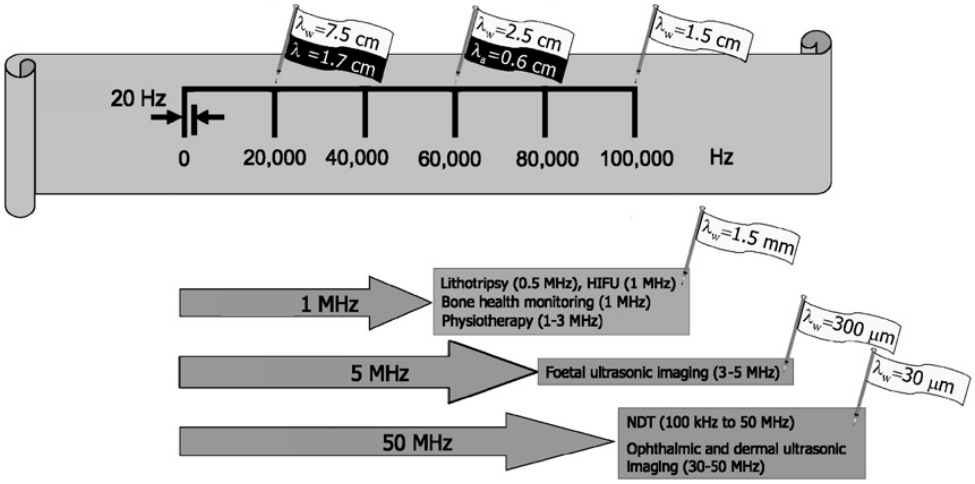


Figure II- 1 : Différents exemples de longueurs d'ondes, Leighton [2007].

1.2 Propagation sonore

1.2.1. Caractéristiques de l'onde sonore et pression acoustique

La production d'ultrasons se fait par l'intermédiaire d'un matériau vibrant dont une surface est en contact avec un fluide. Ce générateur transmet une vibration sinusoïdale au fluide. Une onde progressive se développe dans la direction perpendiculaire à la surface du matériau. Si on considère que le fluide est parfait (viscosité négligée) il n'y propagation que d'ondes longitudinales. Il sera supposé que les ondes étudiées sont des ondes planes. Au passage de l'onde le fluide est localement comprimé et étiré et sa pression en un point z (z = 0 étant la surface du matériau piézoélectrique) s'écrit :

$$P(z,t) = P_0 + dP(z,t) \qquad \text{(II.2)}$$

La variation $p(z,t) = dP(z,t)$ est appelée pression acoustique. Corrélées à ces variations locales de pression, des variations locales de volume sont produites au passage de l'onde. Ces deux variations sont liées entre elles par le coefficient de compressibilité du fluide

$$\chi = -\frac{1}{V}\frac{dV}{dP} \qquad \text{(II.3)}$$

Il est alors déduit : $$dP = p(z,t) = -\frac{1}{\chi}\frac{dV}{V} \qquad \text{(II.4)}$$

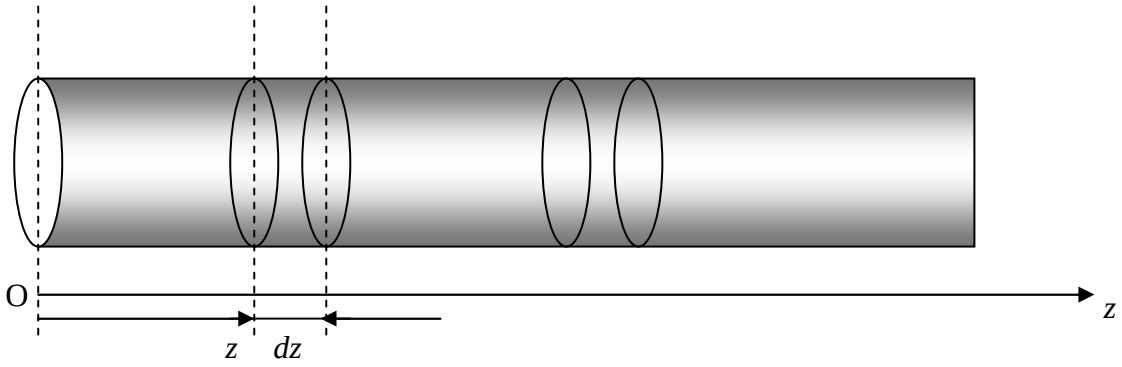


Figure II- 2 : Schéma de la propagation sonore.

Si on considère une colonne de fluide au dessus du générateur de section *S*, pour une tranche d'abscisse z, et d'épaisseur *dz* on peut définir le déplacement longitudinal de cette tranche *s(z,t)* dû à la perturbation.
Pour calculer la pression acoustique, la variation de volume engendrée par le passage de l'onde peut s'exprimer :

$$dV = S\left[s(z+dz,t)-s(z,t)\right] \tag{II.5}$$

Les déplacements étant faibles, on se limite au premier ordre :

$$s(z+dz,t)=s(z,t)+\frac{\partial s(z,t)}{\partial t}dz \tag{II.6}$$

Il est alors obtenu :

$$\frac{dV}{V}=\frac{\partial s(z,t)}{\partial z} \tag{II.7}$$

et, compte tenu de l'expression de la pression acoustique

$$p(z,t)=-\frac{1}{\chi}\frac{dV}{V}=-\frac{1}{\chi}\frac{\partial s(z,t)}{\partial z} \tag{II.8}$$

De plus, puisque les particules fluides se déplacent sous l'effet de l'onde, il peut être défini une vitesse particulaire v_p

$$v_p(z,t)=\frac{\partial z(z,t)}{\partial t} \tag{II.9}$$

On démontre que le déplacement *s* est solution de l'équation des ondes :

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2}=\frac{1}{\rho_0\,\chi}\,\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} \tag{II.10}$$

Le champ de déformation se propage le long de la colonne avec une vitesse

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho_0 \, \chi}} \tag{II.11}$$

Il peut être montré que la pression acoustique et la masse volumique varient suivant une équation similaire soit :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho_0 \, \chi} \, \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho_0 \, \chi} \, \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \tag{II.12}$$

Ainsi les champs des trois grandeurs se propagent à la même vitesse.

Si la surface du générateur vibre avec l'amplitude

$$s(0,t) = s_0 \, cos(\omega t) \tag{II.13}$$

à l'aide des équations de propagation, on déduit que

$$s(z,t) = s_0 \, cos\left(\omega\left(t - \frac{z}{c}\right)\right) \tag{II.14}$$

D'où la pression acoustique :

$$p(z,t) = -\frac{1}{\chi}\frac{\omega}{c} s_0 \, sin\,\omega\left(t - \frac{z}{c}\right) = p_0 \, sin\,\omega\left(t - \frac{z}{c}\right)$$

$$p(z,t) = -\, p_0 \, sin\,\omega\left(t - \frac{z}{c}\right) \tag{II.15}$$

p_0 étant l'amplitude de la pression acoustique qui peut également est écrite :

$$p_0 = \rho \, c \, \omega \, s_0 \tag{II.16}$$

La vitesse particulaire peut également être explicitée :

$$v_p(z,t) = -\,\omega \, s_0 \, sin\left(\omega\left(t - \frac{z}{c}\right)\right)$$

ou

$$v_p(z,t) = -\, v_{p0} \, sin\left(\omega\left(t - \frac{z}{c}\right)\right) \tag{II.17}$$

v_{p0} étant l'amplitude de la vitesse particulaire.

1.2.2. Densité volumique d'énergie. Pression de radiation.

L'énergie totale est la somme des énergies cinétiques dues à la vitesse des particules E_c et des énergies potentielles E_p. On démontre que $E_c = E_p$. L'énergie totale est donc $E_T = 2\,E_c = 2\,E_p$

A l'aide de l'expression précédente de la vitesse, on déduit l'expression suivante de la densité d'énergie:

$$e_T = \rho\,\omega^2\,s_0^2\,\sin^2\left(\omega\left(t-\frac{z}{c}\right)\right) \qquad \text{(II.18)}$$

avec sa valeur moyenne calculée sur une période :

$$\bar{e}_{z0} = \frac{1}{2}\rho\,\omega^2\,s_0^2 \qquad \text{en J.m}^{-3}\text{ ou Pa.} \qquad \text{(II.19)}$$

Cette densité d'énergie ayant la dimension d'une pression, s'appelle aussi pression de radiation P_R.

1.2.3. Intensité acoustique

L'intensité acoustique I est la puissance par unité de surface transportée par l'onde, soit :

$$I = p(z,t)\,v_p$$

soit

$$I = -\frac{1}{\chi}\frac{\partial s}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial t} \qquad \text{(II.20)}$$

et en explicitant :

$$I(z,t) = \frac{1}{\chi}\frac{\omega^2\,s_0^2}{c}\sin^2\left(\omega\left(t-\frac{z}{c}\right)\right) = \rho\,c\,\omega^2\,s_0^2\,\sin^2\left(\omega\left(t-\frac{z}{c}\right)\right) \qquad \text{(II.21)}$$

et prenant la moyenne temporelle :

$$\bar{I}_{z0} = \frac{1}{2}\rho\,c\,\omega^2\,s_0^2 \qquad \text{(II.22)}$$

Il peut alors être remarqué que

$$\bar{I}_{z0} = c\,P_R \qquad \text{(II.23)}$$

L'intensité acoustique peut également être liée à l'amplitude de la pression acoustique par :

$$I = \frac{p_0^2}{2\,\rho\,c} \qquad \text{(II.24)}$$

1.2.4. Impédance acoustique

L'impédance acoustique d'un milieu Z est définie comme le rapport de l'amplitude de la pression acoustique sur l'amplitude de la vitesse particulaire.

$$Z = \frac{p_0}{v_{p0}} \quad \text{soit} \quad Z = \rho\, c \tag{II.25}$$

Il peut être constaté que c'est une propriété intrinsèque du milieu dans lequel se propage l'onde.

Reprenant l'expression de l'intensité, il peut être écrit :

$$I = \frac{1}{2} Z\, \omega^2\, s_0^2 \tag{II.26}$$

L'intensité est donc le produit d'une quantité intrinsèque du milieu par une quantité intrinsèque de l'onde.

Compte tenu des valeurs de ρ et de c, il peut être observé que :

$$Z_{gaz} << Z_{liquide}$$

Une même onde se propageant dans un gaz est beaucoup moins intense que dans un liquide. D'autre part, puisque I augmente avec ω

$$I_{ultrasons\ dans\ un\ liquide} >> I_{inf\ rasons\ dans\ un\ gaz}$$

1.2.5. Passage d'un milieu à un autre.

Lorsqu'une onde acoustique rencontre l'interface entre deux milieux notés (1) et (2), une partie de l'énergie de l'onde incidente s_i passe dans le milieu (2) où elle donne naissance à une onde transmise s_t. Le reste de l'énergie revient dans le milieu (1) où elle est transportée par l'onde réfléchie s_r.

A l'interface, il y a l'égalité des résultantes des vitesses :

$$v_{pi} + v_{pr} = v_{pt} \tag{II.27}$$

ainsi que la continuité des pressions :

$$p_i + p_r = p_t \tag{II.28}$$

soit, compte tenu des directions des vitesses :

$$Z_1\, v_{pi} - Z_1\, v_{pr} = Z_2\, v_{pt} \tag{II.29}$$

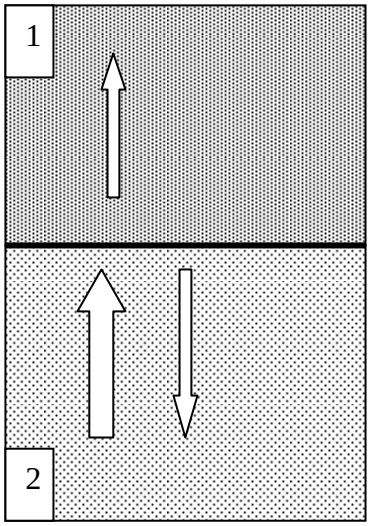


Figure II- 3 : Schéma de l'interface de deux milieux différents.

1.2.6. Facteurs de réflexion et de transmission en amplitude des déplacements.

Lorsque l'on effectue les rapports des amplitudes des déplacements *s* au passage de l'interface, on définit un facteur de réflexion *r* et un facteur de transmission *t*. Remarquant que :

$$r = \frac{s_r}{s_i} = \frac{v_{pr}}{v_{pi}} \quad \text{et} \quad t = \frac{s_t}{s_i} = \frac{v_{pt}}{v_{pi}} \tag{II.30}$$

Il est donc obtenu :

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{et} \quad t = \frac{2\,Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{II.31}$$

1.2.7. Facteurs de réflexion et de transmission des pressions acoustiques

Il peut également être défini des facteurs de réflexion et de transmission pour les pressions acoustiques, soit :

$$r_p = \frac{p_r}{p_i} \qquad \text{et} \qquad t_p = \frac{p_t}{p_i} \tag{II.32}$$

Avec les conditions de continuité déjà définies, on obtient :

$$r_p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \qquad \text{et} \qquad t_p = \frac{2\,Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{II.33}$$

Il peut être observé que compte tenu du déphasage des pressions par rapport aux déplacements, des équations différentes sont obtenues.

1.2.8. Facteurs de réflexion et de transmission en énergie

En utilisant l'expression de l'intensité acoustique

$$I_i = \frac{1}{2} Z_1 \omega^2 s_{0i}^2 = \frac{1}{2} Z_1 v_{poi}^2$$

$$I_r = \frac{1}{2} Z_1 \omega^2 s_{0r}^2 = \frac{1}{2} Z_1 v_{por}^2 \qquad \text{(II.34)}$$

$$I_t = \frac{1}{2} Z_1 \omega^2 s_{0t}^2 = \frac{1}{2} Z_1 v_{pot}^2$$

Il est défini des facteurs de réflexion et de transmission pour les intensités :

$$R = \frac{I_r}{I_i} \qquad \text{et} \qquad T = \frac{I_t}{I_i} \qquad \text{(II.35)}$$

et il est remarqué que

$$R = \frac{v_{pr}^2}{v_{pi}^2} \qquad \text{(II.36)}$$

Soit

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \qquad \text{(II.37)}$$

De même, il est obtenu un facteur de transmission

$$T = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \qquad \text{(II.38)}$$

1.2.9. Coefficient d'absorption

L'onde se propageant dans un milieu subit des pertes de son énergie le long de son parcours. Ces pertes, dues notamment à l'absorption (la conversion de l'énergie acoustique en chaleur), dépendent donc de la distance parcourue par l'onde. Le paramètre α caractérise l'absorption du milieu et en général, augmente fortement avec la fréquence. L'atténuation de l'onde augmentant avec la propagation, l'intensité au point 2 à une distance x_2 de la source, par rapport au point 1 qui est à une distance x_1 peut s'exprimer de la façon suivante :

$$I_2 = I_1 e^{-\alpha(x_2 - x_1)} \qquad \text{(II.39)}$$

Le paramètre α utilisé ici est le double de celui qui concerne l'atténuation de la pression ou du déplacement.

1.2.10. Hauteur de la fontaine

Une fontaine de liquide peut être créée à l'interface liquide – gaz sous l'action d'un faisceau d'ultrasons se propageant dans le liquide et rencontrant cette interface. La hauteur h de la fontaine au dessus d'une interface au repos peut être calculée en faisant le bilan des forces :

$$\rho\, g\, h - \sigma\, \kappa = P_R \qquad \text{(II.40)}$$

Dans cette formule, σ est la tension de surface et κ la courbure de l'interface perturbée. La pression radiative P_R est celle qui existe au niveau de l'interface liquide – gaz. Différentes formulation de h ont été publiées. On peut rappeler celle citée par Issenmann et al. pour un faisceau incident de symétrie cylindrique, de forme gaussienne et de largeur à mi-hauteur ω_o, et perpendiculaire à l'interface:

$$h = \frac{p_0^2\, \omega_0^2}{8\, \sigma\, \rho\, c^2}\, exp\left(\frac{\rho\, g\, \omega_0^2}{8\, \sigma}\right) E_1\left(\frac{\rho\, g\, \omega_0^2}{8\, \sigma}\right) \qquad \text{(II.41)}$$

où E_1 est la fonction exponentielle intégrale.

Ces différentes définitions vont permettre d'analyser les différentes applications décrites dans les chapitres suivants

1.3 Domaines d'utilisation

Les domaines d'utilisation sont nombreux et sont également liés aux catégories exposées en début de chapitre (Figure II- 1). En effet, suivant la puissance nécessaire, la catégorie 1 ou 2 sera plus adaptée. La Figure II- 4 représente ce choix pour le couple puissance – fréquence.

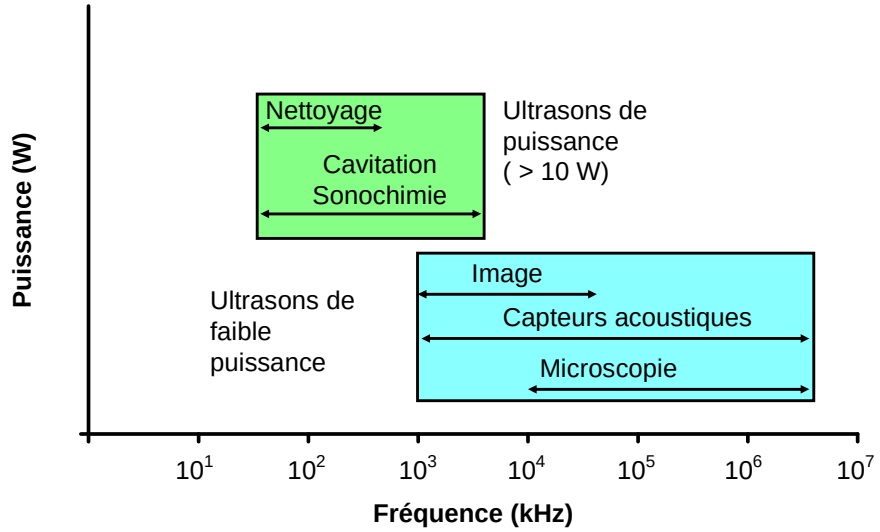


Figure II- 4 : Utilisation des ultrasons suivant la puissance et la fréquence.

Une des utilisations les plus connues est l'utilisation des ultrasons dans la médecine. En effet, les ultrasons permettent les échographies qui font dans ce cas un diagnostic. Toujours dans ce domaine, mais en thérapie, il y a la thermothérapie par ultrasons focalisés. Ceci a pour but d'émettre un signal ultrasonore assez puissant pour provoquer un échauffement voire une destruction des cellules ciblées. Cette technique est notamment utilisée pour détruire les calculs rénaux.

Dans les laboratoires (Chimie, biologie) les ultrasons sont aussi utilisés pour nettoyer du matériel, en utilisant par exemple un bain à ultrasons. Le nettoyage par ultrasons est également utiliser pour des bijoux ou encore des puces d'ordinateurs. Cette technique peut également être utilisée dans l'industrie afin de nettoyer certaines pièces qui serait par exemple encrassées. Les vibrations peuvent en effet « détacher » les éléments néfastes de l'objet à nettoyer. Ces nettoyages sont pratiques notamment pour les objets avec une forme compliquée. De plus, le fait qu'aucune autre pièce ne vienne toucher celle à nettoyer est un avantage car il n'y a pas de frottement et donc moins de dégradations.

En continuant dans l'industrie, les ultrasons peuvent être utilisés pour la soudure de métaux non ferreux ou bien encore la découpe de matériaux thermoplastiques. La puissance des ultrasons étant élevée, la focalisation de celle-ci sur une petite surface permet de provoquer un fort échauffement local. Cela a également l'avantage de permettre une soudure propre et de ne pas avoir besoin d'agent de soudage. Mais ces soudures ne sont donc possibles qu'avec certains matériaux (thermo fusibles).

Pour les procédés alimentaires, les ultrasons peuvent également être utilisés à beaucoup de niveaux. Par exemple, ils permettent de chauffer de la nourriture. L'avantage de cette méthode est l'uniformité du chauffage, cela prend également moins de temps et en plus améliore le transfert de chaleur. La congélation, le séchage sont également des procédés de l'industrie agroalimentaire qui peuvent être fait à l'aide des ultrasons. Pour ce domaine, la découpe avec ultrasons peut être utilisée mais cependant, elle n'est possible que sur des produits « fragiles » comme par exemple des gâteaux ou du fromage.

En changeant complètement de domaine, les sonars utilisent les ultrasons afin de pouvoir mesurer les distances et les particularités d'un milieu. Cela peut donc par exemple pour un sous-marin, permettre de déterminer une carte du milieu environnant et ainsi éviter les obstacles.

Toujours dans le domaine des ultrasons en tant que moyen permettant de déterminer une grandeur, il existe des débitmètres à ultrasons. Ces débitmètres ont l'avantage de ne pas altérer l'écoulement car ils ne sont pas intrusifs et de permettre une installation rapide.

Une technique qui se rapproche plus de notre étude est l'ajout d'ultrasons afin d'intensifier les échanges thermiques. Les ultrasons font vibrer l'ensemble de l'échangeur et permettent de créer plus de turbulences dans l'écoulement du fluide.

Enfin la dernière technologie citée est la nébulisation ou atomisation. Celle-ci permet par exemple en agriculture de « transformer » de l'eau en aérosol afin d'alimenter le système racinaire en eau et en oxygène. Elle est également fortement utilisée en pharmaceutique. Cette méthode est celle qui a été choisie pour l'étude de l'amélioration de la distribution dans ce mémoire.

2. L’atomisation

2.1 Les différentes technologies

Le principe d’atomisation est de désintégrer une couche de liquide en particules de très faible grandeur, c'est-à-dire en fines gouttes dans une phase gazeuse. Cette transformation peut être effectuée par le biais de différentes techniques. L’atomisation peut se faire par exemple par le biais d’une technologie pneumatique, un aérosol à disque en rotation ou bien ultrasonique. Cette dernière est celle sur laquelle nous nous sommes concentrés. Dans cette étude, nous parlerons d’atomisation d’un milieu liquide. Les appareils que nous allons étudier sont des nébuliseurs ; ils permettent de transformer la phase liquide en un nuage de fines particules, similaire à un brouillard. Un nébuliseur ultrasonique va agir par le biais d’une surface vibrante générant des ultrasons.

Dans la technologie de l’atomisation à l’aide d’ultrasons, il y a plusieurs catégories dont les atomiseurs piézo-électriques (avec ou sans bec) ou alors les ondes acoustiques de surface.

Cette seconde catégorie est relativement moins répandue que les deux autres et fonctionnent avec des fréquences de l’ordre de 10-500 MHz. L’onde acoustique de surface est une onde acoustique d’une amplitude de l’ordre du nanomètre qui se propage le long et près de la surface d’un monocristallin substrat piézo-électrique. Le mouvement aléatoire est rapidement atténué avec la profondeur du substrat et est totalement absent pour une profondeur de quatre à cinq fois la longueur d’onde. En revanche, ce système permet de propager l’onde sur une distance supérieure à un millier de longueurs d’onde (plusieurs centimètres). Ce dispositif est donc utilisé avec des couches de liquide de faible épaisseur (Figure II- 5).

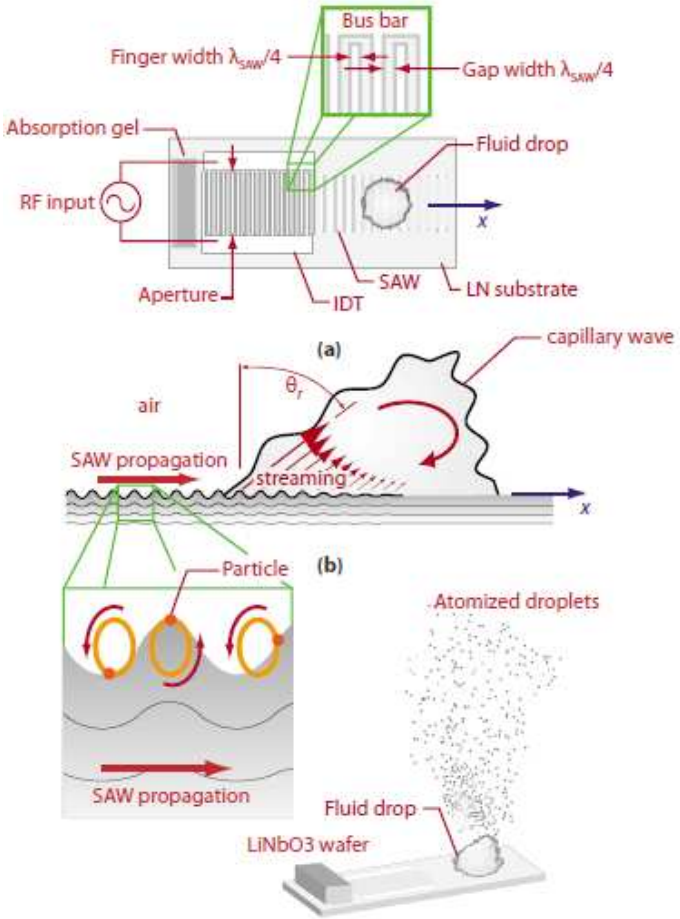


Figure II- 5 : Exemple d'un nébuliseur avec ondes de surface, Qi et al. [2008].

La première catégorie qui avait été cité est les atomiseurs ultrasoniques piézo-électriques. Dans cette catégorie, les nébuliseurs ultrasoniques utilisent un dispositif piézo-électrique qui peut opérer pour un large éventail de fréquence. Il existe des nébuliseurs avec une fréquence de 30-40kHz et d'autres avec des fréquences de l'ordre de 1MHz. L'avantage des piézo-électriques est notamment de produire des gouttes avec une faible quantité de mouvement. De plus la distribution de ces gouttes est assez uniforme, et leur taille est plus petite que les autres types d'atomiseur. Il faut également noter que cette taille peut être contrôlée « facilement » par le biais de la fréquence. Ces atomiseurs possèdent, contrairement aux ondes acoustiques de surface, une focalisation qui va permettre de nébuliser le fluide. Deux types d'atomiseur peuvent cependant être identifiés, ceux avec un bec et ceux sans.

Les atomiseurs possédant un bec possèdent une entrée pour le fluide à atomiser puis donnent une direction au brouillard, comme le montre la Figure II- 6.

Figure II- 6 : Photo d'un nébuliseur avec bec.

Les atomiseurs qui nous intéressent le plus sont les piézo-électriques où le disque n'est pas entouré de structures géométriques pour le faire fonctionner. Ces nébuliseurs permettent par exemple d'être placées au fond d'un récipient pour en atomiser le contenu. Les atomiseurs ultrasoniques ont une durée de vie moyenne de l'ordre de 10 000 heures. Ceux fabriqués par TDK sont présentés sur la Figure II- 7.

Figure II- 7 : Exemples des nébuliseurs avec disque piézo-électrique.

2.2 Les nébuliseurs à ultrasons

L'atomisation sert donc à produire un brouillard qui est composé de fines gouttes. Cependant, la formation des gouttes n'est pas encore un phénomène totalement compris. Deux hypothèses se font face sur le mécanisme de formation des gouttes. En effet, deux phénomènes expliquant le mécanisme de la désintégration liquide pendant l'atomisation ultrasonique existent. Un schéma simplifié de ce phénomène est présenté sur la Figure II- 8.

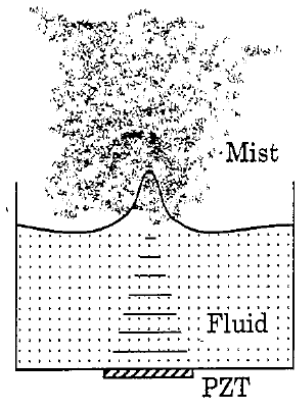


Figure II- 8 : Schéma d'une fontaine ultrasonore, Kurosawa et al. [1995].

La première, est l'hypothèse des ondes capillaires, qui sont les ondes apparaissant à la surface du liquide. L'hypothèse est basée sur l'instabilité de Taylor. Les ondes capillaires sont composées de pic, de nœuds et de ventre. L'atomisation apparait lorsque les oscillations déchirent les ventres des ondes capillaires de la surface liquide. Les gouttes sont donc créées au niveau des ventres de ces ondes et sont alors proportionnelles à cette longueur d'onde (Diamètre D=0,5λ). Cette dernière diminue lorsque la fréquence augmente ce qui fait apparaître des gouttes fines pour des hautes fréquences et ainsi l'apparition de brouillard. Le fait qu'une relation forte entre le diamètre moyen des gouttes et la longueur d'onde favorise cette thèse. Différents auteurs ont réalisé des travaux en faveur de cette hypothèse. Celle-ci fut exposée en premier par **Esche [1955]** et **Lang [1962]** qui dans un article a donné la formule suivante concernant le diamètre des gouttes :

$$D = 0.34\left(\frac{8\pi\sigma}{\rho F^2}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad \text{(II.42)}$$

Le diamètre *D* des gouttes produites est donc fonction de la fréquence d'excitation *F*, la densité du liquide ρ et enfin de la tension de surface σ de ce dernier. Cette formule est issue d'un raisonnement basé sur l'hypothèse des ondes capillaires. Dans cette formule, la fréquence prise au niveau de la surface correspond à la moitié de la surface d'excitation, car comme expliqué précédemment, le diamètre des gouttes est proportionnel à la longueur d'onde. Ceci provient du travail de Faraday qui avait observé cette relation dans le mercure et d'autres fluides. Depuis ces travaux, le comportement non linéaire des ondes capillaires a été démontré ce qui peut changer certains paramètres dans la relation. Cependant elle semble être toujours utilisée, malgré les évidences physiques contraires.

Le coefficient en début de formule est défini expérimentalement. **Paneva *et al.* [1997]** ont testés différentes constantes (0.33, 0.34 et 0.53) correspondant à différents diamètres moyen de gouttes. Les meilleurs résultats sont obtenus avec la constante utilisée par Lang R.J. Ce coefficient est donc certes déterminé expérimentalement mais semble être le plus juste pour cette formule. Cependant, la formule de Lang ne semble pas en souffrir car elle est encore souvent utilisée pour la détermination du diamètre des gouttes lors d'une nébulisation.

La formule de Lang, ne tient pas compte de certains paramètres, comme par exemple la viscosité du liquide ou encore de l'amplitude de l'onde sonore. D'autres auteurs ont tentés d'intégrer ces différents paramètres pour déterminer le diamètre des gouttes formées**. Rajan et Pandit [2001]** proposent une formule prenant en compte le débit, la viscosité et l'intensité de la puissance ultrasonique avec pour base la formule de Lang. Par différentes approches il propose ensuite différentes équations basées sur l'instabilité de Rayleigh, la relation de Walzel ou encore l'approche de Davies. Une corrélation est enfin proposée grâce aux résultats expérimentaux se présentant sous la forme suivante.

$$D = constante.(f)^{-0.66}(Q)^{0.207}(T)^{0.11}(\rho)^{-0.274}(\eta)^{0.166}\left(puissance/surface\right)^{-0.4} \qquad \text{(II.43)}$$

Q étant le débit volumique par seconde et η la viscosité du fluide. La tension de surface T n'influençant plus la taille des gouttes au-delà d'une valeur de 0,035N.m^{-1}.

Ils montrent également que le diamètre des gouttes est proportionnel à plusieurs nombres adimensionnels, tels que Weber, Ohnesorge.

La deuxième hypothèse est celle des cavitations, exprimée par **Il'in and Eknadiosyants [1967]**. Les travaux de **Söllner [1936]** avaient également mise en évidence le phénomène de cavitation dans un liquide lors de l'ajout d'ultrasons. Lorsqu'un liquide est soumis à des ondes, des bulles de cavitation sont formées. Lorsque celles-ci implosent, surtout celles proches de la surface, des chocs hydrauliques de forte intensité sont générées. Ces chocs hydrauliques initient la désintégration du film liquide et provoquent une éjection directe de gouttes. Cette hypothèse est supportée par le fait que l'atomisation soit dépendante des ultrasons.

Les deux hypothèses ne sont, à ce jour, pas encore départagées. Le choix de l'un ou de l'autre se fera en fonction du choix de la méthode d'observation et également du but de celle-ci.

La taille des gouttes peut donc dépendre de plusieurs paramètres et la corrélation dépend aussi de l'approche utilisée. Dans l'ensemble, nous voyons que le diamètre des gouttes est inversement proportionnel à la fréquence d'utilisation qui elle, n'est pas une caractéristique du

fluide. Cependant, la fréquence optimale correspond généralement à la fréquence de résonance du piézo-électrique. Donc si l'on change la fréquence, l'efficacité de l'atomisation risque de se voir réduite. Il y a donc un compromis entre la taille des gouttes et l'efficacité de l'appareil.

Cette fréquence peut être changée directement en changeant les valeurs de certains composants du circuit du générateur d'impulsions. De plus la fréquence de résonances est liée au diamètre et à l'épaisseur du disque piézo-électrique, comme le montre la Figure II- 9. La fréquence optimale est donc liée à un disque piézo-électrique particulier. Cette figure est issue de la brochure de la société TDK vendant les nébuliseurs, c'est également le cas pour les figures II- 9, 10 et 11.

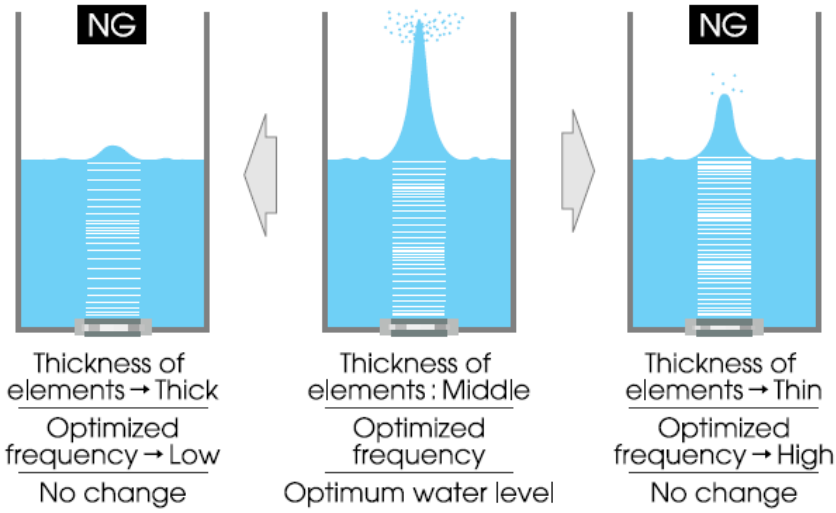


Figure II- 9 : Effet de l'épaisseur du disque piézo-électrique sur la nébulisation.

La fréquence de fonctionnement peut donc être changée. **Donnelly *et al.* [2005]** ont testés différentes fréquences avec un même disque piézo-électrique. Pour changer ce paramètre, les valeurs des condensateurs étaient changées, comme nous pouvons le voir sur le schéma (Figure II-10) du circuit électrique. Ainsi ils pouvaient obtenir la fréquence optimale pour différents disques piézo-électriques avec des épaisseurs différentes.

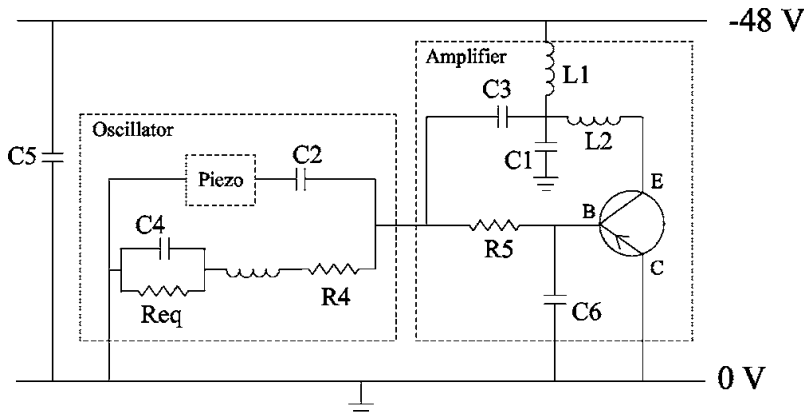


Figure II- 10 : Schéma d'un circuit d'alimentation d'un disque piézo-électrique.

Wagner *et al.* [2000] ont testés trois différentes fréquences d'excitation : 1,7, 3,3 et 4MHz et ceci sans changer le matériel et donc en gardant le même disque piézo-électrique. Aucune influence négative n'a été observée sur la tension de surface du liquide. Cependant sa valeur diminue tout comme la taille des gouttes, comme vu précédemment, qui ont diminué avec

l'augmentation de la fréquence. La conclusion de cette revue est que le fait d'augmenter la fréquence de fonctionnement n'apporte pas d'améliorations significatives sur l'atomisation.

Un autre aspect à prendre en compte avec la taille des gouttes est le rôle de la gravité. Celui-ci se fera de plus en plus grand pour des diamètres de gouttes plus importants. En effet, les gouttes formées s'éloignent de la surface du liquide mais à partir d'une certaine hauteur, une partie d'entre elles vont retomber vers la surface. Cette descente des gouttes peut diminuer l'efficacité des nébuliseurs car lorsqu'elles rencontrent des gouttes ascendantes, elles vont s'assembler et donc former une plus grosse goutte. Celle-ci sera alors attirée vers la surface. De cette façon l'efficacité peut être grandement atteinte. C'est pourquoi le fabricant TDK par exemple, a incliné les disques piézo-électriques par rapport à l'horizontal. De cette façon les gouttes qui retombent sont moins gênantes. L'angle d'inclinaison est de 7° et a été déterminé expérimentalement : c'est celui pour lequel l'efficacité était la meilleure.

Plusieurs autres paramètres sont important avec ce type de nébuliseur pour obtenir une bonne atomisation, telle que la fréquence de fonctionnement, mais les propriétés physiques de la phase liquide jouent un rôle non négligeable. Nous avons parlé principalement de la taille des gouttes dans les paragraphes précédents et nous observons bien que celle-ci n'est pas simple à déterminer mais qu'elle peut être facilement ajustée avec simplement la fréquence.

En plus de la taille des gouttes, le débit de brouillard produit par l'appareil est caractéristique de l'efficacité de l'atomisation. Cette caractéristique peut être influencée par plusieurs paramètres comme par exemple la hauteur de liquide au-dessus de l'élément piézo-électrique, de la température du liquide et également la puissance envoyée au nébuliseur.

La hauteur de fluide au-dessus du disque piézo-électrique va également avoir une influence non négligeable sur la nébulisation. Il existe une hauteur de liquide optimale pour laquelle l'atomisation sera la meilleure. Une hauteur différente diminuera l'efficacité de l'appareil, que cela soit inférieur ou supérieur. Cette hauteur particulière est liée au spectre des fréquences. Par conséquent, si la fréquence change, la hauteur optimale changera également. Les disques piézo-électriques ont une focalisation et si la surface de l'interface liquide/air correspond à ce point, l'atomisation sera la meilleure possible. L'influence de la hauteur d'eau est schématisée sur la Figure II- 11.

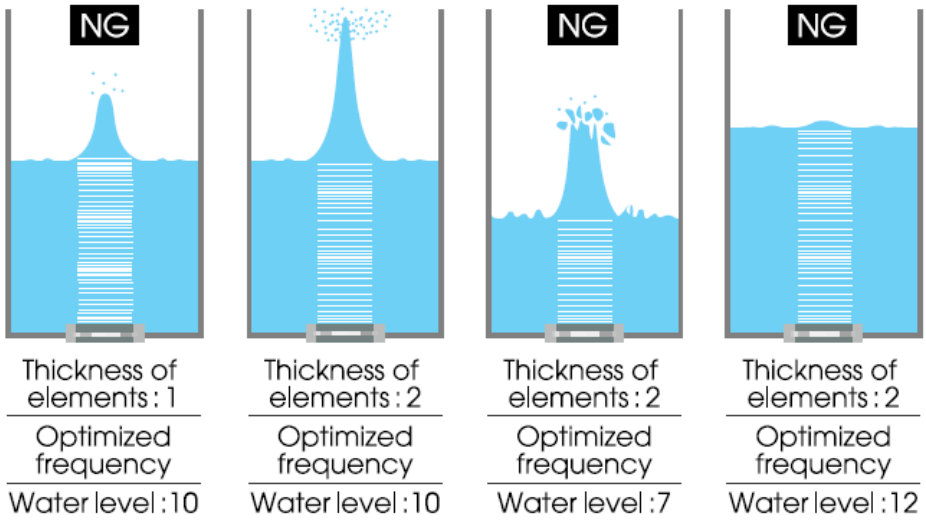


Figure II- 11 : Effet de la hauteur d'eau sur la nébulisation.

TDK fournit également un graphique qui expose le débit du brouillard en fonction de la hauteur de fluide. Comme il peut être observé sur la Figure II- 12, les résultats expérimentaux montrent bien un maximum pour une seule valeur (ici 4 cm pour une alimentation de 48V). Pour des hauteurs inférieures ou supérieures, le débit diminue de presque 150 ml/h pour 1cm.

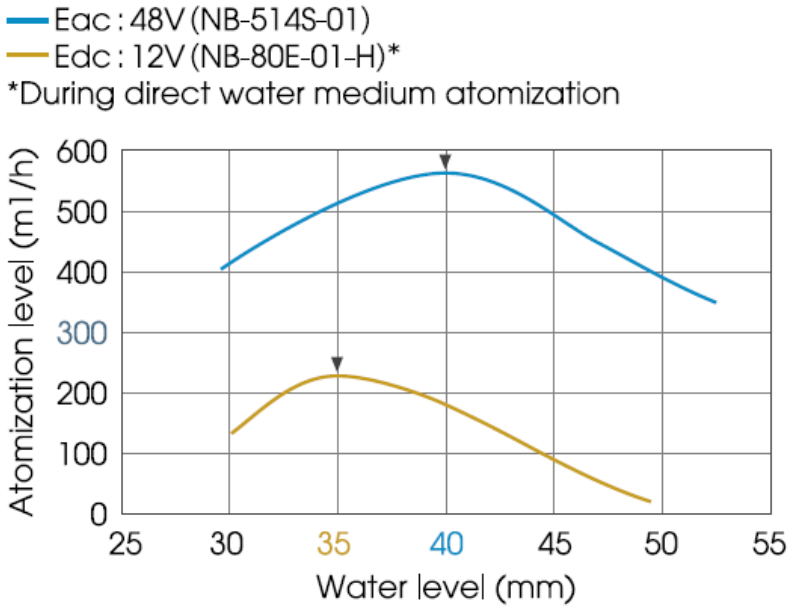


Figure II- 12 : Evolution du débit de liquide atomisé par rapport au niveau de l'eau.

La température a, elle aussi un effet, car elle va changer les propriétés du fluide (Figure II-13). Les nébuliseurs de TDK permettent de nébuliser un liquide entre 0 et 45°C. Mais le débit d'atomisation est proportionnel à la température du liquide. En effet, la tension de surface va diminuer avec l'augmentation de la température.

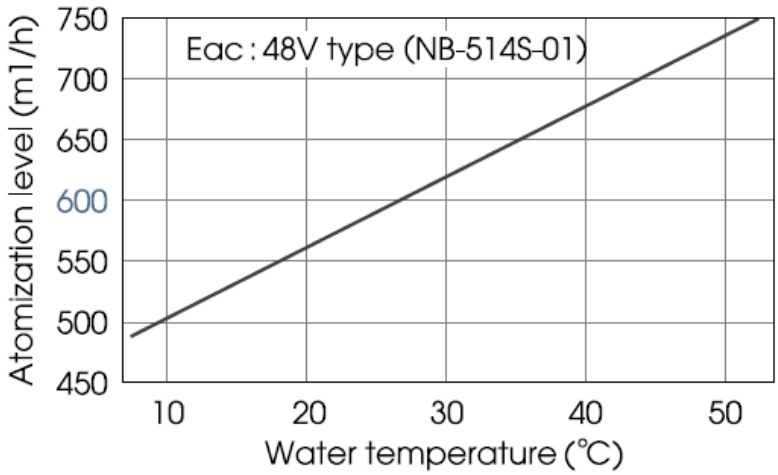


Figure II- 13 : Evolution du débit de liquide atomisé par rapport à la température de l'eau.

Cette tension de surface est très influente sur l'atomisation, comme vu dans la corrélation de Lang. De plus, la viscosité est également intégrée dans la seconde équation exposée. Ces deux caractéristiques sont importantes mais l'une peut prendre le pas sur l'autre en fonction du fluide et donc des valeurs de ces deux grandeurs.

3. Etudes expérimentales sur les ultrasons

Cette partie expose les principales études menées sur les ultrasons concernant le domaine de l'étude de ce mémoire. Les différents travaux sont présentés dans un ordre chronologique afin de suivre la progression des recherches.

3.1 Hypothèses sur le phénomène d'atomisation.

Les premières études concernant notre sujet sur les ultrasons ont été menées par **Söllner [1936]** qui a étudié la cavitation causée par les ondes ultrasonores dans un liquide. Cependant la cavitation avait déjà été observée par **Kundt et Lehmann [1874]** avec des fréquences de sons inférieures à celles des ultrasons.

Lang [1962] a étudié le mécanisme avec lequel une vibration ultrasonique d'une surface d'un liquide permet l'atomisation. Le but de cette étude était de mesurer la taille de la perturbation créée par les ultrasons sur la surface de liquide et la comparer avec la taille de la particule. Il a été testé trois « catégories » de fréquence : les faibles fréquences (12 à 20 kHz), qui était réalisées avec une fine plaque de métal sur laquelle était placé le liquide. Cette plaque, comme le montre la Figure II-14 vibrait grâce à l'action d'un émetteur à ultrasons en aluminium.

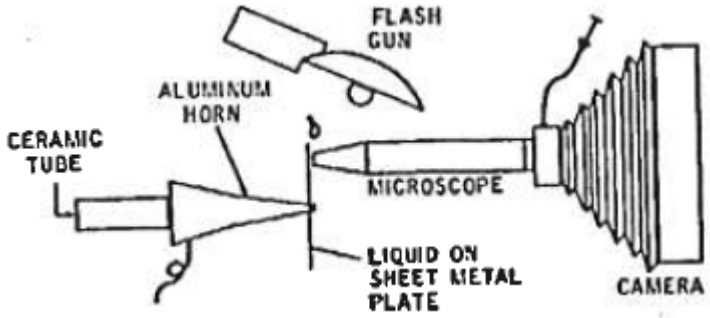


Figure II- 14 : Schéma du dispositif expérimental pour les faibles fréquences, Lang [1962].

Pour la deuxième catégorie : les fréquences intermédiaires sont dans la gamme 100 à 400kHz. Le dispositif expérimental est constitué d'une ampoule en verre étirée. Elle vibrait par le biais de la concentration du son depuis un réflecteur concave. Le schéma est présenté sur la Figure II- 15. Pour la dernière catégorie, qui concerne donc les hautes fréquences, la vibration était assurée par un transducteur, dispositif qui permet de convertir une grandeur en une autre, ici cela permettait de produire les ultrasons à partir d'un signal électrique. Le schéma de l'installation reste cependant grossièrement le même.

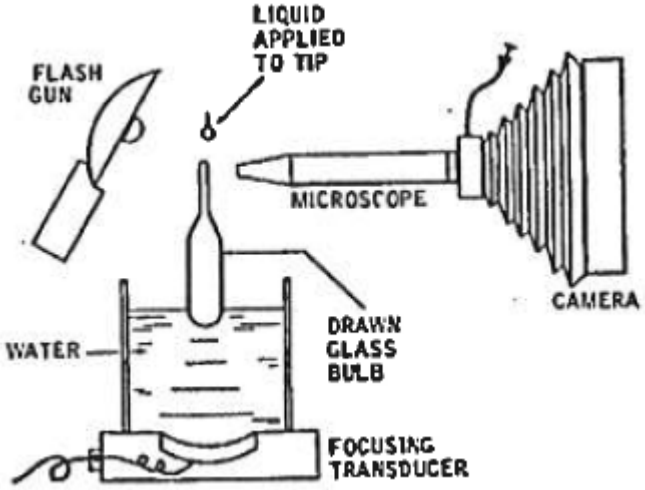


Figure II- 15 : Schéma du dispositif expérimental pour les fréquences intermédiaires, Lang [1962].

Toutes ces expériences sont faites avec un film de liquide assez fin. Mais l'auteur n'indique pas la valeur de cette hauteur. Des essais complémentaires ont également été réalisés pour des hauteurs de liquide plus importantes. Ceci a demandé de changer le dispositif expérimental, comme le montre la Figure II- 16.

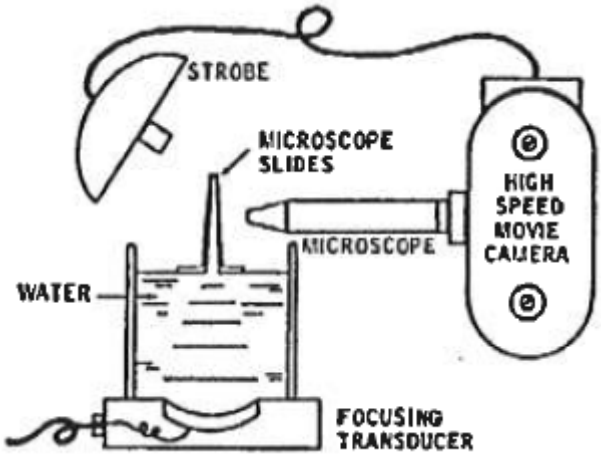


Figure II- 16 : Schéma du dispositif expérimental pour des hauteurs d'eau importantes, Lang [1962].

Cette expérience a été faite dans le but de déterminer si les mêmes perturbations de surface se produisaient lorsque la hauteur d'eau était importante. Le transducteur a été utilisé pour ce cas. La fontaine a été observée latéralement. Pour ce faire, deux plaques en verre ont été placées proche l'une de l'autre.

Dans la plupart des cas, le fluide utilisé était de l'eau, mais quelques essais ont été effectués avec de l'huile. Les images des surfaces vibrantes, qui étaient prises pour des puissances faibles pour ne pas avoir d'atomisation, aussi bien pour l'eau que pour l'huile, montraient des ondes capillaires stationnaires. Ces ondes étaient observées à basse fréquence et hautes fréquences, et sur les films fins de liquide aussi bien que sur ceux plus épais. La différence entre les différentes fréquences s'exprimait à la longueur des ondes. En effet, les ondes étaient plus « petites » pour les hautes fréquences. D'après les auteurs, cette observation était attendue, en se référant à l'équation de Kelvin :

$$\lambda^3 = \frac{2\pi T}{\rho f^2} \qquad \text{(II.44)}$$

Cependant il a été montré que la fréquence des ondes capillaires à la surface était égale à la moitié de la fréquence d'excitation. L'équation précédente devient alors la suivante :

$$\lambda = \left(\sqrt{\frac{8\pi T}{\rho f^2}} \right)^{1/3} \qquad \text{(II.45)}$$

D'après ces données, l'auteur a conclu que les ondes capillaires jouent un rôle prépondérant dans le procédé de l'atomisation ultrasonique. Il expliquait que, sous une vibration d'excitation suffisante qui permet une amplitude rendant l'onde instable. Les pics des ondes à la surface se « cassent », ce qui permet au liquide d'être éjecté de la surface dans l'air sous forme de gouttes. Il insiste cependant sur le fait que d'autres études doivent être menées par la suite afin de mieux comprendre en détail les mécanismes impliqués dans l'atomisation.

Il'in and Eknadiosyants [1967] ont développé une autre théorie, une autre approche sur les mécanismes misent en jeu lors de l'atomisation d'un liquide. En se basant sur l'étude de **Sollner [1936]** qui désigne la cavitation comme mécanisme principal de l'atomisation, ils ont menés différentes expériences pour observer l'influence de la température et de la pression statique du milieu gazeux sur ce procédé d'atomisation. En étudiant la formation du brouillard, ils se sont aperçus que celui-ci se formait lors d'impulsions à intervalle régulier. Cet intervalle était dépendant de la puissance ultrasonore ainsi que de la température du liquide. Plus ces paramètres augmentaient, plus l'intervalle diminuait. La formation de ce brouillard est visible sur la Figure II-17.

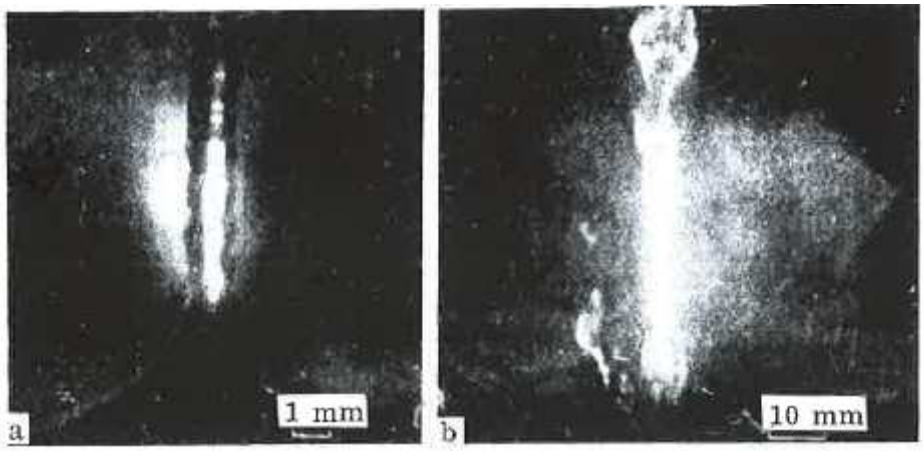


Figure II- 17 : Formation du brouillard par atomisation, Il'in et al. [1967].

L'apparition d'un brouillard par « pulse » est, d'après les auteurs, le signe d'une explosion d'une cavitation dans le liquide de cette région. Pour toutes leurs expériences, la cavitation a à chaque fois accompagnée l'atomisation.

Ils observent également un seuil pour lequel l'atomisation se produit. Ce seuil est fonction de plusieurs paramètres comme la température et la nature du fluide. Ce seuil est lié à la facilité pour la cavitation de se produire.

En continuant sur le phénomène de la cavitation, ils ont étudié l'influence du dégazage d'un fluide sur l'atomisation en enlevant donc le gaz présent dans celui-ci. Le résultat de cette suppression du gaz est que la fréquence de la formation du brouillard varie. En effet, celle-ci

diminue lorsqu'il y a moins de gaz présent dans le liquide. En plus de ce dégazage, une augmentation de la pression statique inhibe, et lorsque les conditions sont proches du seuil, supprime complètement la formation d'un brouillard par le biais de la fontaine ultrasonore.

Leur étude concorde donc avec les premières observations de **Sollner [1936]** qui met la cavitation en avant comme mécanisme de l'atomisation.

3.2 Propagation des ultrasons.

Une étude sur le mécanisme de la création d'une fontaine a été réalisée à travers différentes expériences par **Mitome [1991]** avec de l'eau comme fluide. Il explique que lorsque que des ultrasons sont transmis dans un fluide, cela provoque un mouvement de masse du milieu, appelé « acoustic streaming ». De plus lorsque le transducteur est dirigé vers la surface, celle-ci gonfle, jusqu'à obtenir un débit en forme de jet. Lors de ces expériences, il a utilisé un nébuliseur avec une fréquence de 5,088 MHz. En observant dans un premier temps seulement le fluide, il s'aperçoit que celui-ci devient turbulent à une distance importante de l'appareil. En augmentant la tension, le point de transition se rapproche du nébuliseur. Ce phénomène est observable sur la Figure II- 18.

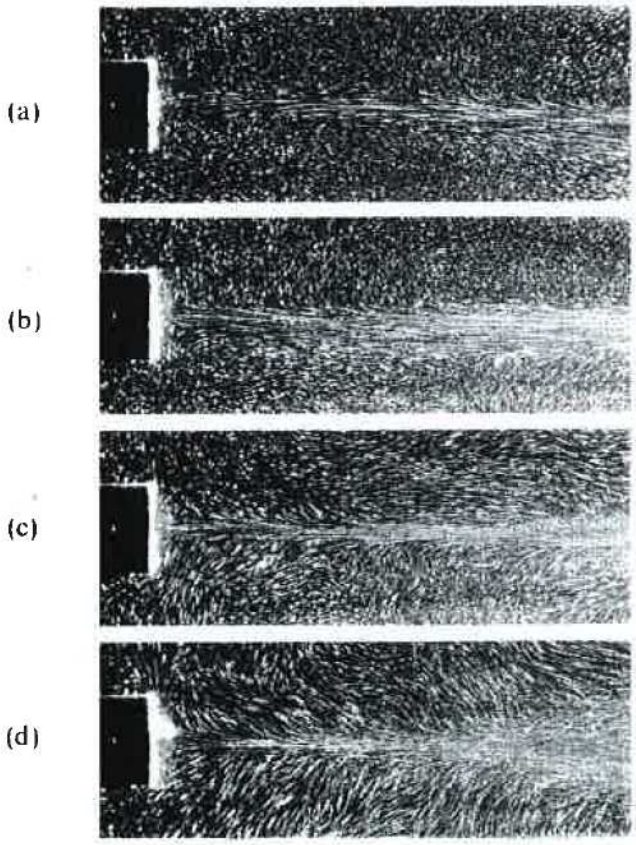


Figure II- 18 : Comportement d'un fluide soumis aux ultrasons, Mitome [1991].

Sur cette figure, l'image (a) correspond à la plus faible tension alors que la (d) correspond à la plus forte. L'auteur a également ajouté une plaque de polyéthylène à une certaine distance de la source ultrasonore. Il observe alors que l' « acoustic streaming » se propage après la plaque. Cette observation montre donc que les ultrasons se propagent à travers cette plaque. Cependant, en parallèle de ce déplacement de matière, il y a aussi une onde de pression. Cette onde permet, selon l'auteur, de générer la fontaine ultrasonore en agissant directement sur la surface du fluide. Il a

alors testé l'influence du positionnement de cette plaque entre la surface et le nébuliseur. Les résultats sont montrés sur la Figure II- 19.

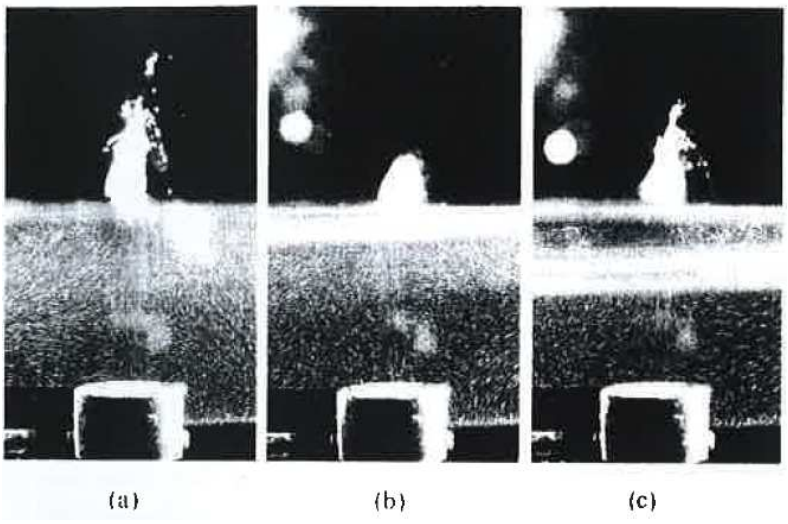


Figure II- 19 : Influence du placement d'une plaque de polyéthylène sur la fontaine ultrasonore, (a) sans plaque, (b) la plaque à 3mm de profondeur et (c) la plaque à 15mm de profondeur, Mitome [1991].

A la vue de ces résultats, il semble évident que l'ajout de cette plaque influence la fontaine. Cependant, quel que soit son placement, la fontaine est toujours présente. Cette observation est, d'après l'auteur, la confirmation que le paramètre gérant la fontaine n'est pas le déplacement de matière mais bien l'onde de pression. Des expériences supplémentaires ont également montré l'influence de la hauteur d'eau au-dessus du nébuliseur. Plus celui-ci est profond, plus la fontaine est petite. Ce qui va dans le même sens que les conclusions de l'auteur pour la précédente expérience.

En continuant sur l'interaction des ultrasons avec des matériaux, **Huamao *et al.* [1996]** ont étudié le résultat de l'interaction d'un nébuliseur à ultrasons, et plus particulièrement la fontaine, avec une plaque en plastique. L'appareil utilisé possédait une fréquence de 1,45 MHz et une puissance électrique de 25 W. Ils ont alors observé que la surface opposée à la fontaine fondait lors de l'expérience. Ils ont alors mis en thermocouple en contact avec cette zone fondue pendant une exposition à la fontaine pour pouvoir mesurer la température atteinte. Ils ont mesuré un maximum de 250°C pour certaines conditions (dépendant surtout de la puissance ultrasonore utilisée). De plus, de faibles déformations avaient été observées sur la surface faisant face au jet. Ils ont associé ce phénomène au fait que la plaque était alors une région d'intenses cavitations et que l'échauffement produit était la conséquence des effets mécaniques résultant des multiples bulles de cavitation.

Durant la même année, **Mc Callion et Patel [1996]** ont étudié l'influence de la viscosité de solutions aqueuses, qui présentent une tension de surface similaire, sur la nébulisation. La gamme des viscosités testées allait de 0,001 à 0,058 Pa.s, alors que la tension de surface variait de 0,0725 à 0,0765 $N.m^{-1}$. Les nébuliseurs produisaient des gouttes de plus en plus petites lorsque la viscosité augmente au-delà de la gamme 0,001-0,006 Pa.s. De plus, le pourcentage de gouttes qui possèdent un diamètre inférieur à 5µm augmente en même temps que la viscosité. Il faut savoir qu'ils disposaient de trois nébuliseurs différents mais un seul avec des ultrasons : le « Medix Electronic ». Les résultats de leurs études sont reportés sur la Figure II- 20.

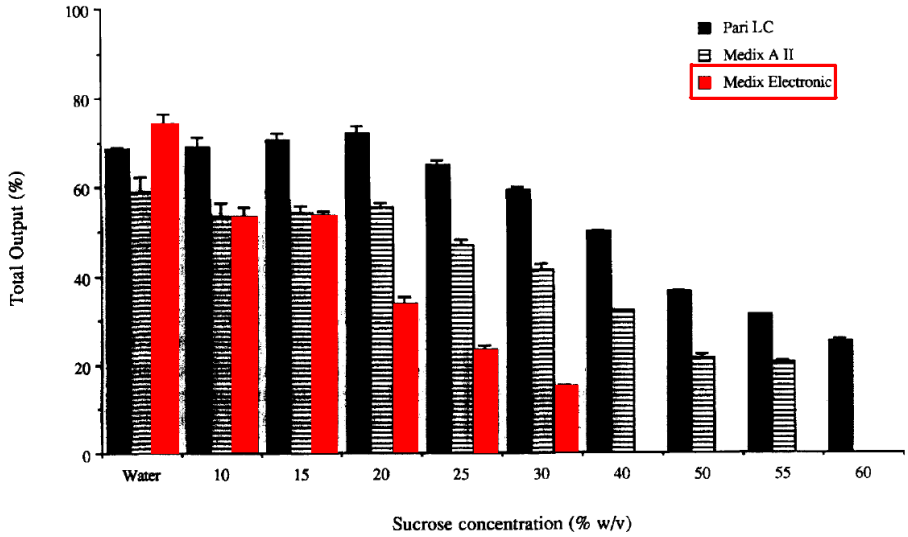


Figure II- 20 : Débit de fluide nébulisé en fonction de la viscosité du fluide, Callion et al. [1996].

Les résultats liés au nébuliseur à ultrasons sont indiqués en rouge. En ordonnée est représentée la quantité de liquide nébulisé et en abscisse, cela correspond à la viscosité de la solution. En effet, plus la concentration est importante, plus la viscosité est importante. Ils ont donc observé une diminution de la nébulisation lorsque la viscosité augmente, de plus, aucune nébulisation par ultrasons n'était possible pour des viscosités supérieures à 0,006 Pa.s. Ils concluent alors qu'un seuil de puissance est nécessaire afin de pouvoir générer les ondes capillaires qui donneront naissance, avec l'aide de la cavitation, à la nébulisation. Cette puissance serait directement proportionnelle à la viscosité du fluide et de ce fait, pour les fortes viscosités ils s'attendent à une disparition du procédé d'atomisation.

Gondrexon *et al.* [1998] ont étudié les ultrasons dans les réacteurs, et plus précisément, le comportement de celui-ci pour des hautes fréquences. Dans ces conditions, l'effet de l' « acoustic streaming » est net. La Figure II- 21 montre un schéma de cet effet.

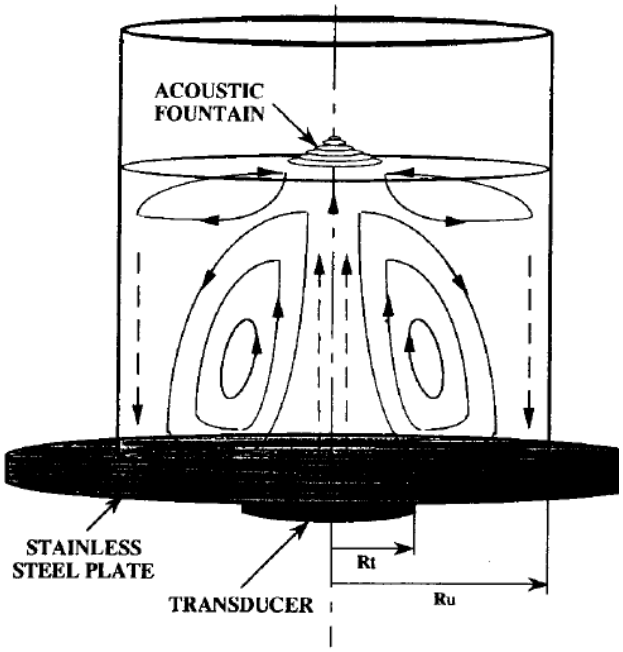


Figure II- 21 : Schéma du mouvement du liquide par le biais des ultrasons dans un réacteur, Gondrexon et al. [1998].

Ce phénomène permet alors de créer une agitation dans l'ensemble du volume du réacteur. Cependant, les effets dus à la propagation des ondes acoustiques dans le liquide doivent être distingué de ceux dus à la cavitation. En effet, les formations de jets, largement utilisés dans les applications industrielles des ultrasons, sont liées à l'éclatement des bulles de cavitation. Mais ces effets ne sont présents que si l'énergie ultrasonore est suffisante. Le type d'émetteur, ainsi que la forme et les dimensions du réacteur doivent donc être prises en compte pour déterminer la distribution de l'énergie ultrasonore dans le volume.

3.3 Influence des caractéristiques de l'élément piézo-électrique.

D'autres auteurs se sont également penchés sur une des caractéristiques importantes des nébuliseurs : la fréquence d'excitation. **Wagner *et al.* [2000]** ont étudié la nébulisation pour trois fréquences d'excitation différentes : 1,7, 3,3 et 4,0 MHz. Ils ont alors observé une diminution de la tension de surface du fluide mesurée lorsque la fréquence augmentait. La taille des gouttes diminue également en fonction de la fréquence, comme le prouve les équations précédemment citées (équations II.6 et II.7). Cependant, les essais à la plus basse fréquence semblent produire la meilleure nébulisation. D'après les auteurs, les basses fréquences qui donnent des longueurs d'onde plus importantes, favoriseraient le détachement du fluide au niveau des pics. Augmenter la fréquence ne présente pas d'avantage significatif pour la gamme testée.

Kojima *et al.* [2010] ont étudié le même phénomène que **Gondrexon *et al.* [1998]**. Ils ont joué sur la puissance électrique alimentant l'appareil à ultrasons. Les résultats de la variation de la tension d'alimentation, influant directement sur la puissance d'alimentation, sont représentés sur la Figure II- 22.

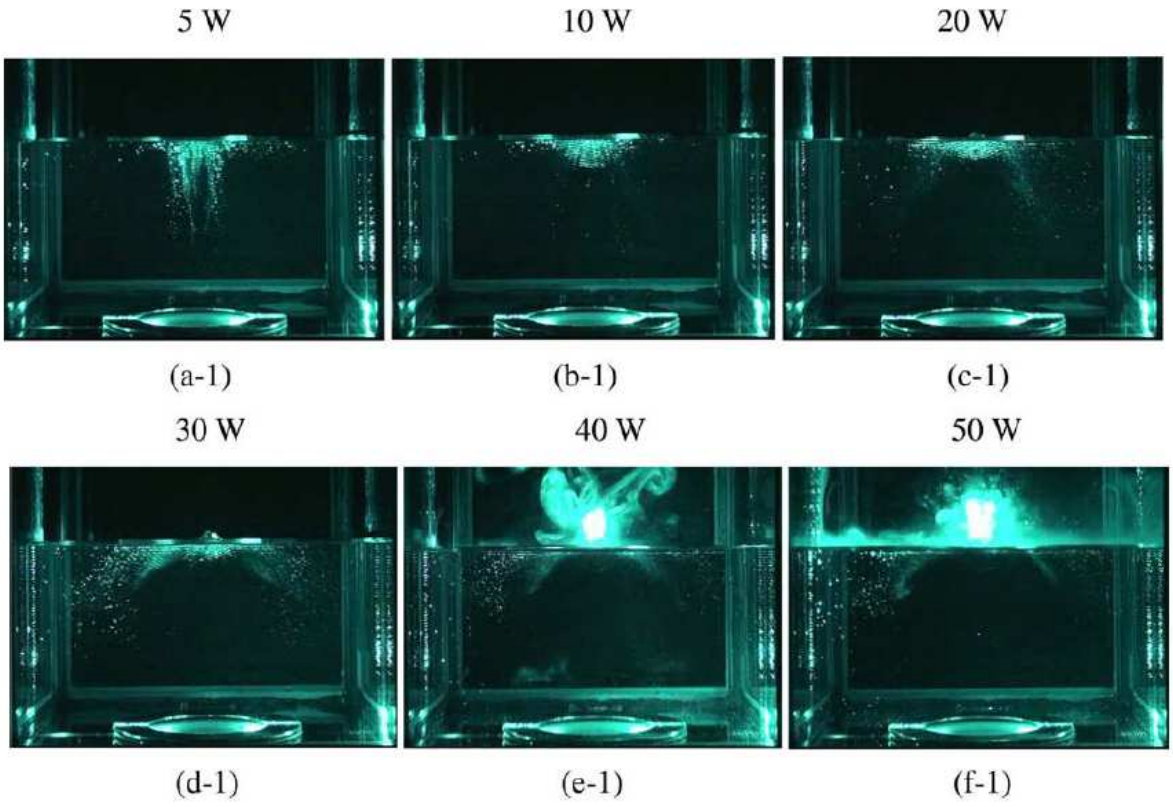


Figure II- 22 : Influence de la tension d'alimentation du nébuliseur sur un fluide à surface libre, Kojima et al. [2010].

Ils ont observé une augmentation de l'agitation du fluide mais également, une fontaine ultrasonore à partir d'un certain pallier de tension. Si celle-ci est clairement visible pour 40 W, la déformation de la surface sous forme de gonflement apparait déjà pour une tension de 20 W. La vitesse moyenne de l'écoulement liquide lié à l' « acoustic streaming » augmente avec la puissance électrique alimentant le nébuliseur. Cependant, l'efficacité sonochimique du réacteur diminue pour l'augmentation de la tension, dû au fait qu'il n'y a moins de bulles de cavitation pour un même volume. Un mélangeur placé dans le réacteur peut améliorer l'atomisation en augmentant sa vitesse de rotation.

La distribution de la puissance ultrasonore d'un nébuliseur a été mesurée par **Zhan *et al.* [2011]**. L'élément piézo-électrique est excité avec une fréquence de 20 MHz. La répartition de la puissance est représentée sur la Figure II- 23.

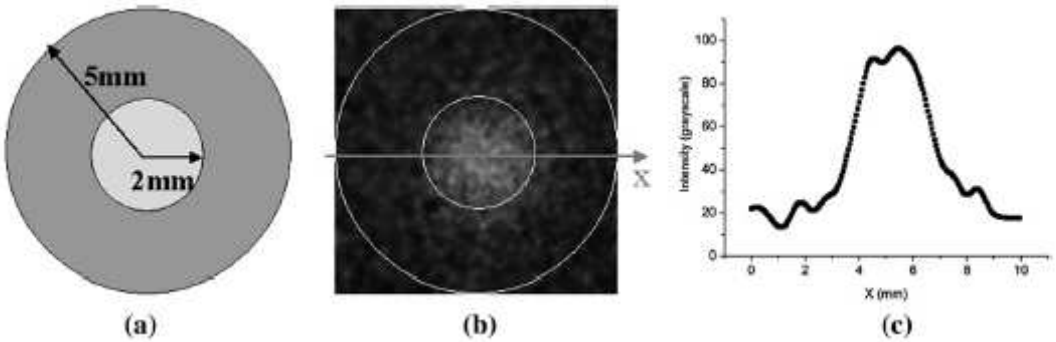


Figure II- 23 : Répartition spatiale de la puissance ultrasonore d'un disque piézo-électrique, Zhan et al. [2011].

La majeure partie de la puissance est distribuée au centre du faisceau du disque piézo-électrique. Le disque étant de 2 mm de diamètre, l'anneau extérieur étant une résine époxy. L'intensité est cependant maximale au centre de la zone du disque piézo-électrique et diminue progressivement du centre au bord de celui-ci. Sur la Figure II- 23 (c), le centre se trouve à l'abscisse de 5 mm. L'intensité semble diminuer après s'être éloigné d'un millimètre du centre. L'énergie est donc maximale pour un rayon de 1 mm au centre du disque.

3.4 Introduction des ultrasons dans un échangeur.

Introduire les ultrasons dans le milieu des échangeurs n'est pas courant, mais il a déjà été fait et notamment par **Legay *et al.* [2012]** pour améliorer les performances de deux échangeurs de chaleur à l'aide d'ultrasons. L'échangeur se présente sous la forme d'un échangeur coaxial avec le tube annulaire qui vibre grâce à un transducteur ultrasonique à une fréquence de 35 kHz. Les résultats sont présentés sur la Figure II- 24.

Dans les deux configurations, l'échange de chaleur est amélioré lorsque les ultrasons sont ajoutés. Ceci est lié aux vibrations qui permettent de créer de la turbulence. Ces turbulences, notamment dans des régimes laminaires, permettent donc une amélioration des échanges de chaleur. Cette amélioration est donc moins sensible lorsque les fluides sont en régimes turbulents.

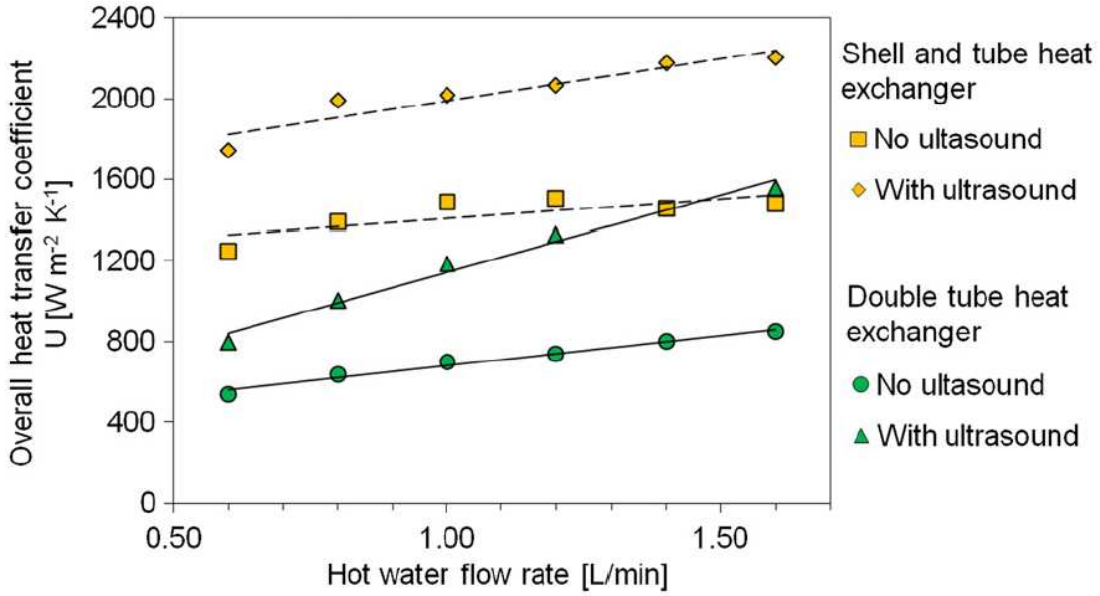


Figure II- 24 : Influence des ultrasons sur le coefficient de transfert en fonction du débit du fluide chaud, Legay et al. [2012].

4. Conclusion

Les ultrasons sont une technologie connue et largement utilisée dans différents domaines, qui vont de l'industrie agroalimentaire à la médecine, en passant par la soudure de plastiques. Une branche de ces activités qui nous intéresse est la nébulisation ou atomisation par ultrasons. Celle-ci n'est pas encore totalement comprise, notamment pour les mécanismes mis en jeu dans le phénomène de nébulisation.

De toutes ces études, il en ressort que les ultrasons peuvent être très intéressants pour modifier l'agitation interne d'un fluide. Un fluide au repos peut être mis en mouvement grâce aux ultrasons, sous l'effet de l'«acoustic streaming », et de plus un fluide en écoulement peut bénéficier d'une intensification de la turbulence sous l'effet des ultrasons. Les ultrasons sont cependant très dépendant des conditions expérimentales, aussi bien concernant le nébuliseur (fréquence, tension d'alimentation) que le milieu environnant (viscosité, écoulement, obstacles, etc.).

A ce jour, aucune étude n'a été faite sur des nébuliseurs dans un écoulement diphasique et encore moins dans un distributeur d'échangeur de chaleur. L'interaction des domaines du diphasique et des ultrasons n'a pas encore été étudiée et la littérature fait malheureusement état de cela.

Le but de cette étude est donc de changer la distribution avec les ultrasons et plus particulièrement avec l'utilisation de nébuliseurs. D'une part, la fontaine peut diriger le fluide vers les canaux et d'autre part les ultrasons vont modifier l'écoulement dans le distributeur et donc peuvent changer de ce fait la distribution.

Enfin, le débit nébulisé peut favoriser l'établissement d'un écoulement diphasique homogène améliorant ainsi la distribution. Cependant, compte tenu de la faible valeur du débit nébulisé par élément piézo-électrique (environ 500 ml/h), cet effet ne sera sans doute significatif que pour les faibles valeurs de densité de flux massique.

Chapitre III : Dispositif expérimental et mesures

Le dispositif expérimental a été conçu pour répondre à plusieurs objectifs dont les trois principaux sont :

- la mise en évidence des effets des ultrasons sur la répartition d'un écoulement diphasique,
- la modification de la répartition à l'aide des ultrasons,
- la quantification de l'effet observé.

Pour ce faire, une section d'essais a été réalisée comprenant une partie d'un échangeur multi-canaux, avec un canal distributeur qui répartit un fluide dans plusieurs minicanaux. La boucle associée permet de créer un écoulement diphasique eau – air qui est dirigé vers la section d'essais dans laquelle il est distribué dans différents canaux.

1. Principe de l'expérience

Deux écoulements, l'un d'air, l'autre d'eau sont intimement mélangés (point A, Figure III- 1) et l'écoulement diphasique ainsi créé est dirigé vers le distributeur de la section d'essais. Ce mélange est alors distribué dans 10 minicanaux. A la sortie de chaque minicanal le mélange est dirigé vers un séparateur qui permet de mesurer les débits d'eau ainsi que les débits d'air. Des générateurs piézoélectriques sont placés au fond du distributeur en face de chaque canal permettant ainsi d'agir sur l'écoulement.
La section d'essais a été conçue de façon à pouvoir visualiser les écoulements et de mesurer la quantité d'eau et d'air qui passe dans chaque canal avec et sans ultrasons.

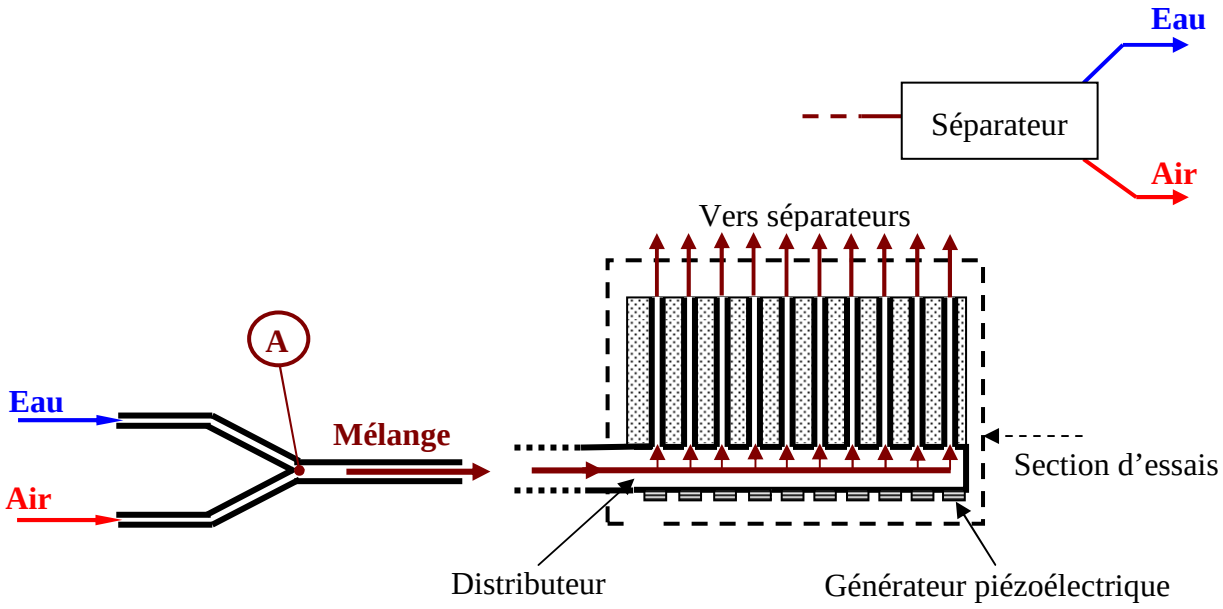


Figure III- 1 : Schéma de principe de l'expérience.

Ces principes ont permis la réalisation de la boucle NIDUS

2. Description de la boucle NIDUS

L'effet de la fontaine générée par des ultrasons sur la distribution d'un mélange diphasique au sein d'un échangeur est étudié par le biais de la boucle NIDUS, conçue pour observer ces phénomènes.

La boucle NIDUS comporte 3 circuits qui sont les suivants :

- Le circuit (100) : circuit contenant la phase liquide, à savoir l'eau. Il est présent en amont et en aval de la section d'essai. En amont une seule ligne est installée pour l'alimentation, tandis qu'en sortie il y a deux lignes : une pour la mesure du débit et une allant directement à l'égout.
- Le circuit (200) : circuit contenant la phase gazeuse, à savoir l'air. Il est lui aussi présent en amont et en aval de la section d'essai. Comme pour le circuit 100, l'alimentation se fait à travers une seule ligne, mais la sortie se fait à travers 10 lignes qui sont chacune connectée à un canal de la section d'essai.
- Le circuit (300) : circuit où le mélange diphasique est présent, il s'étend des mélangeurs jusqu'aux séparateurs, en passant par la section d'essai.

L'ensemble de la boucle est schématisé sur la Figure III- 2 de la page suivante.

2.1 Circuit de la phase liquide (100)

Ce circuit, comme nous pouvons le voir sur la Figure III- 2 se situe en amont et en aval de la section d'essais. Des vannes manuelles en entrée permettent de régler le débit d'eau industrielle souhaité sachant que celui-ci est mesuré par un débitmètre Coriolis Micro Motion de modèle F050S juste avant d'être mélangé à l'air. Le débit maximal mesuré possible est de 1000 kg/h.

En sortie, sont placés dix séparateurs qui possèdent une ligne d'eau. A l'aval de chacune d'entre elle, il y a deux vannes permettant de choisir entre : mesurer le débit de cette ligne (correspondant donc à un canal), ou alors reverser l'eau dans l'égout. En ce qui concerne la ligne de mesure, l'eau est dirigée vers un débitmètre Coriolis Micro Motion de modèle F050S.

2.2 Circuit de la phase gazeuse (200)

Ce circuit concerne l'alimentation en air de la section d'essais et la zone de mesure en aval. Le débit en entrée est contrôlé par une vanne de régulation Kammer possédant un coefficient Kv de 2,5 placée juste avant le débitmètre Coriolis Micro Motion de modèle F050S permettant de mesurer un débit maximum de 42 kg/h. En sortie des venturis de la marque Kobold de type RCD-1103L G4 C34P/C permettent de mesurer les débits importants (>3 kg/h) et des venturis de marque PRESO modèle V-50-10-NPT pour les faibles débits (< 3kg/h) sortant de chaque canal.

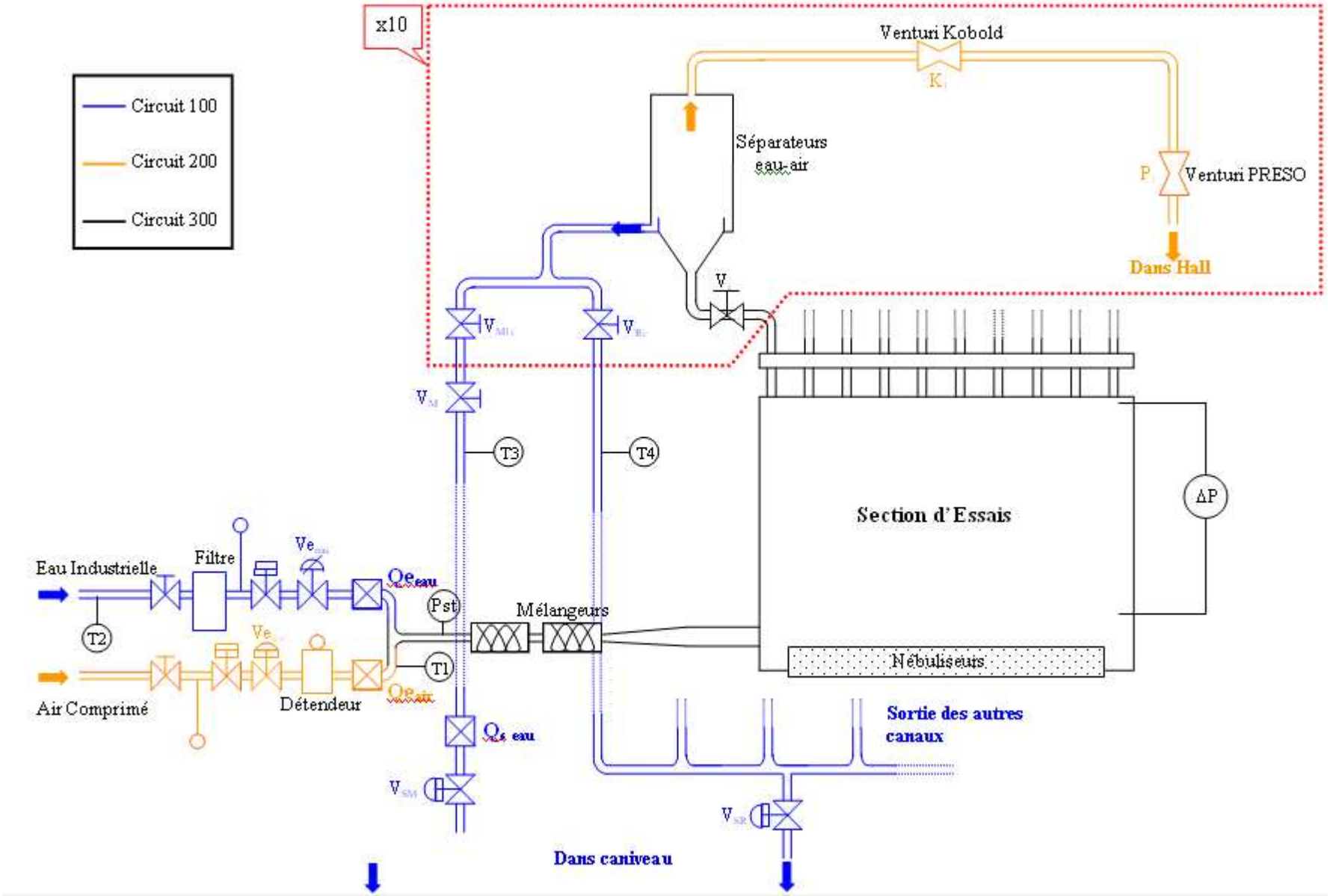


Figure III- 2 : Schéma de la boucle NIDUS.

2.3 Circuit du mélange diphasique (300)

La partie de la boucle où le mélange diphasique est présent est la plus délicate et c'est également le cœur de la boucle car elle prend en compte la section d'essais. Elle comprend : la zone d'alimentation avec les mélangeurs, qui permettent une homogénéisation des deux fluides, ensuit une zone tranquillisation avant la section d'essais, la section d'essais en elle-même et enfin les séparateurs.

En sortie de la section d'essais, des vannes sont présentes afin de pouvoir fermer un certain nombre de canaux dans le but de choisir quels canaux et combien seront parcourus par le mélange.

3. Section d'essais

La section d'essais est en plexiglas afin de pouvoir visualiser le comportement des fluides. Les conditions d'écoulement dans un échangeur à mini canaux ont été approchées avec dix canaux de forme rectangulaire et de dimensions 2x25mm. Ces canaux sont connectés à un distributeur rectangulaire également et de dimensions 20x25mm.

La conception a été pensée pour utiliser l'échangeur de façon à ce que l'écoulement soit horizontal dans le distributeur et vertical ascendant dans les canaux. Cette configuration a été préférée par souci de simplicité quant à l'installation et l'utilisation des générateurs à ultrasons. En effet, les éléments piézo-électriques (céramiques) ayant besoin d'être noyés sous une hauteur d'eau pour pouvoir fonctionner correctement, il a été décidé de les placer dans la partie basse du distributeur. La section d'essais est présentée sur la Figure III- 3.

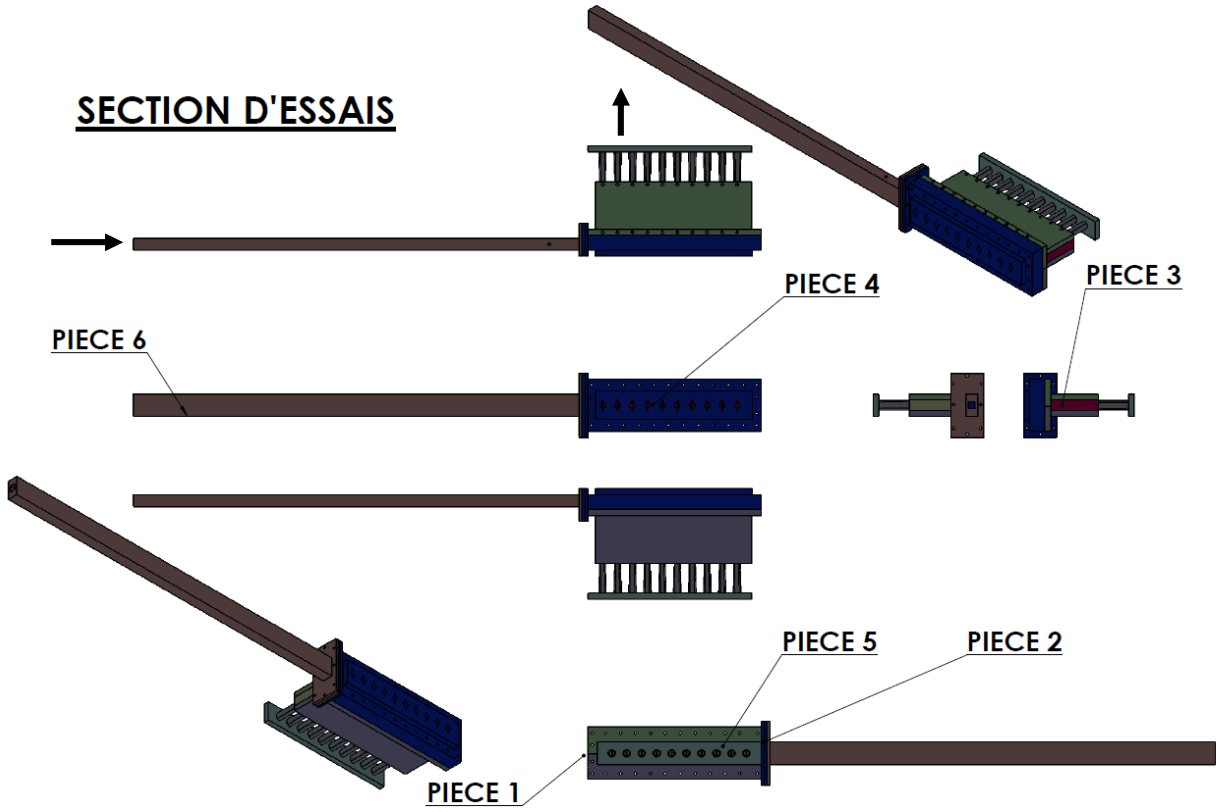


Figure III- 3 : Schéma de la section d'essais.

Il peut être remarqué sur la Figure III- 3, qu'il y a 6 pièces qui sont indiquées. L'assemblage de ces six pièces permet de former cette section d'essais et chaque pièce a son rôle et un intérêt propre.

Les pièces 1 et 2 forment la structure principale de l'échangeur. La pièce trois est composée de onze éléments et c'est l'assemblage de toutes ces pièces qui permet de former les mini canaux. Comme il peut être remarqué la figure III- 4 correspondant aux pièces 1 2 et 3, des rainures sont présentes sur la paroi interne des pièces 1 et 2. Entre ces rainures, chacun des onze éléments de la pièce 3 vient s'intercaler.

3.1 Distributeur

L'ensemble des pièces 1, 2 et 3 ont été assemblées par collage compte tenu de la non nécessité de démonter cette partie de la section d'essai. Cet assemblage est donc inchangé dans le temps. L'ensemble forme un bloc uni, ce qui diminue la surface d'échange de chaleur possible et c'est pour cette raison que ce dispositif ne peut donc pas être concrètement utilisé comme un échangeur de chaleur. L'étude porte donc dans le cadre de ces travaux uniquement sur la distribution diphasique en adiabatique.

Tableau III- 1 : Caractéristiques de la section d'essais.

Caractéristiques de la section d'essais	
Fluides utilisés	Eau et air
Matériaux utilisés	PMMA et Aluminium pour les blocs de séparation des canaux
Dimensions Canaux	
Nombres de canaux	10
Espacement (mm)	50
Largeur (mm)	2
Hauteur (mm)	25
Longueur (mm)	200
Diamètre hydraulique (mm)	3,7
Dimensions Distributeur	
Largeur (mm)	25
Hauteur (mm)	20
Longueur (mm)	524
Diamètre hydraulique (mm)	37
Espacement générateurs (mm)	50
Profondeur des "puits" (mm)	30

Le principe du collage de ces pièces est illustré par la Figure III- 4, par une vue de la sections d'essais depuis la sortie des canaux. Il faut également noter que les blocs insérés sont en aluminium. En effet, durant la phase de conception de la section d'essais, une attention particulière a été portée sur les interactions entre les ultrasons et les matériaux utilisés dans la section d'essais. Il a été observé qu'une interaction avec le PMMA avait des conséquences néfastes sur ce matériau. En effet, des températures de surface supérieures à 200°C ont été mesurées alors que l'interaction avec les ultrasons n'avait commencé que quelques secondes plus tôt (Annexe 1). La première section d'essais entièrement en PMMA a alors dû être adaptée afin d'être protégée contre ces dégradations liées à la fusion du polymère. Il a été effectué une étude sur l'interaction des ultrasons avec différents matériaux, pour tester ceux

qui répondent au besoin de protéger la section d'essais. L'aluminium s'est révélé être adapté. Ce matériau a été utilisé afin de fabriquer des blocs (pièce 3) pour séparer les canaux et également faire face aux ultrasons. De plus, un écran d'aluminium en forme de plaque a été collé sur le fond du distributeur (pièce 4) pour protéger la bride de support de la réflexion des ultrasons sur les blocs d'aluminium séparant les canaux.

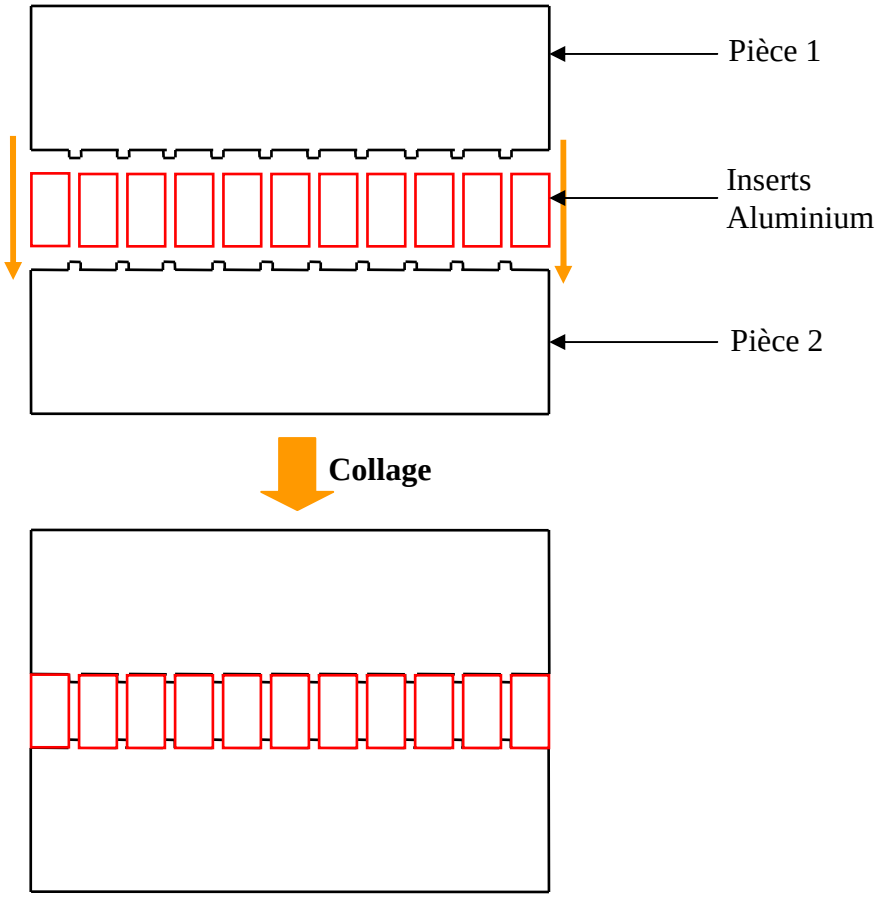


Figure III- 4 : Schéma du collage de la section d'essais (vue du dessus).

La pièce représentant la bride (pièce 4) est une pièce importante car d'une part, elle forme la partie inférieure du distributeur et permet ainsi de le compléter en l'assemblant avec les trois pièces précédentes, d'autre part, c'est avec cette pièce que seront ajoutés les générateurs piézoélectriques à ultrasons (cf. Figure III- 5). La bride est conçue pour recevoir dix générateurs piézoélectriques espacés de 50 mm chacun. Les dix appareils sont plaqués contre la face extérieure de la bride et placés dans une cavité. De cette façon, le disque piézoélectrique est séparé du distributeur par la profondeur de chaque cavité. Cette particularité a été retenue car pour un bon fonctionnement, les générateurs doivent avoir une certaine hauteur de liquide au-dessus de leur surface afin de pouvoir fonctionner correctement.

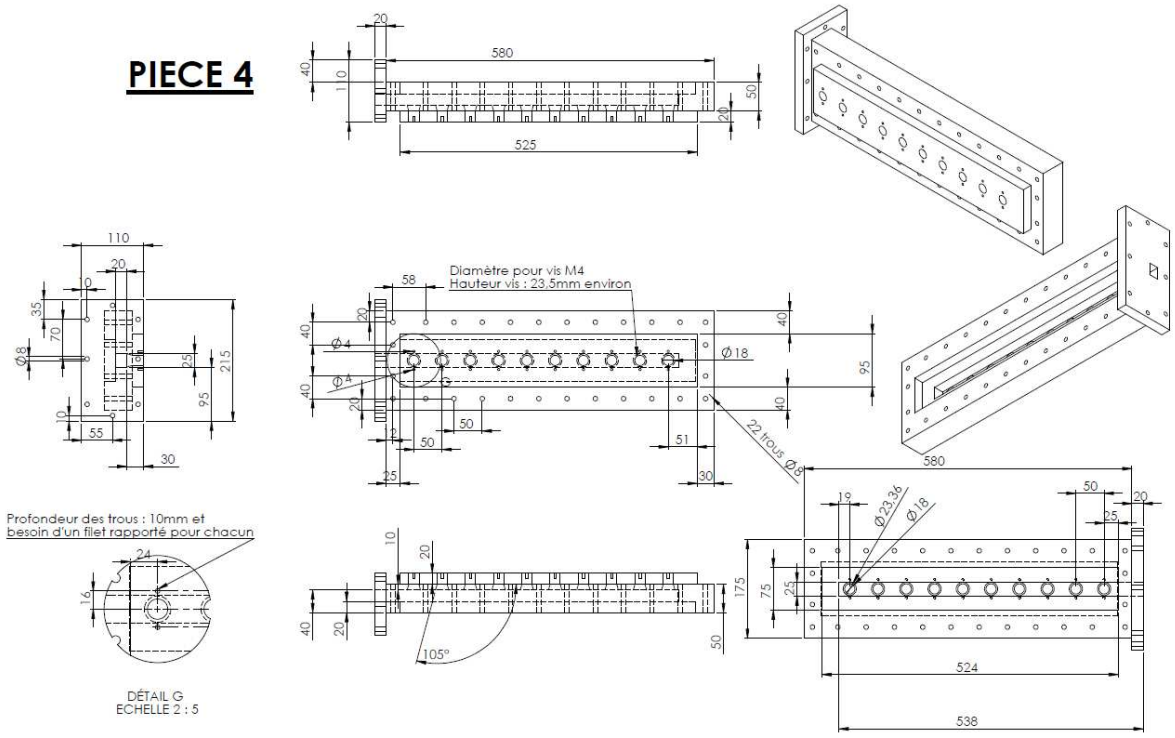


Figure III- 5 : Schéma de la pièce 4.

En effet, si un générateur est en marche alors qu'il n'y a pas de liquide, le disque piézoélectrique se verra détérioré. Ce choix apporte donc une sécurité sur le matériel utilisé. De plus, les générateurs sont disposés sous une profondeur de liquide particulière pour laquelle, la formation d'une fontaine est optimale : la hauteur de la fontaine est maximale. Cette profondeur est de l'ordre de 4cm, les trous ont une profondeur de 3cm. La différence d'un centimètre est liée à la configuration de l'échangeur. En effet, pour un distributeur horizontal, il y a normalement tout le temps du liquide dans la partie inférieure. De cette façon, les cavités ont été réalisées de façon à ce que la profondeur de 4 cm soit atteinte lorsqu'un débit de liquide remplissant la moitié de la hauteur du distributeur est présent. Ceci correspond notamment à un régime stratifié.

Il faut également noter que chaque générateur (et donc chaque cavité) est placé en face de chaque canal. Ceci a été adopté afin de diriger les projections liquides (fontaine), créées par la pression ultrasonore à l'interface liquide/gaz, vers les mini canaux.

Parmi les autres particularités spécifiques au niveau des cavités, (Figure III- 6), il y a un évasement (d'une hauteur de 1cm) du côté du distributeur. Les transducteurs de TDK contiennent un disque piézoélectrique avec une inclinaison de 7°, la direction des ondes n'est donc pas exactement perpendiculaire au disque. Ce chanfrein permet alors aux ondes provenant des générateurs, de mieux se propager dans le fluide, et de ne pas heurter la paroi.

Cette pièce viendra se fixer sur la partie inférieure de la section d'essais et pourra être changée si besoin est (par exemple changer la profondeur des cavités ou leur position).

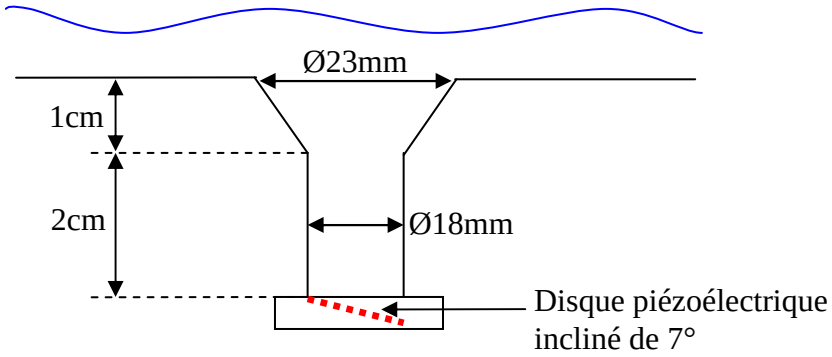


Figure III- 6 : Schéma de l'emplacement d'un disque piézo-électrique.

La cinquième pièce concerne la sortie des canaux. Elle est fabriquée de façon à évoluer d'une section rectangulaire à une section circulaire, afin de pouvoir raccorder de la tuyauterie tubulaire en sortie.

Il y a, bien sûr, autant d'embout de sortie que de canal et ces dix sorties sont toutes liées à une même plaque pour assurer une tenue mécanique correcte. Cette pièce est assemblée par collage sur la sortie de l'échangeur.

La dernière pièce indiquée sur la Figure III- 3, est l'entrée de la section d'essais, elle sert à établir un régime d'écoulement possédant une longueur de tranquillisation de 1m50. Les dimensions de largeur et de hauteur sont les mêmes que celles du distributeur afin de ne pas avoir de changement brutal à l'entrée de celui-ci. Sur la Figure III- 7, la section d'essais est installée et raccordée au banc d'essais avec l'identification des sens d'écoulements des fluides.

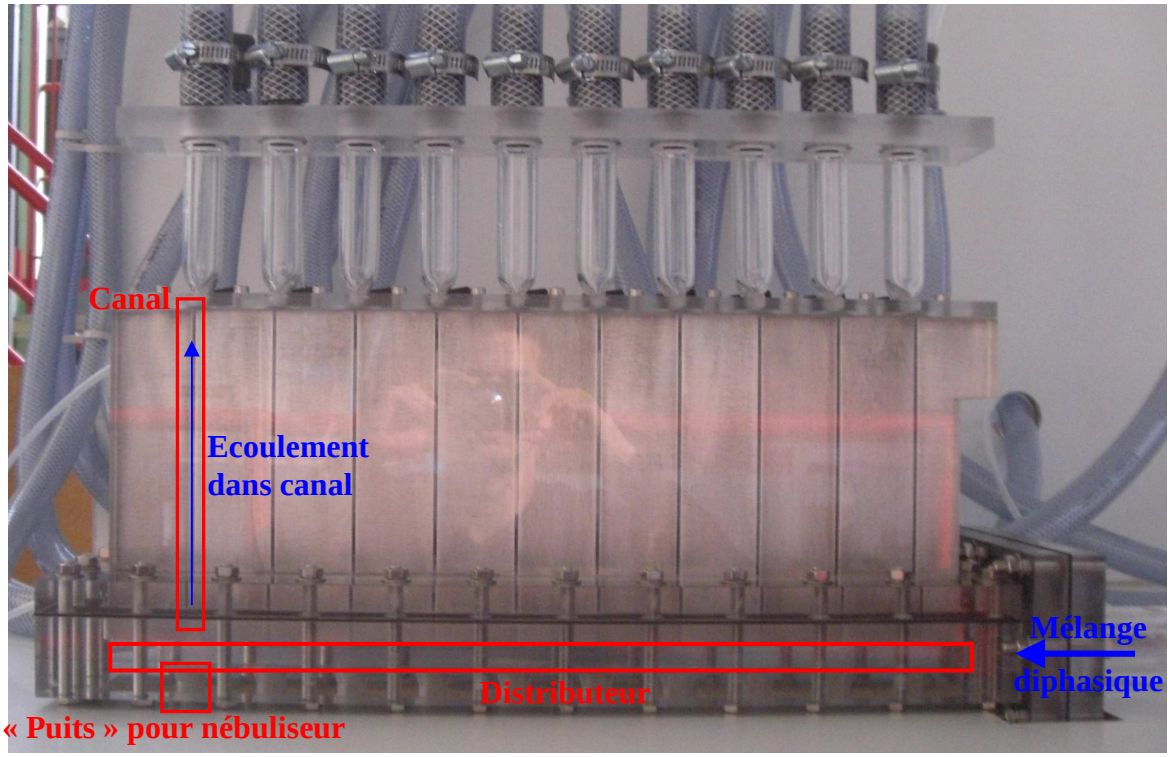


Figure III- 7 : Photo de la section d'essais.

3.2 Séparateurs

L'eau et l'air sont mélangés pour obtenir un mélange diphasique en entrée de la boucle. En sortie de l'échangeur il est alors nécessaire de séparer la phase liquide et la phase gazeuse. Pour cette séparation, chaque sortie de canal est connectée à un élément en plexiglas qui sera nommé séparateur. La difficulté de cette partie de la boucle est de séparer correctement les deux phases pour avoir une bonne détermination de chaque débit associé. En effet les débitmètres, surtout ceux mesurant le débit d'air sont sensibles à la présence d'une autre phase.

Pour permettre une bonne séparation il a été choisi de faire une enceinte avec la géométrie présentée Figure III- 8.

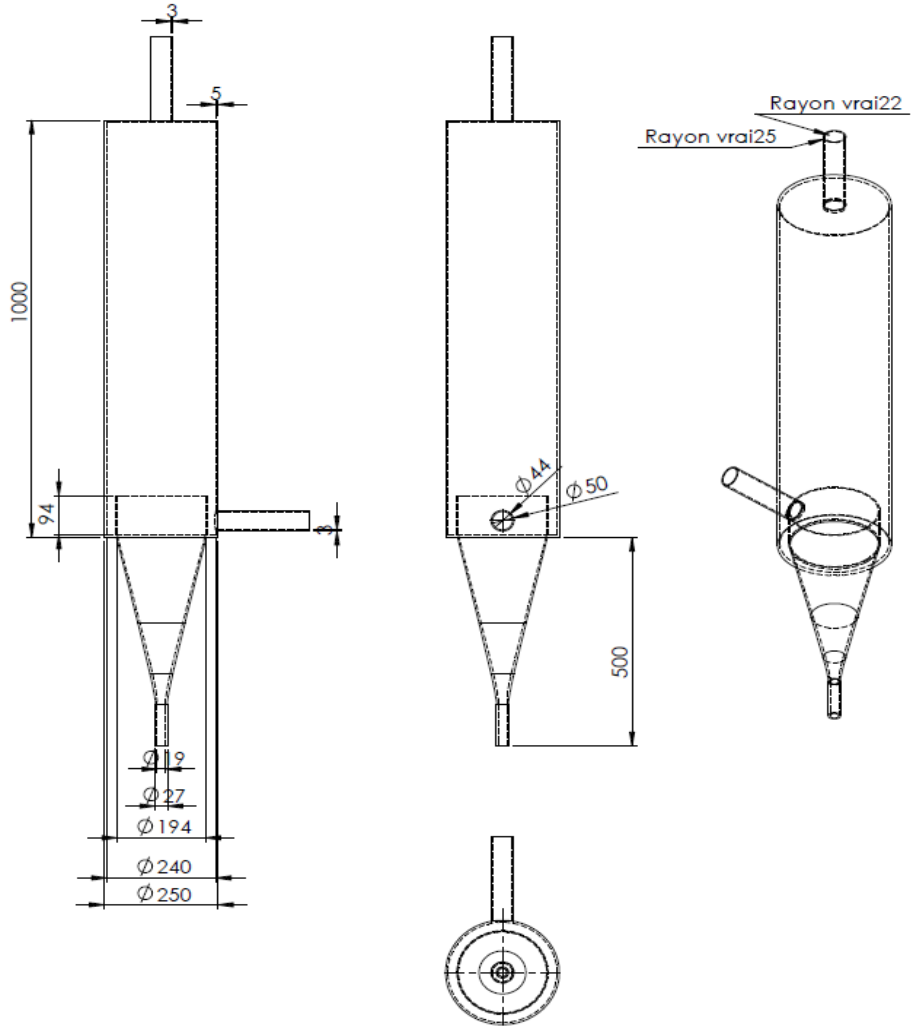


Figure III- 8 : Schéma des séparateurs.

Le mélange diphasique arrive par le bas de cette pièce. Le principe de ce séparateur est de faire s'écouler le liquide par débordement. Le cylindre de diamètre extérieur 194 mm pénétrant dans le cylindre principal de diamètre intérieur 240 mm permet ce débordement. Le liquide est alors séparé du gaz par gravité. Le gaz est expulsé vers le haut, entraînant éventuellement avec lui des gouttes. Afin de limiter cet entrainement de gouttes par le gaz, la section de passage a été dimensionnée la plus large possible. Ceci nous donne une vitesse du gaz relativement faible, ce qui permet au liquide de retomber et ainsi de n'avoir que du gaz arrivant à la sortie. La hauteur du cylindre étant d'un mètre, le gaz a le temps de bien

se séparer du liquide. Les deux sorties de chaque séparateur sont reliées à la tuyauterie afin de pouvoir mesurer leur débit. Le schéma de principe est présenté sur la Figure III- 9.

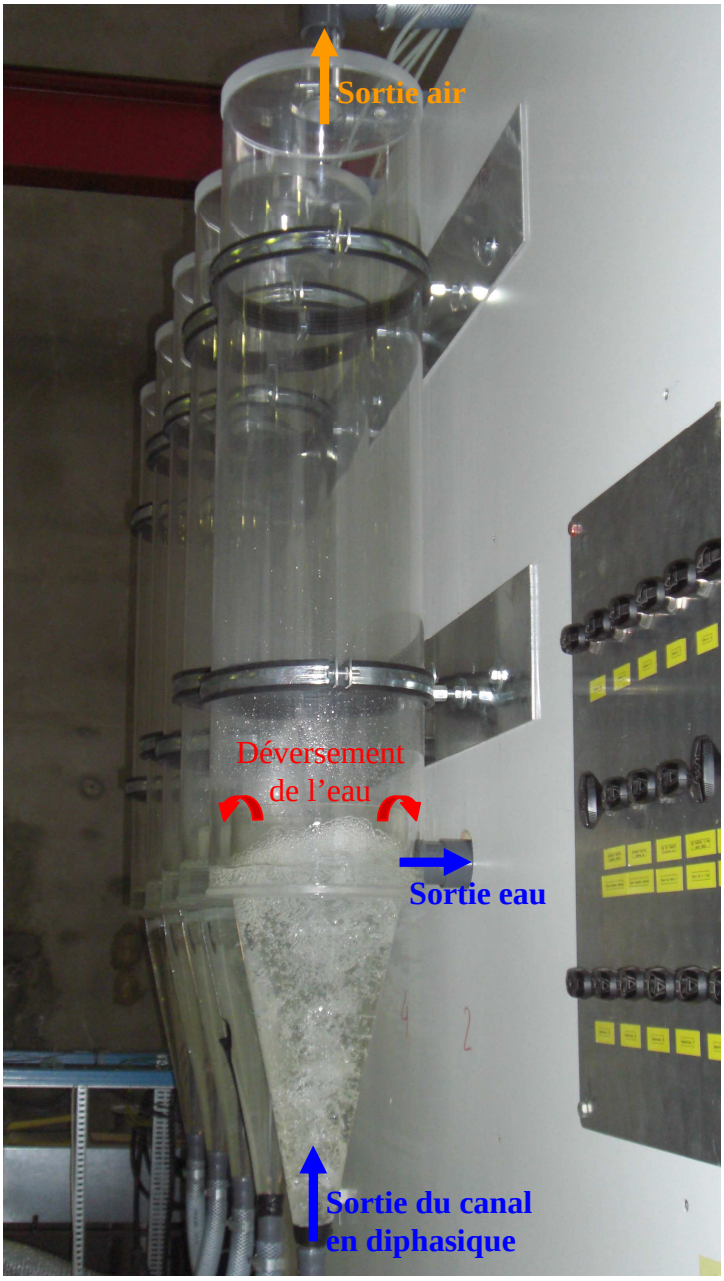


Figure III- 9 : Photo des séparateurs.

3.3 Dispositif générateur de pertes de pression singulières

Afin de pouvoir obtenir plusieurs configurations d'échangeur, des vannes ont été placées à la sortie des canaux (Figure III- 10). Ces ajouts permettent d'introduire des pertes de pressions supplémentaires et ainsi changer la distribution observée pour des mêmes conditions de débits d'eau et d'air. Les profils de distribution recherchés étaient ceux observés dans la littérature. Pour obtenir ces résultats, les vannes étaient fermées d'une manière croissante en avançant vers les derniers canaux. Une première mesure de la distribution est alors réalisée afin de voir les changements à réaliser. Les vannes nécessitant un changement de leur degré de fermeture (en plus ou en moins) sont alors modifiées. Un nouveau profil de distribution est à nouveau déterminé. Si des changements au niveau des vannes s'avère une nouvelle fois nécessaire

pour obtenir les résultats voulus, ceux-ci sont opérés. Lorsque la distribution est satisfaisante, c'est-à-dire similaire à celles de la littérature, la configuration des vannes est alors terminée.

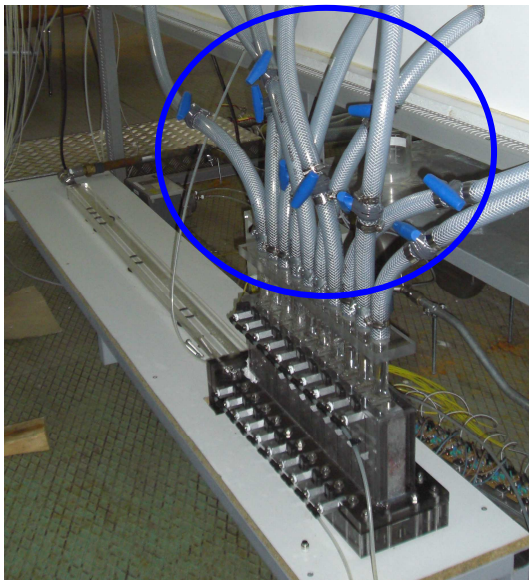


Figure III- 10 : Insertion des vannes en sortie des canaux.

3.4 Générateurs ultrasonores

Les générateurs ultrasonores ou transducteurs utilisés sont de la marque TDK du modèle NB59S avec un disque d'un diamètre de 18mm. Chaque transducteur ayant une inclinaison du disque piézoélectrique de 7°, il a été décidé d'orienter l'appareil de telle façon que la fontaine produite soit dans le sens opposé à l'écoulement. Ainsi, l'entrainement lié à l'écoulement permettra que la fontaine se dirige vers le canal. Si les transducteurs avaient été orientés dans le même sens que l'écoulement, la fontaine se serait alors écartée du canal associé.

Chaque disque est alimenté par un circuit générateur d'impulsion devant être contrôlé thermiquement afin d'éviter la destruction des composants électroniques. Un système de refroidissement a donc été conçu, il se présente sous la forme d'un échangeur avec l'apport de chaleur par les circuits des transducteurs et le fluide froid contenu dans un tube rectangulaire (Figure III- 11).

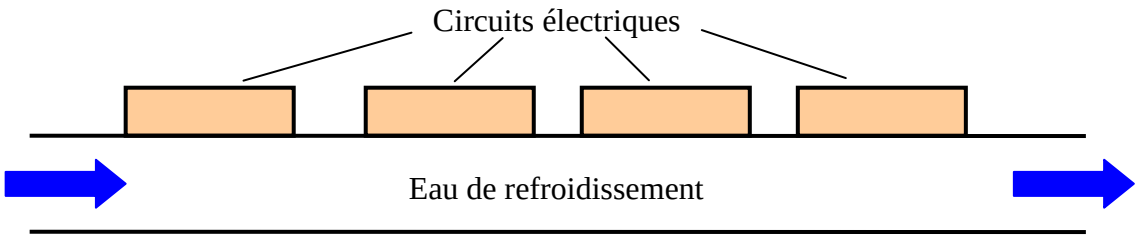


Figure III- 11 : Schéma de principe du refroidissement des circuits électroniques.

L'eau traversant l'échangeur est prélevée en amont de la vanne de régulation de l'entrée de l'eau et ressort directement dans l'égout. Grâce à cela, les composants électroniques sont maintenus à des températures acceptables (<40°C).

La photo de la Figure III- 12 montre la position des dix transducteurs ainsi que leur raccordement à leurs circuits électriques qui eux sont fixés sur un tube rectangulaire.

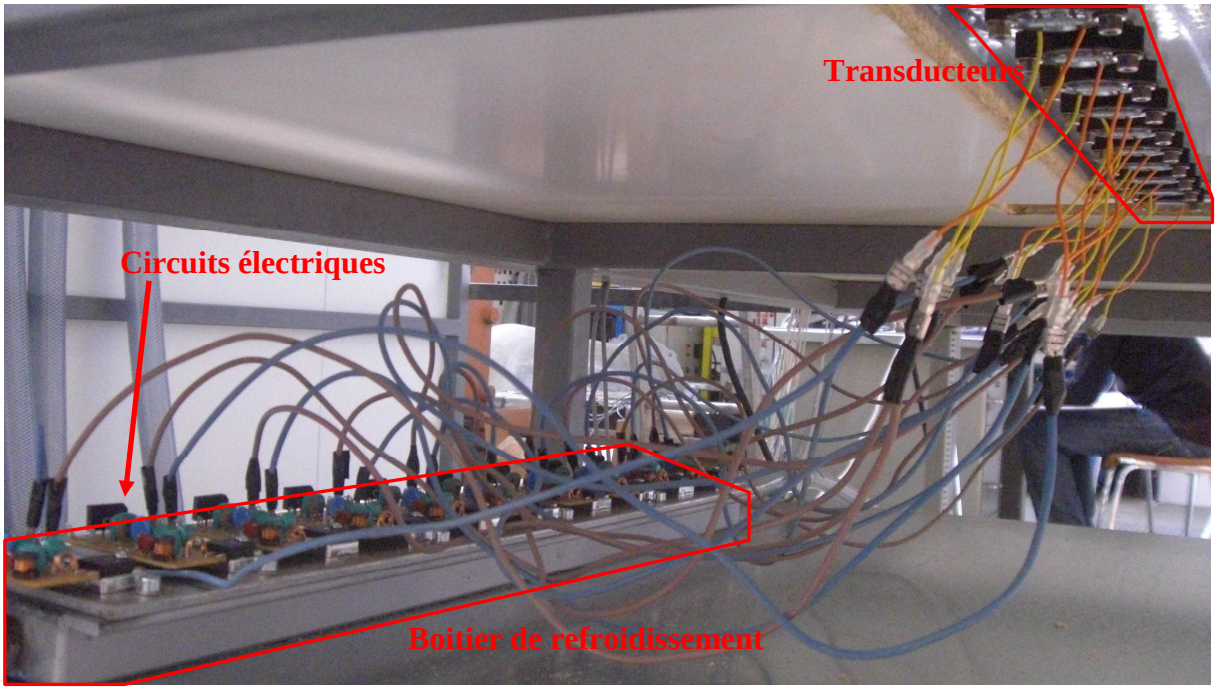


Figure III- 12 : Photo du montage des transducteurs.

Les dix transducteurs sont alimentés par l'intermédiaire d'un transformateur qui permet de convertir la tension du réseau en une tension acceptable (environ 48V). C'est donc un transformateur monophasé, d'une puissance de 300VA et possédant 10 sorties par câbles souples.

4. Instrumentations et mesures

Pour exploiter les expériences menées sur la boucle NIDUS, un grand nombre de paramètres physiques doivent être mesurés, il s'agit des débits massiques d'air et d'eau (en entrée et sortie), de pression absolue, de températures et des pertes de pression dans différentes parties de la section d'essais. Les différentes mesures présentes sur la boucle vont alors être détaillées. Dans un premier temps, le système d'acquisition de données est présenté.

4.1 Système d'acquisition

Les signaux des différents capteurs sont dirigés vers une centrale d'acquisition Agilent 34970 avec deux cartes de 20 voies, de modèle Agilent 34901A Cette centrale est reliée à un ordinateur.
Sur la première carte, toutes les données relatives à des pressions sont regroupées : celles des capteurs différentiels, du capteur de pression absolue ainsi que celles des venturis.
La seconde carte permet d'avoir quant à elle toutes les données des débits massiques d'entrée et sortie d'eau, le débit d'entrée de l'air et également toutes les températures relevées par les thermocouples.

Lors des mesures de données, celles-ci sont enregistrées toutes les 5 secondes et stockées dans un fichier informatique. Tous les capteurs ont la même fréquence d'acquisition. Chaque

enregistrement a une durée d'environ 5 minutes afin de pouvoir avoir plus d'une cinquantaine de données à moyenner, une fois le fonctionnement stabilisé.

4.2 Mesures de température

La température est prise à 4 points, deux en entrée et deux en sortie. En entrée, la prise de température est effectuée pour chaque phase (eau et air) juste avant les mélangeurs, afin d'avoir une information sur les conditions expérimentales qui sont présentes dans la section d'essais. Les deux autres sont placées aux sorties d'eau, la ligne de mesure et la ligne d'égout pour connaitre la température de l'eau en sortie, notamment sur la ligne analysée. La totalité des mesures est réalisée avec des thermocouples de type K. Cette mesure permet de déterminer les conditions dans lesquelles sont faites les expériences et ainsi déterminer les propriétés physiques des fluides aux températures caractéristiques.

4.3 Mesures de pression

Le capteur de pression absolue installé sur la boucle est un transmetteur de pression de la marque Keller, de la série 23 SY. Sa plage de mesure est de 0 à 5 bars. L'incertitude de ce capteur est de 0,3% de la pleine échelle. Cet appareil permet de déterminer la pression à l'entrée du distributeur et également la pression à l'entrée des Venturis de marque Preso. Le choix de la pression mesurée se fait par le biais d'un tableau de vannes reliant les prises de pressions des Venturis et de l'entrée du distributeur, au capteur.

Les mesures de pertes de pression s'effectuent en différents points de la boucle d'essais. Les capteurs différentiels présents sur la section d'essai mesurent les pertes de charges dans chaque canal. Un réseau hydraulique (Figure III- 13) est établi pour choisir le canal à analyser avec un capteur KDG de série 4000 et de plage 0-50 mbar avec une incertitude de 0,2% de la pleine échelle. Un seul canal est analysé à la fois pour déterminer les pertes de pression en son sein.

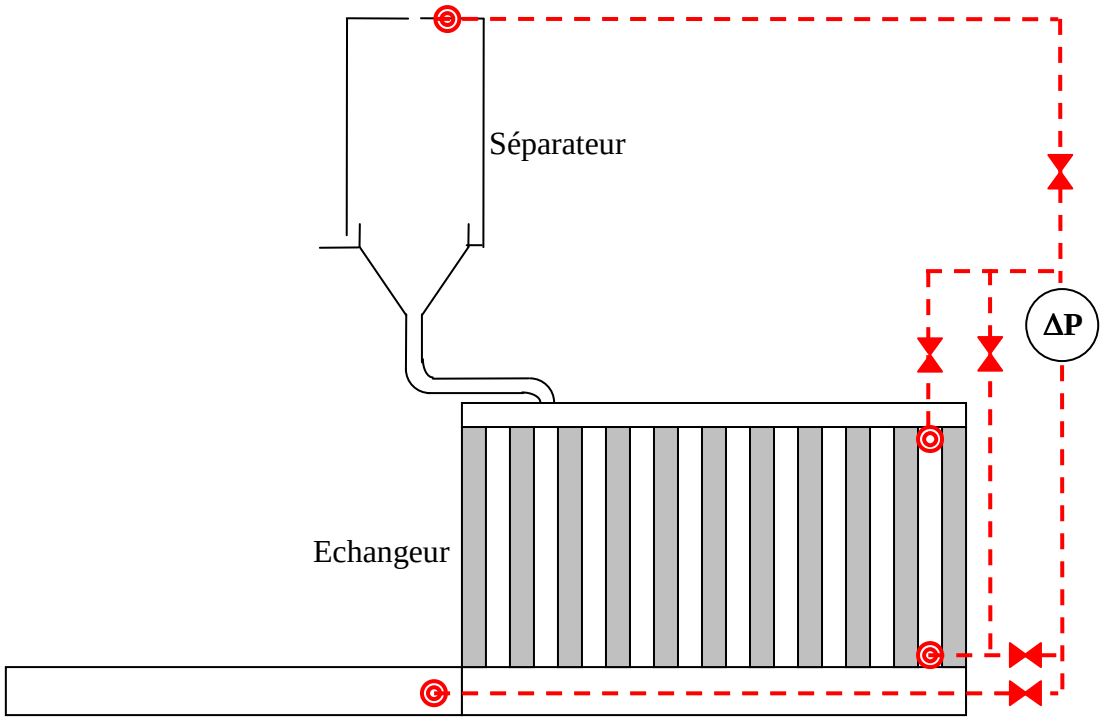


Figure III- 13 : Schéma de principe des zones de mesures des pertes de pression.

Un capteur de pression différentielle de la marque Fuji electric 0-432mmCE bar est relié aux venturis de faible débit comprenant une incertitude de 0,065% de la pleine échelle, tandis que chaque venturi pour les grands débits un capteur est directement intégré dans l'appareil de la marque Kobold.
Deux capteurs de pressions différentielles sont placés en sortie d'eau, un modèle 2051CD de la marque Rosemount et d'échelle 0-1 bar sur la ligne de mesure et l'autre, un Schlumberger de même échelle, sur les lignes de mesure utilisées. Ces deux appareils nous permettront de savoir si la pression en amont de la vanne de régulation est constante dans les lignes de sorties (mesures et égout). Les deux capteurs possèdent la même incertitude, à savoir 0.1% de l'étendue de mesure. Ces deux capteurs permettent, par une mesure de pression différentielle entre l'amont de la vanne de régulation et l'atmosphère, de déterminer la hauteur d'eau sur les lignes de mesures et la ligne d'évacuation directe vers les égouts.

4.4 Mesures de débit

Les débits d'air et d'eau sont mesurés à l'entrée et à la sortie de la boucle. A l'entrée, cela permet de déterminer le titre massique à l'entrée du distributeur et en sortie celui de chaque canal. Il est ainsi possible d'établir les débits théoriques par canal pour une distribution homogène des débits. La valeur des débits est conditionnée par les débits maximaux disponibles sur le réseau d'eau et le réseau d'air comprimé et le titre massique souhaité. Le débit maximal disponible avec le réseau utilisé est de 30 kg/h pour l'air de et 7000kg/h pour l'eau. Un débit maximal d'entrée de l'ordre de 1000 kg/h a été choisi pour l'eau et de 30 kg/h pour l'air. Cette configuration correspond à un titre de 4%. Le débit minimal d'eau choisi en entrée est de 10 kg/h avec toujours la même valeur pour l'air ; ceci

permet d'atteindre un titre massique de 80%. Cela nous permet de balayer une grande gamme de titres. Les deux débitmètres à l'entrée sont des débitmètres Coriolis Micro Motion de modèle F050S. L'appareil pour mesurer le débit d'eau est étalonné de 10 kg/h à 1000 kg/h. Celui pour mesurer le débit d'air est étalonné pour 1 à 49,8 kg/h. Les incertitudes des deux appareils sont les mêmes c'est-à-dire que pour des valeurs supérieures à 272 kg/h l'incertitude est de 0,2% de la mesure. En dessous de cette valeur, l'incertitude devient égale à :

$$incertitude(\%) = \frac{0{,}544}{débit} \times 100 \qquad \text{(III.1)}$$

En sortie, en raison d'une probable mauvaise distribution, la plage de débits possible en sortie est très étendue. Cependant, toute la gamme de mesure est assurée par un débitmètre.

En effet, un Coriolis Micro Motion de modèle F050S, identique à celui en entrée, est utilisé et possède donc la même incertitude. Son étendue de mesure après étalonnage est de 5 à 500 kg/h.

Il est important de noter que la mise en mouvement de la phase liquide après son passage dans les séparateurs se fait uniquement par gravité. Or le débitmètre Coriolis peut générer une forte perte de charge dépendant du débit le traversant (0,98 bar pour le débit maximal et 0,02 bar pour un débit égal à $1/20^{ème}$ du débit maximal). C'est pourquoi l'installation est placée en hauteur par rapport aux débitmètres de sortie. La distance verticale correspond à environ huit mètres. De cette façon, grâce à la gravité, les pertes de charges générées par le débitmètre peuvent être vaincues. En régime permanent, il est nécessaire de maintenir une hauteur de colonne d'eau stable en fonction du temps pour mesurer correctement le débit de sortie. Cette stabilisation de la hauteur de colonne d'eau est assurée par la vanne de régulation (V_{SM}). Le contrôle de cette stabilité peut se faire grâce aux tuyaux transparents placés en aval des vannes de mesure ou de l'égout.

En ce qui concerne l'air, la plage est moins étendue car la gamme de débits en entrée est moins étendue. En sortie il est possible de mesurer entre 0,35 m^3/h et 15 m^3/h. Pour cela deux appareils en série sont utilisés : deux venturis. Ces appareils ont été choisis car ils ne sont pas sensibles à l'eau au cas où certaines gouttes seraient entraînées par l'air. Ils seront disposés sur chaque ligne de sortie d'air afin d'avoir la même configuration pour chacune.

Pour la plage haute, des débitmètres de la marque Kobold sont choisis. Le modèle sélectionné (RCD 1103L G4 C34P/C) permet de mesurer des débits entre 3 et 27 Nm^3/h. L'incertitude de ce capteur est de 3% de sa pleine échelle. La valeur fournie par le capteur est directement en Nm^3/h. Leur photo est présentée Figure III- 14.

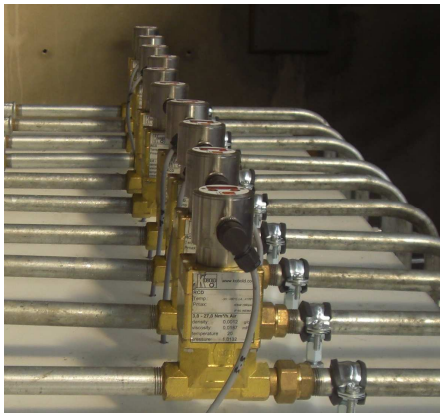


Figure III- 14 : Photo des venturis Kobold.

La plage basse est mesurée par des venturis de la marque PRESO. Le modèle choisi (V-50-10-NPT) permet de déterminer des débits d'air compris entre 0,2 et 3 Nm^3/h. Contrairement aux venturis Kobold, ces appareils n'ont pas un boitier électronique individuel. Un capteur de pression différentielle est alors relié aux prises de pression présentes sur le venturi. Ce capteur a une plage de 0 à 42 mbar avec une incertitude de 0,065% de la pleine échelle.

Un récapitulatif de toutes les incertitudes des différents capteurs présents sur la boucle est présenté dans le Tableau III- 2.

Tableau III- 2 : Récapitulatif des capteurs.

Mesure	Type de capteur	Plage de mesure	Incertitude relative
Mesure de Pression			
Entrée SE	Absolu	0-5 bar	0,3% de la pleine échelle
Perte de pression petit	Différentiel	0-50 mbar	0,2% de la pleine échelle
Perte de pression grand	Différentiel	0-275 mbar	0,2% de la pleine échelle
Perte de pression venturi Preso	Différentiel	0-42 mbar	0,065% de la pleine échelle
Pression vanne mesure	Différentiel	0-1bar	0,1% de la pleine échelle
Pression vanne égout	Différentiel	0-1bar	0,1% de la pleine échelle
Mesure de Débit			
Entrée eau	Coriolis	10-1000 kg/h	Si débit > 272 kg/h : 0,2% de la mesure, sinon : (54,4/Débit)% de la mesure
Entrée air	Coriolis	1-49,8 kg/h	(54,4/Débit)% de la mesure
Sortie eau	Coriolis	5-500 kg/h	Si débit > 272 kg/h : 0,2% de la mesure, sinon : (54,4/Débit)% de la mesure
Sortie air Kobold	Venturi	3-27 Nm3/h	3% de la pleine échelle

5. Exploitation des mesures

Cette section détaille les calculs nécessaires pour déterminer les différentes grandeurs mesurées et leur incertitude associée.

5.1 Calcul des débits d'air

Les deux venturis à disposition pour la mesure du débit d'air ne donnent pas directement la bonne valeur du débit parcourant chaque canal. En effet, pour le Venturi de la marque Kobold, les données enregistrées correspondent à un débit dans les conditions suivantes : pression atmosphérique et une température de 20°C. Il faut donc effectuer une conversion pour obtenir cette valeur pour les conditions expérimentales.
Le débit réel circulant s'obtient à partir de la valeur mesurée par le capteur suivant la relation suivante:

$$Q(kg/h) = \rho \times \frac{P_N Q_{mes}(Nm^3/h) T_{mes}}{P_{mes} T_N} \quad \text{(III.2)}$$

Sachant que la masse volumique s'exprime en fonction de la pression et de la température expérimentales, la formule précédente peut s'exprimer de la manière suivante (en considérant l'air comme un gaz parfait) :

$$Q(kg/h) = \frac{P_N Q_{mes}(Nm^3/h)}{R T_N} \quad \text{(III.3)}$$

Pour les venturis de la marque PRESO la méthode de calcul est différente car les données enregistrées via le capteur sont des pertes de pression. Il faut donc déterminer un débit correspondant aux pertes de pression mesurées. La formule générale permettant de lier le débit à la perte de pression est la suivante (Iso 5167) :

$$Q(kg/h) = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho} \times 3600 \quad \text{(III.4)}$$

Dans cette formule, deux coefficients sont présents. Ces coefficients sont ε, le coefficient de détente et C le coefficient de décharge. Ces deux facteurs dépendent du débit d'air qui passe à travers le venturi. Leur formule prend donc en compte cette grandeur. Le premier peut s'exprimer grâce à la formule empirique suivante (Iso 5167) :

$$\varepsilon = 1 - \left(0{,}351 + 0{,}256\beta^4 + 0{,}93\beta^8\right)\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/\kappa}\right] \quad \text{(III.5)}$$

Avec κ étant le rapport des deux capacités de l'air (C_P / C_V),

le second est (Iso 5167) :

$$C = \frac{Q(m^3/h)\sqrt{1-\beta^4}}{\frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho}} \quad \text{(III.6)}$$

β étant le rapport du diamètre du col sur celui de l'entrée du venturi.

Le fabricant ayant fourni les tables de ces coefficients correspondant aux pertes de pressions mesurées par l'appareil, une vérification a été faite pour s'assurer que les calculs concordaient avec les mesures.

Chaque Venturi a donc été testé en faisant passer l'air uniquement dans le canal associé. Le débit calculé est alors comparé à la valeur de référence donnée par le débitmètre Coriolis en amont de la section d'essai.
Le résultat montre une bonne concordance (moins de 1% d'écart en moyenne) entre les deux mesures ce qui valide la méthode de calcul.

5.2 Correction sur les débits d'eau sortant

Les débits d'eau en sortie sont mesurés par un Coriolis. Cependant il faut effectuer une légère correction prenant en compte l'accumulation de liquide au sein de la colonne d'eau lors de l'enregistrement de la mesure lorsque la stabilisation de la hauteur de cette colonne d'eau n'est pas assurée. La correction appliquée représente la variation de la hauteur de la colonne d'eau au-dessus du débitmètre de mesure.

La correction est réalisée par une mesure visuelle de cette variation, dont l'erreur peut être estimée à ±0,5mm (environ ± 0.11 kg/h).

5.3 Calcul de la distribution diphasique et son incertitude

Les mesures sont faites de manière séquentielle, canal par canal en jouant sur les vannes d'isolation de chaque canal, entre la sortie mesure et la sortie rejet pour l'eau. Pour chaque canal, le débit d'eau et le débit d'air sont mesurés.

Pour mesurer le débit d'eau dans un canal en se reportant au schéma de la Figure III- 2, la vanne V_{M1i} est ouverte et la vanne V_{Ri} est fermée. Pour tous les autres canaux, c'est l'inverse.

La proportion du débit passant par le canal mesurée est calculée de la manière suivante :

$$Q_{L,i}(\%) = \frac{Q_{L,i}(kg/h)}{Q_L(kg/h)} \text{ pour la phase liquide et,} \qquad \text{(III.7)}$$

$$Q_{G,i}(\%) = \frac{Q_{G,i}(kg/h)}{Q_G(kg/h)} \text{ pour la phase gazeuse.} \qquad \text{(III.8)}$$

Sachant que pour avoir une distribution homogène, le pourcentage devrait être égal à $\frac{1}{nombre\ de\ canaux}$, ce qui correspond donc à 1/10 si tous les canaux de la section d'essais sont exploités.

Le second point de cette partie concerne l'incertitude globale. En effet les incertitudes sont celles des mesures de débits ce qui correspond à la formule suivante calculée à partir de la méthode des perturbations séquentielles décrite par **MOFFAT [1988]** :

Pour une fonction avec *n* variables indépendantes x_i, $f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$:

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \Delta x_i^{\,2}} \qquad \text{(III.9)}$$

Ce qui donne alors pour l'incertitude sur le ratio la formule suivante :

$$\Delta Distribution = \sqrt{\left(\frac{Q_{sortie}}{\left(Q_{entrée}/10\right)^2}\right)^2 \Delta Q_{entrée}{}^2 + \left(\frac{1}{\left(Q_{entrée}/10\right)}\right)^2 \Delta Q_{sortie}{}^2} \qquad \text{(III.10)}$$

Pour l'incertitude sur le ratio liquide, l'équation est donc la suivante :

$$\Delta Distribution_{liq} = \sqrt{\left(\frac{Q_{eau\ sortie} + dh}{\left(Q_{eau\ entrée}/10\right)^2}\right)^2 \Delta Q_{eau\ entrée}{}^2 + \left(\frac{1}{\left(Q_{eau\ entrée}/10\right)^2}\right)^2 \Delta Q_{eau\ sortie}{}^2 + \left(\frac{1}{\left(Q_{eau\ entrée}/10\right)^2}\right)^2 \Delta dh^2} \qquad \text{(III.11)}$$

dh étant la correction réalisée sur le débit liquide sur la colonne d'eau en *kg/s*.

L'incertitude sur le débit en entrée dépend de la valeur de celui-ci. En effet, pour un débit supérieur à 272 kg/h, l'incertitude est de 0,2% de la mesure, alors que pour les débits inférieurs l'incertitude est alors de (54/Débit)% de la mesure.
L'incertitude sur la phase gazeuse est calculée par la formule générale suivante :

$$\Delta Distribution_{gaz} = \sqrt{\left(\frac{Q_{air\ sortie}}{\left(Q_{air\ entrée}/10\right)^2}\right)^2 \Delta Q_{air\ entrée}{}^2 + \left(\frac{1}{\left(Q_{air\ entrée}/10\right)}\right)^2 \Delta Q_{air\ sortie}{}^2} \qquad \text{(III.12)}$$

Concernant le débit d'air en entrée, mesuré par le débitmètre Coriolis, le débit est toujours inférieur au 272 kg/h, de ce fait, l'incertitude sur cette mesure est de (54/Débit)% de la mesure. Cependant, la mesure du débit de sortie peut être faite via deux venturis différents. Le premier, donne une valeur directement en Nm^3/h, avec l'incertitude associée. Le second venturi, qui est mesuré par un capteur de pression, donne une incertitude sur cette perte de pression mesurée. L'incertitude sur les plus faibles débits d'air en sortie est alors la suivante :

$$\Delta Q_{air\ sortie} = \Delta_{\Delta p}\left(A \times C' \times \varepsilon \times \sqrt{2\Delta p \rho} + A \times C \times \varepsilon' \times \sqrt{2\Delta p \rho} + A \times C \times \varepsilon \times \frac{\rho}{\sqrt{2\Delta p \rho}}\right) \qquad \text{(III.13)}$$

C et ε étant respectivement les coefficients de décharge et de détente. $\Delta_{\Delta p}$ est l'incertitude du capteur de pression.

A est un coefficient regroupant les constantes spécifiques au venturi soit: $A = \frac{d^2 \times \pi}{4\sqrt{1-\beta^4}}$

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et analyse.

1. Introduction.

Après avoir présenté les moyens expérimentaux, les résultats sont présentés et analysés dans ce quatrième chapitre. L'influence des paramètres opératoires, dont les débits des deux phases, est également étudiée. L'ajout des ultrasons est ensuite examiné par le biais du changement du comportement de la distribution des deux phases. Différentes configurations ont été étudiées et seront exposées par la suite.

Le débit des deux phases est mesuré pour chaque canal. De cette façon, le pourcentage du débit d'entrée passant dans le canal à ce moment est déterminé. La distribution des deux phases dans les dix canaux est alors calculée pour chaque condition d'entrée. En effet, le débit moyen étant sensiblement le même car ne dérivant pas au cours de l'expérience, ce calcul est alors possible. Plusieurs conditions expérimentales ont été testées afin de couvrir une large gamme de densité de flux massique et également de titre massique. L'ensemble de ces conditions est répertorié dans le Tableau IV- 1. Tous les essais ont été réalisés dans des conditions adiabatiques à une température proche de 20°C. Les essais ont été faits avec trois configurations de vannes qui sont numérotée 0, 1 et 2 par la suite. La première correspond à une ouverture complète de ces vannes. Comme les résultats, qui seront présentés par la suite, n'étaient pas similaires aux distributions observées dans la littérature, il a été décidé d'introduire des pertes de pression supplémentaires par le biais de dix vannes placées en aval des dix canaux ce qui a donné lieu à la configuration 1 (avec de fortes pertes de pression) et la configuration 2 (avec de faibles pertes de pression). Celles-ci ont permis de modifier la distribution des deux phases de telle façon à avoir des répartitions similaires à celles de la littérature. L'ensemble des conditions testées pour la configuration 0 sont présentées dans le Tableau IV- 1.

Tableau IV- 1 : Conditions expérimentales de l'étude de la distribution.

		Q_{air} ($kg.h^{-1}$)			
		7	13	20	30
Q_{eau} ($kg.h^{-1}$)	100	x	x	x	x
	250	x	x	x	x
	375	x	x	x	x
	500	x	x	x	x
	600	x	x	x	x
	700	x	x	x	
	800	x	x	x	

Ces conditions permettent d'avoir une densité de flux massique allant de 60 $kg.m^{-2}.s^{-1}$ à 450 $kg.m^{-2}.s^{-1}$ et un titre massique de moins de 1% à plus de 23% en entrée de section d'essais.

A titre indicatif, un essai s'étale en moyenne sur une durée d'1h30. Cette durée est liée à la mesure en série des dix canaux. Un bilan massique est fait sur les deux phases pour chaque essai afin de vérifier qu'il n'y a pas de problème de mesure, d'accumulation ou autre.

Ce chapitre est séparé en plusieurs sous-parties correspondant donc aux différentes configurations des vannes. La première partie est liée au prototype d'échangeur thermique

pour lequel le système de vannes n'est pas modifié, ce qui est défini comme étant la configuration 0. La deuxième présente les résultats obtenus avec la configuration 1 (avec de fortes pertes de pression) et la configuration 2 (avec de faibles pertes de pression). Celles-ci ont permis de modifier la distribution des deux phases de telle façon à avoir des répartitions similaires à celles de la littérature. Enfin, des essais en fermant certains canaux ont été conduits afin d'étudier l'influence de la distance entre eux et également de leur nombre.

L'obtention d'une distribution est très sensible au débit d'air, car c'est cette phase qui crée le plus de pertes de pression. Ainsi, deux configurations avec des fermetures partielles des vannes ont été déterminées afin de pouvoir étudier l'influence du débit liquide sur la distribution avec deux débits d'air différents (7 et 30 kg/h). La configuration pour le plus faible débit a néanmoins été utilisée pour analyser l'effet de l'augmentation du débit de la phase gazeuse.

Afin d'obtenir la distribution typique attendue, un premier essai de calibrage est réalisé avec un débit d'eau de 600 kg/h pour un débit de gaz de 7 kg/h et de 375 kg/h pour un débit gazeux de 30kg/h. Les vannes de réglages sont fermées de façon décroissante en avançant dans le distributeur afin de créer des pertes de pression plus importantes en sortie des premiers canaux qu'en sortie des derniers. Cela permet ensuite de modifier l'ouverture ou la fermeture des vannes afin d'ajuster les débits dans chaque canaux. Les débits maximaux d'eau n'ont pas été étudiés dans cette partie car leurs résultats précédemment exposés, montrent une faible influence des ultrasons, de plus la pression devient trop grande pour la section d'essais à fort débit d'eau. Les conditions opératoires utilisées sont présentées dans le Tableau IV- 2.

Tableau IV- 2 : Conditions expérimentales pour la distribution forcée.

		Q_{air} ($kg.h^{-1}$)			
		7	13	20	30
Q_{eau} ($kg.h^{-1}$)	100	X			X
	250	X	X	X	X et X
	375	X			X
	500	X			X
	600	X			X

Les essais avec une croix noire représentent ceux effectués avec la configuration 1, celle pour un débit d'air de 7 kg/h. Les croix rouges concernent les essais avec la configuration 2 : pour un débit de 30 kg/h en gaz. Les essais en fonction de différents débits d'eau n'ont pas été réalisés à 13 kg/h et 20 kg/h d'air car l'étude de l'influence du débit d'eau est déjà faite pour un débit d'air faible (7 kg/h) et fort (30 kg/h). Les valeurs intermédiaires n'auraient pas forcément apportés plus d'informations car une nouvelle configuration de vannes correspond à chaque débit d'air.

Chaque partie comprend une analyse de la distribution diphasique sans l'ajout d'ultrasons dans un premier temps, et dans un second temps, l'utilisation des ultrasons est étudiée. Des visualisations du distributeur par le biais d'une caméra rapide ont été réalisées afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans la distribution avec et sans les ultrasons.

Les pertes de pression seront analysées en fin de chapitre. L'étude portera principalement sur la différence des pertes de pression lors de l'ajout des ultrasons mais également sur la comparaison avec différents modèles.

Enfin une dernière partie se concentrera sur l'étude des ultrasons dans le distributeur, notamment le comportement de la fontaine à ultrasons en fonction de différentes conditions expérimentales.

2. Distribution.

Comme présenté dans le chapitre précédent, la section d'essais dispose d'un distributeur horizontal avec dix canaux verticaux dans lesquels l'écoulement se fait de façon ascendante. Deux paramètres opératoires sont étudiés : la densité de flux massique *G* et le titre massique *x*. Ces deux paramètres sont réglés à l'aide du débit d'air et du débit d'eau. Le débit massique total entrant dans le distributeur est noté $\dot{M}_0$ et le titre massique associé est x_0. L'équation de la conservation de masse en entrée du distributeur est alors écrite de la manière suivante :

$$\dot{M}_0 = x_0 \cdot \dot{M}_0 + (1 - x_0) \cdot \dot{M}_0 \qquad \text{(IV.1)}$$

$$Q_G = \dot{M}_{0,v} = x_0 \cdot \dot{M}_0 \qquad \text{(IV.2)}$$

$$Q_L = \dot{M}_{0,l} = (1 - x_0) \cdot \dot{M}_0 \qquad \text{(IV.3)}$$

$\dot{M}_{0,v}$ et $\dot{M}_{0,l}$ étant respectivement les débits massiques de la phase gazeuse (air) et de la phase liquide (eau).

En sortie de chaque canal, les deux phases sont séparées grâce à des séparateurs eau-air et ensuite elles sont mesurées par des débitmètres. Le titre de vapeur dans chacun des canaux peut également être déterminé à l'aide des débits des deux phases. Le débit massique total $\dot{m}_i$ parcourant un canal *i* peut s'exprimer de la façon suivante avec l'équation de conservation de la masse.

$$\dot{m}_i = x_i \cdot \dot{m}_i + (1 - x_i) \cdot \dot{m}_i \qquad \text{(IV.4)}$$

Afin de caractériser la distribution des deux phases, il est nécessaire de représenter le débit parcourant chaque canal par rapport au débit massique moyen pour une distribution homogène. Ce débit moyen théorique pour une phase *k* est calculé de la façon suivante :

$$\overline{\dot{m}}_{th,k} = \frac{\dot{M}_{0,k}}{N} \qquad \text{(IV.5)}$$

Où *k* représente la phase étudiée et *N* le nombre total de canaux.

La distribution est alors déterminée par le biais du ratio entre le débit passant réellement dans le canal et le débit moyen théorique. Le ratio de chaque canal est donc calculé grâce à la formule suivante :

$$r_{i,k} = \frac{\dot{m}_{i,k}}{\overline{\dot{m}}_{th,k}} \qquad \text{(IV.6)}$$

De cette façon, lorsque le ratio est supérieur à 1, cela signifie que le canal est suralimenté par la phase considérée, alors que, lorsque la valeur est inférieure à 1, le canal est sous-alimenté par cette même phase.

Afin de faciliter la lecture des résultats des distributions, il a été décidé de lier chaque point de mesure entre deux canaux par une droite. Cette liaison n'a pas de justification scientifique mais peut simplement aider le lecteur dans l'analyse des graphiques. De plus les incertitudes sur les points expérimentaux sont étudiées sur les graphiques de comparaison avec et sans ultrasons afin de conforter la pertinence de ces résultats.

2.1 Résultats pour la configuration 0.

2.1.1. Sans ultrasons.

2.1.1.1. Influence du débit d'air.

La première configuration étudiée correspond à celle décrite dans le chapitre précédent. Toutes les conditions expérimentales répertoriées dans le Tableau IV- 1 ont été testées avec cette configuration. Ceci permet en effet une première approche sur la distribution spécifique à la section d'essais. Cela permet également d'observer l'influence des paramètres opératoires sur la répartition des deux phases. Ces paramètres opératoires sont les débits de la phase liquide et gazeuse. Ceci permet alors de déterminer un débit massique total ainsi qu'un titre massique en entrée de la section d'essais.

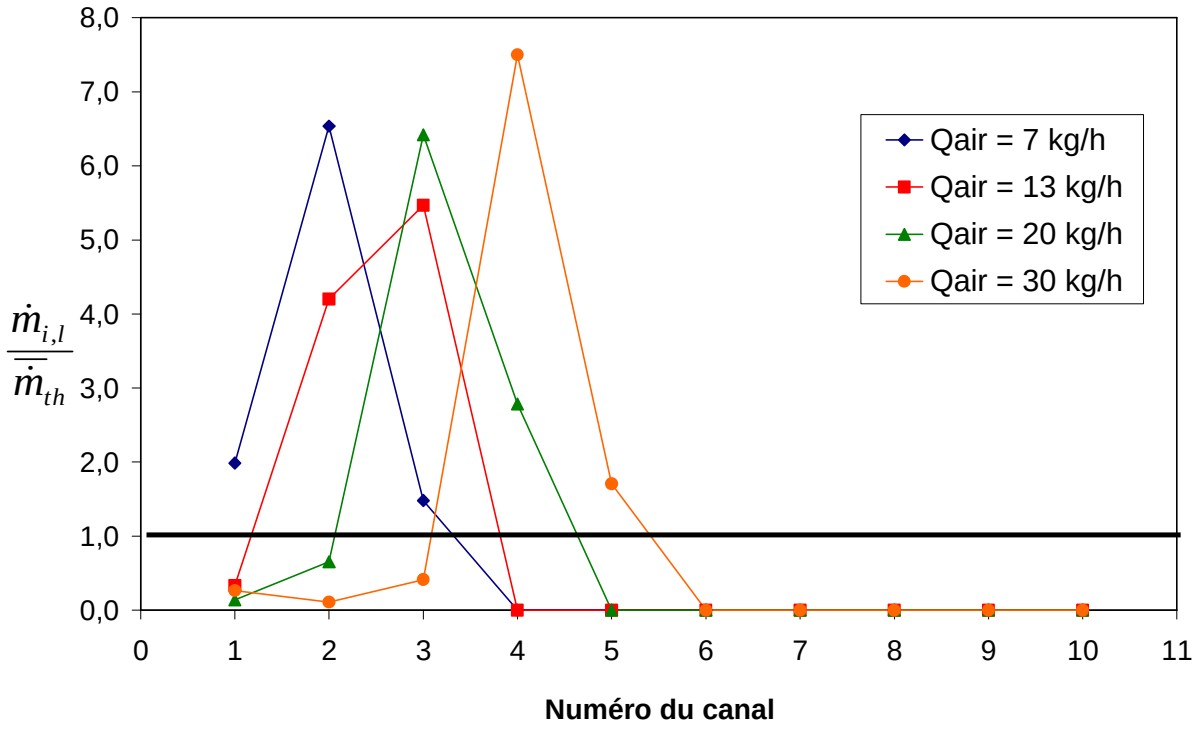


Figure IV- 1 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 250kg/h.

La Figure IV- 1 montre l'évolution de la distribution de la phase liquide pour différentes conditions. Ce graphique permet d'observer l'influence du débit d'air lorsque le débit d'eau est gardé constant à une valeur proche de 250 kg/h. Ces données permettent d'étudier la distribution spécifique à la section d'essais. Pour les quatre conditions, une suralimentation

prononcée dans les premiers canaux avec un maximum dépendant du débit d'air est visible. L'eau passe principalement dans deux ou trois canaux situés autour du maximum. Les derniers canaux ne sont pas parcourus par un débit liquide. Le dernier canal alimenté varie en fonction du débit d'air : plus le débit d'air est important, plus le nombre de canaux alimentés est important. Cette « amélioration » est également accompagnée d'un décalage du maximum de suralimentation. En contrepartie, les premiers canaux deviennent sous-alimentés avec cette augmentation du débit d'air. Cette évolution de la distribution en fonction du changement d'une condition opératoire semble logique. En effet, plus le débit d'air est important, plus cette phase va entraîner le liquide vers le fond du distributeur. Ceci a donc pour conséquence de décaler le maximum. La transition est d'ailleurs visible avec les débits d'air de 7 à 30 kg/h. Il est alors clairement visible qu'un décalage des canaux suralimentés s'effectue.

Cette distribution particulière de la phase liquide se retrouve également sur la Figure IV- 2 qui représente elle aussi la distribution liquide en fonction de différents débits d'air, mais cette fois-ci pour un débit d'eau constant à 500 kg/h.

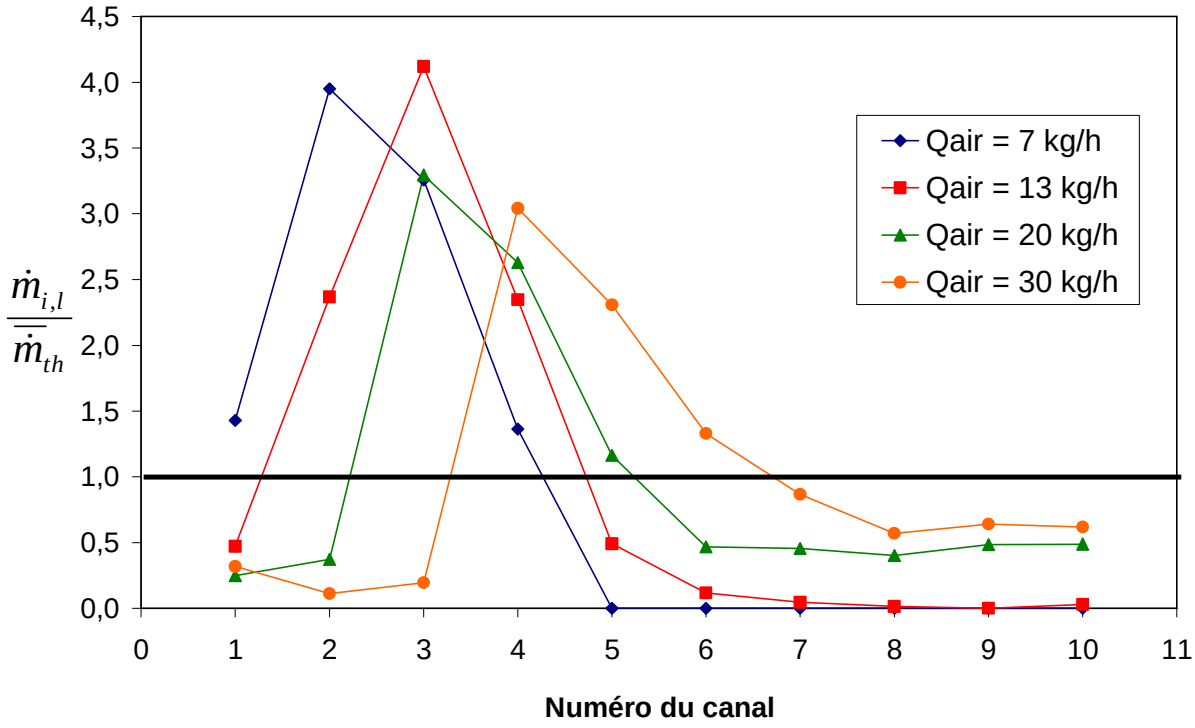


Figure IV- 2 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 500kg/h.

Sur ce graphique, les observations possibles sont similaires à celles faites pour un débit d'eau de 250 kg/h. Cependant certaines différences apparaissent. En effet, les derniers canaux, à partir d'un débit d'air supérieur à 13 kg/h présentent un débit d'eau les parcourant. Ce débit d'eau devient d'autant plus important que le débit de la phase gazeuse augmente. Cette constatation concorde donc avec le fait que l'augmentation du débit d'air entraîne l'eau vers le fond du distributeur car la pression est plus importante à l'entrée du distributeur, ce qui permet donc d'alimenter dans un premier temps les derniers canaux, et dans un second temps, lorsque le débit gazeux d'entrée augmente, d'accroître la quantité de liquide traversant ces canaux. Le débit d'eau étant plus important dans ce cas, cela joue également sur le mouvement du fluide qui a alors tendance à se projeter plus rapidement vers le fond du distributeur. Une autre conséquence observée sur le premier graphique est le décalage du maximum. Il faut également noter que la valeur du maximum atteinte dans ce cas est inférieure à celle obtenue pour un débit d'eau de 250 kg/h. La répartition des débits liquide est

alors meilleure pour un débit d'eau supérieur. En effet, comme les derniers canaux sont traversés par un débit d'eau, la proportion de liquide passant dans le canal le plus suralimenté diminue. C'est pourquoi une baisse de ce maximum est observée. Phénomène qui n'était pas observé pour un débit d'eau de 250 kg/h car les derniers canaux ne sont jamais alimentés.

En ce qui concerne la distribution de la phase gazeuse, elle est très peu changée quel que soit le débit d'eau en entrée de la section d'essais, comme le montre la Figure IV- 3 et la Figure IV- 4. En effet, la répartition de cette phase est principalement influencée par son propre débit en entrée. La distribution de l'air est donc sensiblement la même pour un débit d'eau de 250 ou de 500 kg/h. Le premier graphique montre la distribution pour un débit de la phase liquide de 250 kg/h et le second pour un débit de 500kg/h

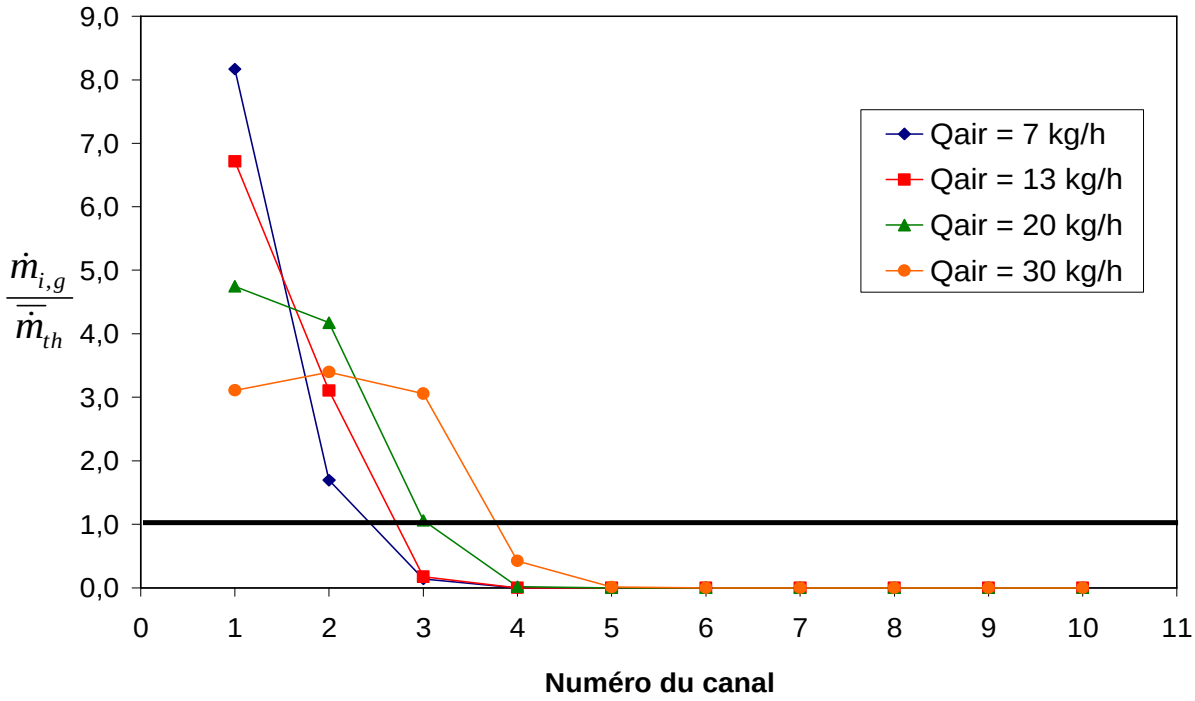


Figure IV- 3 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 250kg/h.

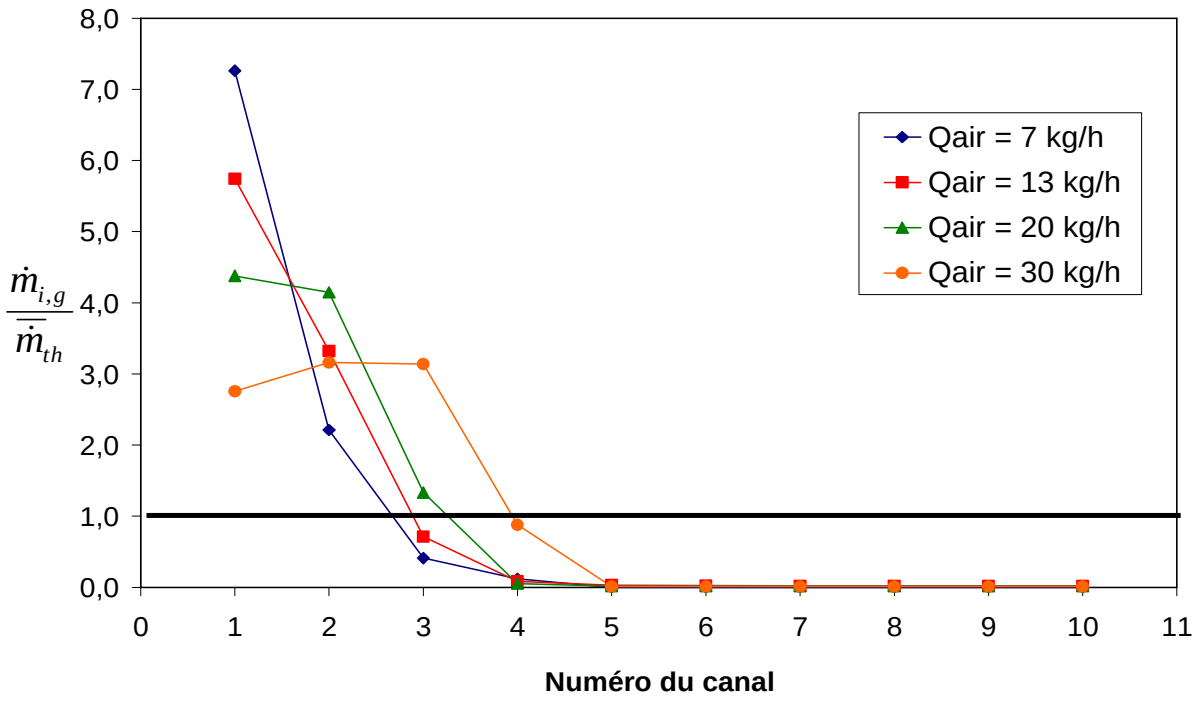


Figure IV- 4 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 500kg/h.

Ce graphique présente la répartition des débits massiques gazeux par rapport à une distribution homogène. Cette phase n'est pas correctement répartie entre les canaux. L'air ne passe, au maximum, que dans les cinq premiers canaux de la section d'essais, les autres canaux ne voient pas du tout passer d'air. Ce comportement montre que la section d'essais est surdimensionnée par rapport aux débits d'air utilisés pour ces essais. Lorsque le débit d'air augmente, cela a pour conséquence d'homogénéiser la répartition de cette phase dans les 4 premiers canaux. En effet, avec un débit d'air faible, la différence de ratio entre le premier et le second canal est importante (de l'ordre de 5 unités), alors que pour le débit maximal, ici 30 kg/h, les trois premiers canaux sont autour d'un ratio de 3. Ce changement de comportement s'observe notamment au niveau du canal numéro 2. Le ratio de ce canal va varier de façon significative jusqu'à obtenir une valeur proche de celle du premier canal, une fois celle-ci atteinte, le canal 3 commence à son tour à varier de façon significative. Une fois que le canal en aval a rejoint le ratio de celui en amont, ils évoluent de la même façon. Ceci est notamment visible entre l'essai à 20 et 30 kg/h pour les deux premiers canaux. Leurs valeurs absolues changent mais l'écart entre eux reste sensiblement le même. Cette évolution des points est liée aux pertes de pression générées par le passage de l'air. En effet, lorsque celles-ci atteignent une valeur « seuil », l'air préfèrera passer dans le canal suivant où les pertes de pression sont moins importantes. C'est alors de cette façon que les canaux ont tendance à tendre vers le même ratio. La diminution de la valeur de ces ratios peut cependant porter à confusion. En effet, lorsque le graphique est modifié avec les valeurs absolues des débits, les écarts sont différents. La Figure IV- 5 présente donc la distribution massique de l'air directement avec les débits massiques et non avec les ratios.

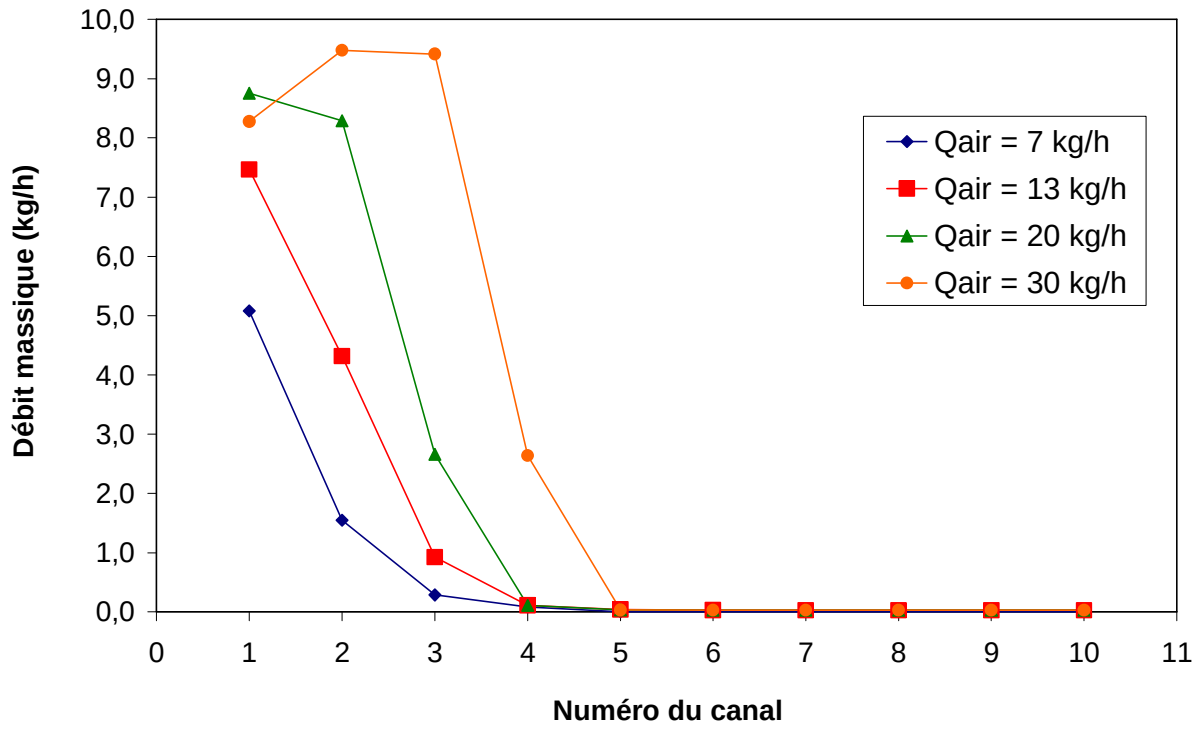


Figure IV- 5 : Distribution de la phase gazeuse en kg/h selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 500kg/h.

Avec ce graphique, l'analyse peut être complétée : le débit traversant le premier canal n'évolue pas aussi fortement en considérant les valeurs absolues. A partir d'un débit d'air de 13 kg/h en entrée, le débit d'air parcourant le premier canal n'augmente plus fortement. Les débits dans les canaux suivants viennent ensuite se positionner à des valeurs proches.

En revenant sur le graphique tracé avec les ratios (Figure IV- 4), il peut être remarqué que le fait que la valeur du premier canal devienne inférieure à celle du second est lié à la distribution liquide pour un débit d'air de 30 kg/h. Comme observé sur la Figure IV- 2, le premier canal est plus alimenté en eau, ce qui provoque des pertes de pression supplémentaires. C'est donc la raison de cette baisse du débit d'air dans le premier canal, afin d'avoir « l'équilibre » des pertes de pression maximales dans les canaux.

2.1.1.2. Influence du débit d'eau.

Après avoir étudié l'influence du débit d'air sur la distribution, l'influence de la phase liquide a également été analysée. Sept débits d'eau différents ont été testés. Le graphique de la Figure IV- 6 présente les résultats de la distribution liquide obtenus lorsque le débit d'eau est varié pour un débit d'air constant et égal à 7 kg/h.

Ce graphique montre une influence nette du débit d'eau sur sa distribution. Bien que le canal le plus suralimenté reste le même, la proportion du liquide passant par celui-ci diminue lorsque le débit augmente. Cependant la valeur absolue tend vers une valeur qui se situe autour de 200 kg/h. Il n'y a que pour le plus faible débit liquide que ce canal est inférieur à 150 kg/h (environ 75 kg/h). Ensuite, lorsque le débit massique de l'eau augmente, les ratios des quatre premiers canaux ont tendance à s'homogénéiser, permettant alors une distribution correcte entre ces canaux. Il est également important de noter qu'en dessous d'un débit de 500 kg/h, le quatrième canal n'est pas alimenté et qu'en dessous de 100 kg/h le troisième non plus.

Cependant, une fois qu'ils sont parcourus par un débit d'eau, ce ratio devient rapidement supérieur à 1. Un comportement différent est observable à partir du cinquième canal.

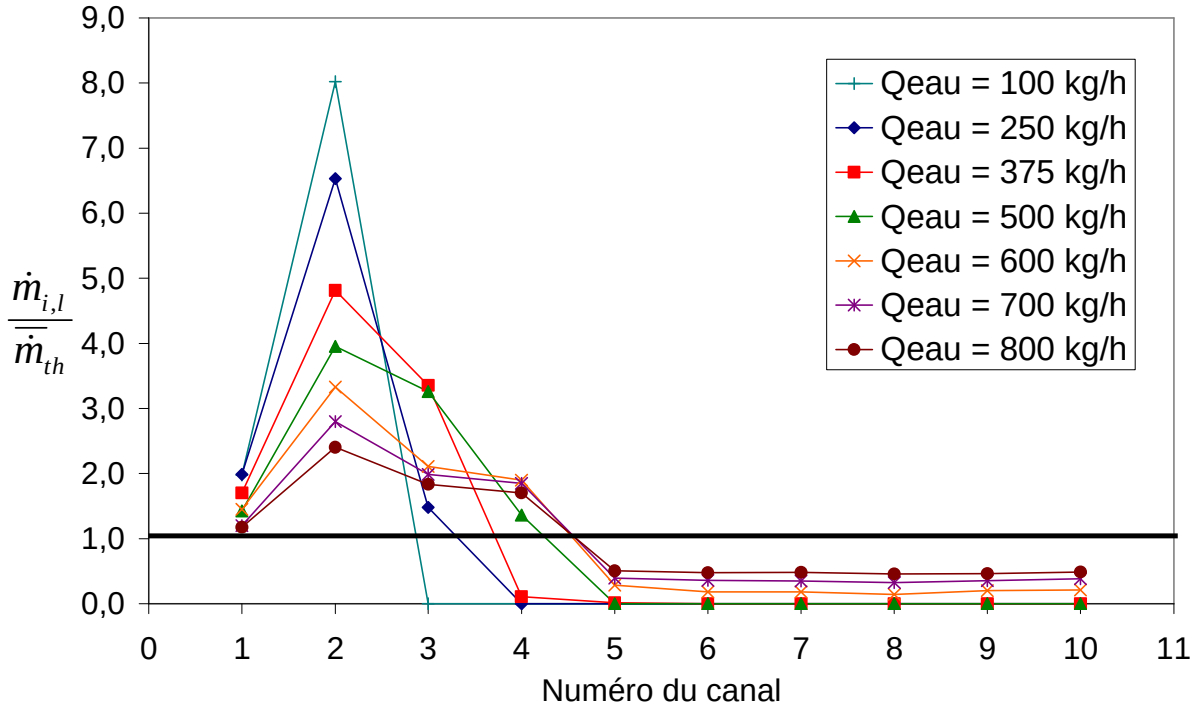


Figure IV- 6 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'eau pour Q_{air} = 7 kg/h.

En effet, du cinquième au dixième canal, un plateau est observé. Ce plateau a tendance à augmenter avec le débit. Cependant il faut un débit minimum pour commencer à voir de l'eau circuler dans ces derniers canaux. La limite du plateau correspond à la limite de la distribution gazeuse. Sur la Figure IV- 7, la distribution gazeuse dans les mêmes conditions est présentée. Le débit d'eau semble influencer d'une manière moins sensible la distribution de la phase gazeuse.

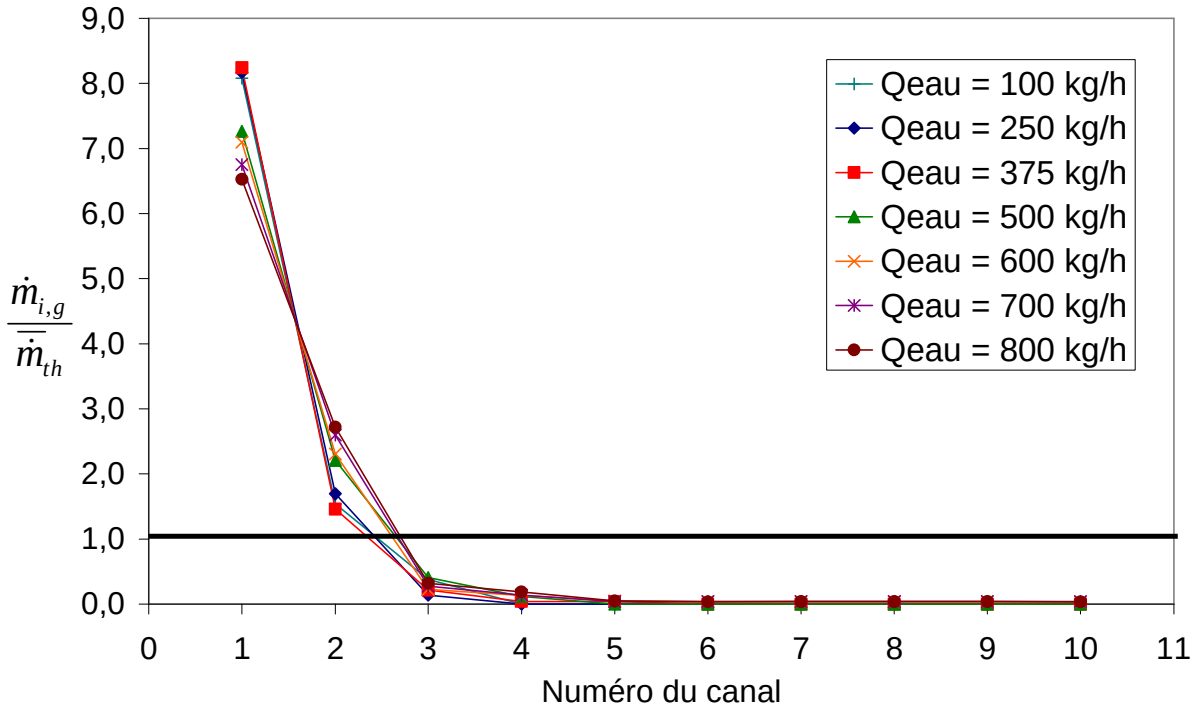


Figure IV- 7 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'eau pour Q_{air} = 7 kg/h.

Lorsque le débit de la phase liquide augmente, l'alimentation du premier canal en gaz a tendance à diminuer alors que celle du deuxième canal, à l'opposé, a tendance à augmenter. Ceci correspond à l'inverse de l'alimentation liquide pour ce deuxième canal. En effet, le débit d'air parcourant les deux premiers canaux se stabilise autour d'une certaine valeur (un ratio d'environ 7 pour le premier et de 2,5 pour le deuxième) pour des débits d'entrée supérieurs à 375 kg/h. Les autres canaux ne sont que très peu affectés par le changement du débit d'eau en entrée.
L'influence du débit de la phase liquide se retrouve également pour des débits d'air en entrée supérieurs à 7 kg/h. Les mêmes tendances sont alors observées pour les débits d'air de l'ordre de 13, 20 et 30 kg/h. Les différences notables sont liées au changement du débit d'air. En effet, comme expliqué précédemment, l'augmentation du débit gazeux va décaler la distribution liquide et permettra à la phase gazeuse de plus alimenter les canaux en aval une fois que les premiers ont atteint la limite de perte de pression.

2.1.1.3. Particularité de la distribution initiale.

En observant la distribution des deux phases, une observation s'impose. En effet, les données de la littérature (**Vist et Petterson [2004]**, **Kim et Sin [2006]**) pour une configuration avec un distributeur horizontal et des canaux verticaux avec écoulement ascendant, le liquide est principalement distribué dans les derniers canaux alors que la phase gazeuse prend la tendance inverse en alimentant préférentiellement les premiers canaux. La distribution gazeuse correspond à cette attente, avec cependant un comportement différent pour les forts débits car celle-ci évolue par palier. La distribution liquide est quant à elle, totalement différente de ce qui pouvait être attendu. Les derniers canaux ne sont pas ou peu alimentés et un pic de distribution est visible pour un canal situé environ au milieu des canaux alimentés. Pour la distribution de cette section d'essais, l'évolution de la distribution liquide le long du distributeur n'est pas du tout linéaire, quel que soit le débit d'eau et d'air. Cette particularité

peut être expliquée par le montage de la boucle d'expérimentation. La Figure IV- 8 montre la section d'essais et sa liaison aux séparateurs.

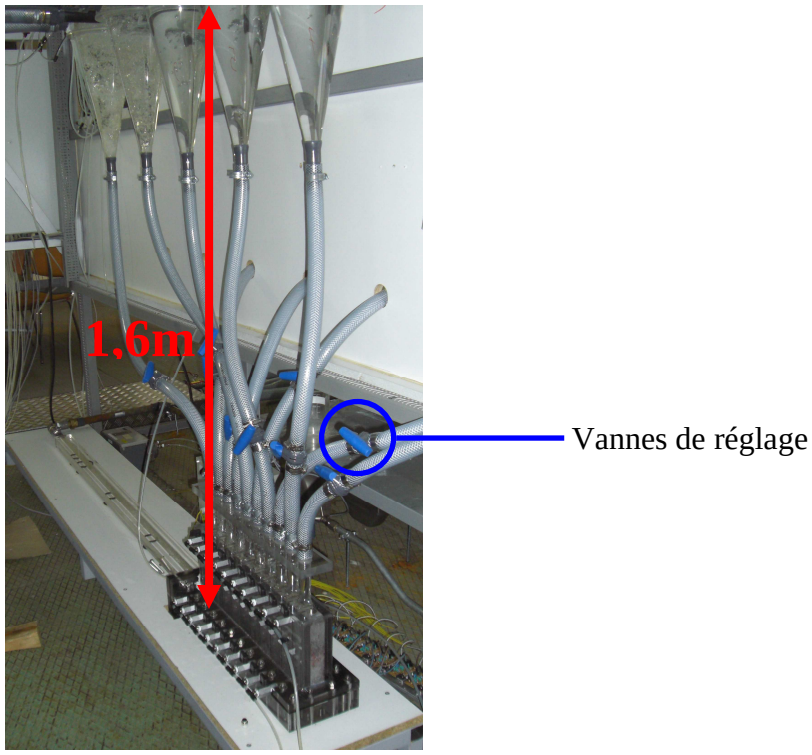


Figure IV- 8 : Photo de la section d'essais reliée aux séparateurs.

Sur cette photo, est également indiquée la hauteur correspondant à la distance entre le distributeur et le débordement dans les séparateurs. Cette hauteur correspond environ à 1,6 m. Il y a donc une pression due à la gravité à vaincre non négligeable qui, si la colonne est uniquement composée d'eau, est égale à environ 160 mbar. Il faut alors comparer cette valeur aux pertes de pression dans les canaux avec un écoulement. En effet, la pression due à la gravité est trop importante par rapport à la perte de pression observée dans les canaux, la distribution en sera modifiée.
L'air passe principalement dans les premiers canaux et non dans les derniers, il peut alors être considéré que les derniers canaux sont assimilables à des colonnes d'eau. En considérant les premiers canaux, entre leur sortie et les séparateurs, un mélange eau-air est présent. Ceci diminue alors fortement les pertes de pression par gravité. Le liquide ne passe pas dans les derniers canaux, car il passe dans ceux où l'ensemble pertes de pression par frottement et gravité est moindre. Ceci cause alors une distribution particulière telle que celles observées sur les figures précédentes.
En effet, dans les premiers canaux où l'air passe en majorité, les pertes par frottement seront fortes mais en progressant dans le distributeur, le débit d'air passant dans les canaux se réduit et permet à l'eau de passer facilement. Les pertes de pression par gravité dans ces premiers canaux sont toujours faibles car la présence de l'air joue fortement sur la masse volumique diphasique par la forte différence entre les masses volumiques spécifiques des deux phases. L'observation d'un débit liquide dans les derniers canaux pour des débits d'eau en entrée plus important est liée à la pression à ce niveau qui sera plus importante et qui permettra de vaincre ces pertes de pression par gravité.

Cette particularité en soit n'est pas trop gênante car le sujet de l'étude est sur l'effet des ultrasons sur une distribution. Cependant, afin de pouvoir comparer les résultats de ces

expériences avec ceux de la littérature, des vannes en sortie des canaux ont été rajoutées (en bleu sur la figure précédente). En effet ces vannes avec un degré de fermeture plus ou moins prononcé, permettent d'ajouter des pertes de pression en aval du canal et donc de modifier la distribution. De cette façon, d'autres profils de distribution peuvent être obtenus. Ceci est le sujet de la deuxième partie de ce chapitre. En préambule, des essais ont été réalisés avec cette première configuration afin de comprendre les phénomènes mis en jeu d'une part et d'autre part d'observer l'influence des ultrasons sur une distribution atypique et différente de celles rencontrées dans la littérature.

2.1.1.4. Approche statistique de la distribution.

Une distribution particulière n'est pas forcément synonyme de mauvaise distribution, il faut alors dans ce cas un ou plusieurs paramètres permettant de qualifier une bonne ou une mauvaise distribution en plus des profils. Le premier paramètre est le coefficient STD (STandard Deviation) qui correspond à l'écart-type de la distribution. Ce coefficient est défini par la formule suivante :

$$STD_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(r_{i,k} - \bar{r}_{i,k} \right)^2}{N}} \qquad .7)$$

Dans le cadre de cette étude, N est égal au nombre de canaux et $\bar{r}_{i,k}$ à la moyenne des ratios, qui est donc égale à 1, car elle correspond à un ratio pour une distribution homogène. Ce coefficient permet de déterminer la dispersion de la distribution pour chaque phase. En effet, plus sa valeur est faible, plus l'ensemble des points est proche de la moyenne qui correspond à la distribution homogène. Dans le cas d'une répartition homogène des débits, ce coefficient est nul. Il ne permet pas de donner d'informations supplémentaires sur le profil de la distribution mais peut montrer une évolution et permet en plus de comparer deux distributions différentes d'une façon correcte et simple en fonction de paramètres globaux comme les débits.

De plus, sur une représentation graphique, ceci permet de réduire le nombre de points car en effet, un point correspond à la distribution d'une phase. De cette manière, la comparaison entre les distributions est simplifiée sur un graphique.

Le premier graphique utilisant ce coefficient est présenté Figure IV- 9 et représente l'évolution de ce coefficient pour la phase liquide en fonction du débit d'eau. Quatre courbes différentes sont proposées correspondant chacune à un débit d'air testé.

Les quatre courbes sont relativement proches les unes des autres et présentent toutes la même tendance. Lorsque le débit d'eau augmente, quel que soit le débit d'air, le coefficient à tendance à diminuer. Ceci rejoint donc les observations faites pour les précédents graphiques à savoir que, lorsque le débit d'eau est plus important, la répartition des ratios est meilleure, ce qui permet donc de mieux homogénéiser l'écoulement de la phase liquide. En effet, lorsque le débit de la phase liquide augmente, la quantité de mouvement du fluide est plus importante et dans la configuration de ces essais, l'eau remplit alors proportionnellement moins les premiers canaux au profit de ceux situés en aval. De plus, proportionnellement au débit, l'eau passe moins dans le canal le plus alimenté.

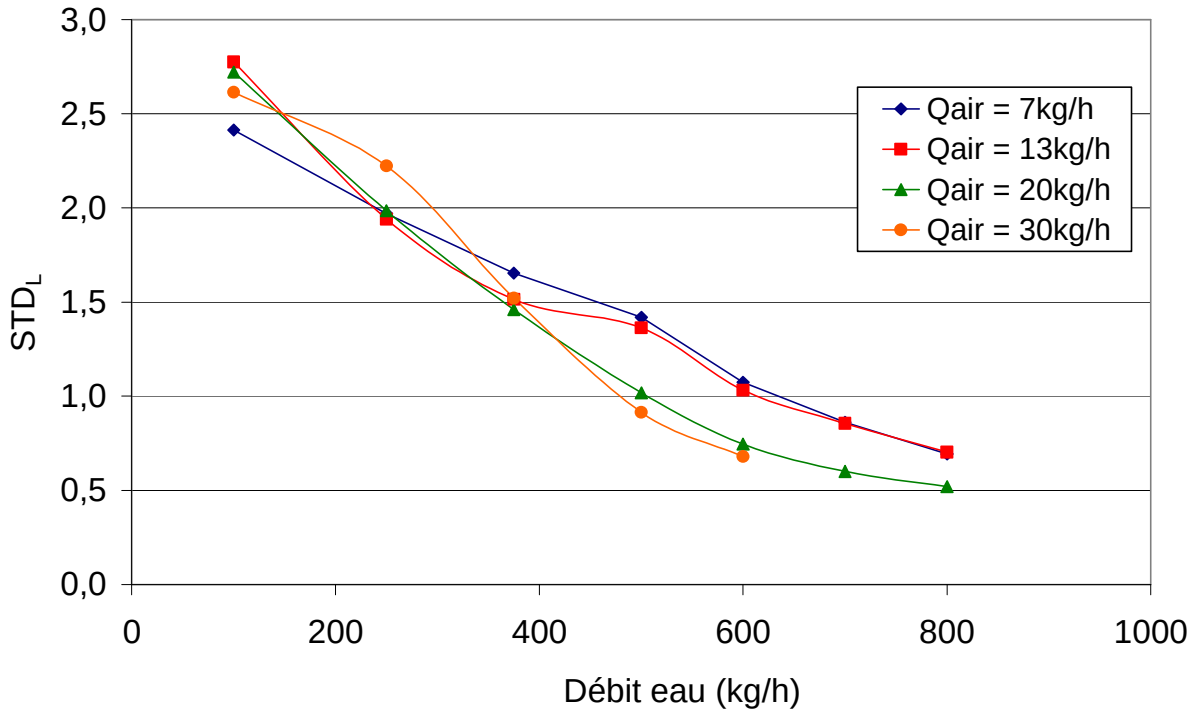


Figure IV- 9 : Évolution du STD_L en fonction du débit d'eau.

Il faut également noter que pour les débits d'air plus grands, la pente semble plus importante. Cela signifierait que pour des titres plus importants, l'influence du débit d'eau est plus forte. Ceci parait possible car le titre sera alors plus sensible aux variations du débit liquide car une faible variation de celui-ci peut entraîner une différence importante sur la valeur du titre massique. La quantité de mouvement du fluide sera également plus importante car le débit total sera lui aussi plus grand.

Ce graphique ne donne qu'une seule indication sur la distribution, c'est sa dispersion. Aucune information n'est donnée concernant le profil de la distribution, à savoir le nombre de canaux sous-alimentés et ceux suralimentés. Cela ne donne pas d'information non plus quant au décalage du pic de la distribution en fonction du débit d'air. Cependant cela permet de donner une indication sur la qualité de la distribution. En effet pour les différentes courbes à débit d'air constant, la distribution semble améliorée avec l'augmentation du débit d'eau. Lorsqu'une comparaison est faite avec la Figure IV- 6, il est clairement observé une amélioration de la répartition des débits. Cette méthode peut donc être utilisée comme moyen de comparaison entre des distributions pour déterminer une différence dans la qualité de celles-ci. Néanmoins, les profils de distribution seront toujours nécessaires afin de comprendre complètement l'état de la distribution et également les points importants. Les profils permettent de voir quels sont les canaux sous-alimentés, ceux qui sont suralimentés et également combien ; les différences de débits entre les canaux sont aussi observables uniquement avec les profils de distribution.

La Figure IV- 10 poursuit cette analyse avec le coefficient STD, toujours pour la phase liquide, mais cette fois en fonction du débit d'air pour différentes courbes correspondant aux différents débits testés de la phase liquide.

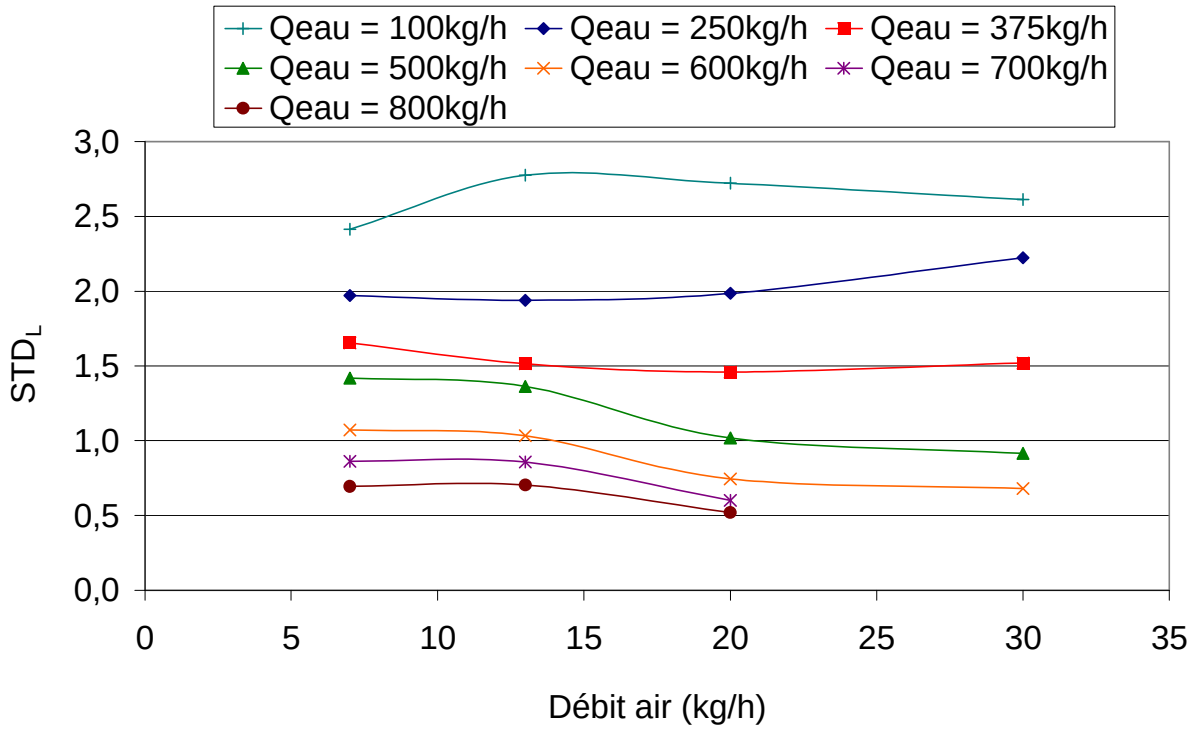


Figure IV- 10 : Évolution du STD_L en fonction du débit d'air.

Ce graphique montre que le débit d'air influence peu la qualité de la distribution liquide et cela, quel que soit le débit d'eau. Les courbes restent globalement dans les mêmes valeurs de STD même si des variations sont observées. La distribution est également meilleure pour des débits d'eau plus importants. En effet, le coefficient moyen de la distribution à un débit de liquide de 800 kg/h est cinq fois plus petit que pour une distribution avec un débit de 100 kg/h. Cependant il faut noter que l'écart entre chaque courbe des débits testés semble se réduire avec l'augmentation de la valeur du débit de la phase liquide. Une autre tendance se dégage également de ces résultats : l'effet de l'augmentation du débit d'air sur la qualité de la distribution semble différent en fonction du débit d'eau.
Une différence de comportement est observable entre les débits supérieurs à 375 kg/h et ceux inférieurs. En effet, une diminution du coefficient STD_L est observée pour les forts débits en eau, alors qu'un comportement différent apparaît pour les débits plus faibles. La transition s'effectue pour un débit d'eau qui correspond au début de l'alimentation des derniers canaux comme il peut être observé sur la Figure IV- 6 à débit d'air de 7 kg/h. Les essais avec un débit de liquide de 375 kg/h représente la limite pour laquelle les canaux du fond du distributeur commencent à voir un débit d'eau les parcourir.
Le coefficient STD dépendant de l'écart des valeurs par rapport à la moyenne deux comportements différents peuvent conduire à des résultats très proches. Pour les forts débits, les derniers canaux seront plus alimentés, ce qui va donc diminuer l'écart et également le coefficient. Pour les faibles débits d'eau c'est différent, le pic d'alimentation va se décaler mais ne va pas fortement changer de valeur de ratio. Le coefficient STD ne verra donc pas changement significatif sur sa valeur même si le canal le plus suralimenté n'est plus le même.

Le comportement de la « qualité » de la distribution gazeuse est illustré sur le graphique de la Figure IV- 11. Dans un premier temps, son évolution en fonction du débit d'eau est analysée.

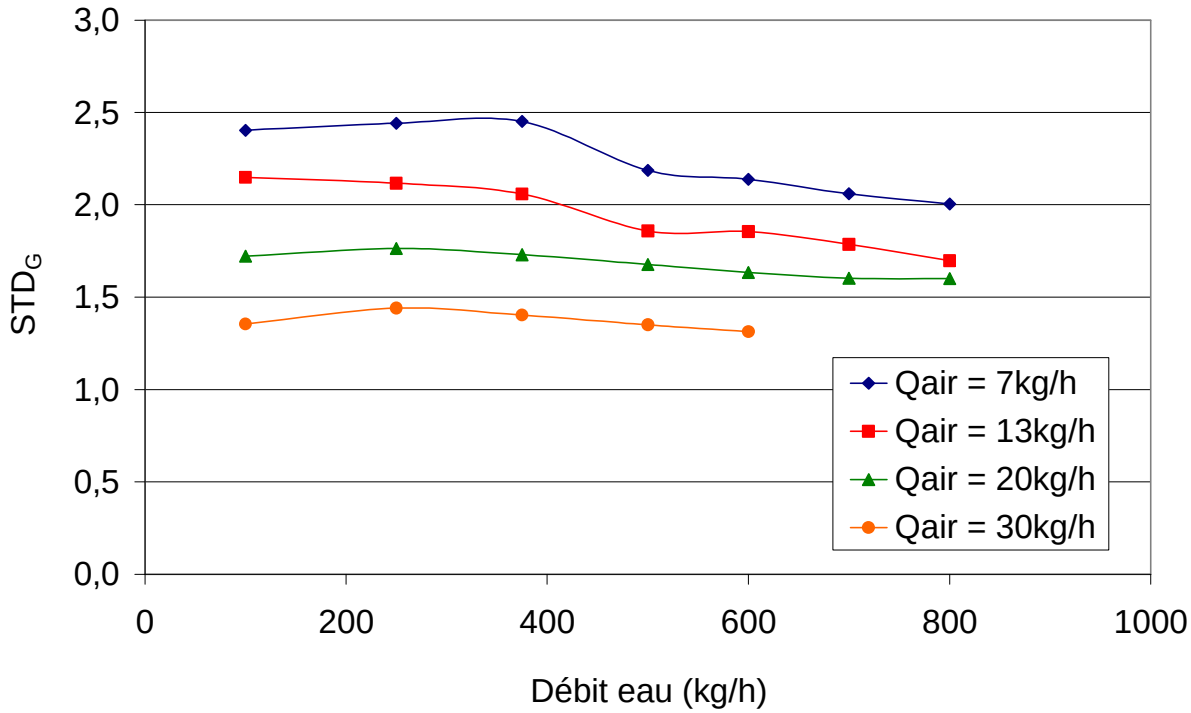


Figure IV- 11 : Évolution du STD_G en fonction du débit d'eau.

Le coefficient STD_G n'évolue pas beaucoup en fonction du débit liquide, une tendance à diminuer pour les forts débits d'eau est observée mais ne constitue pas un changement radical. De plus ce changement est remarqué de façon plus significative pour des faibles débits d'air. En effet le ratio, et donc le STD_G, est plus sensible pour les faibles débits d'air que pour les forts. La transition se situe encore au débit d'eau de 375 kg/h. Cependant, l'effet du débit d'air est notable, comme le montre la Figure IV- 12.

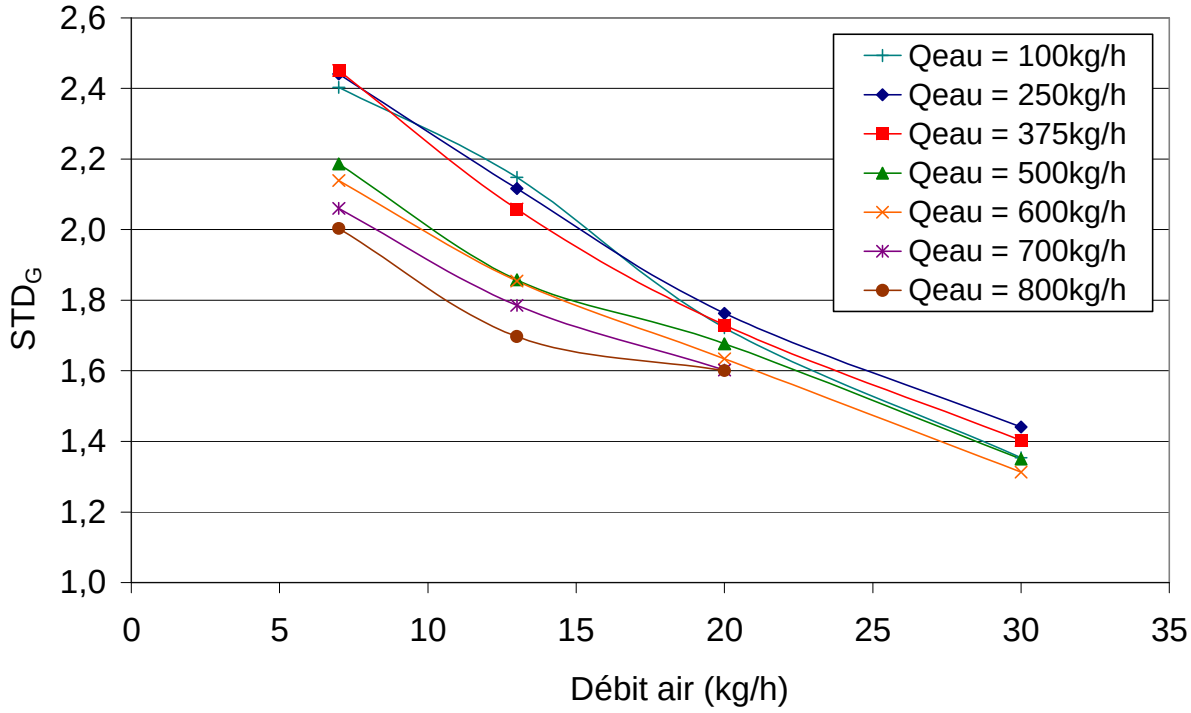


Figure IV- 12 : Évolution du STD_G en fonction du débit d'air.

Une diminution nette est observée lors de l'augmentation du débit d'air. La distribution du gaz est donc améliorée lorsque le débit à l'entrée de l'échangeur est augmenté. Cette tendance a déjà été dégagée lors de l'étude de la distribution. En effet la répartition de l'air devient plus homogène dans les premiers canaux avec l'augmentation de son débit car un maximum de perte de pression est atteint. Cela provoque alors une meilleure alimentation du canal suivant. De cette façon, la distribution devient meilleure. Un écart entre les courbes supérieures à 375 kg/h et les autres est encore une fois visible. Cet écart est plus marqué pour les faibles débits d'air. La limite présentée pour le coefficient de la phase liquide se retrouve ici également. Comme expliqué précédemment, avant 375 kg/h d'eau en entrée, le débit liquide dans le canal 1 n'a pas atteint sa limite. Une fois à 500 kg/h, le débit dans le premier canal se stabilise autour de 90 kg/h. Cette évolution n'est plus visible pour les débits d'air à partir de 20 kg/h.

Ces graphiques montrent des tendances générales pour les deux phases. Chacune tend à voir sa distribution améliorée avec l'augmentation de son débit à l'entrée du distributeur. Les tendances peuvent aussi être résumées à :

- L'augmentation du titre tend à améliorer la distribution de la phase gazeuse
- L'augmentation de la densité de flux massique tend à améliorer la distribution de la phase liquide.

La distribution d'une phase n'est pas beaucoup influencée par la variation du débit d'entrée de l'autre phase. Cependant des légères tendances se dégagent. En effet, une augmentation de la densité de flux massique diminue le coefficient de la distribution de l'eau. En ce qui concerne l'air, une diminution du coefficient STD est également observée lors de l'augmentation du titre massique en entrée de la section d'essais.

Ces tendances sont présentées dans les deux graphiques suivants, à savoir la Figure IV- 13 et la Figure IV- 14.

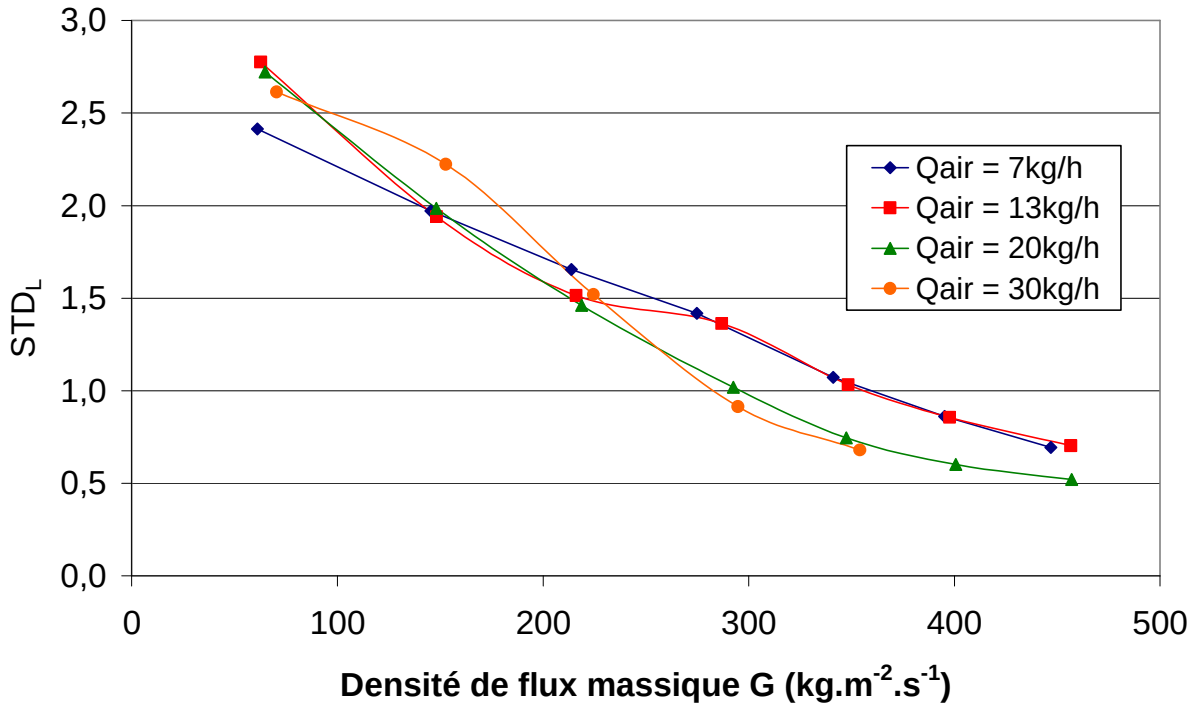


Figure IV- 13 : Évolution du STD_L en fonction de la densité de flux massique.

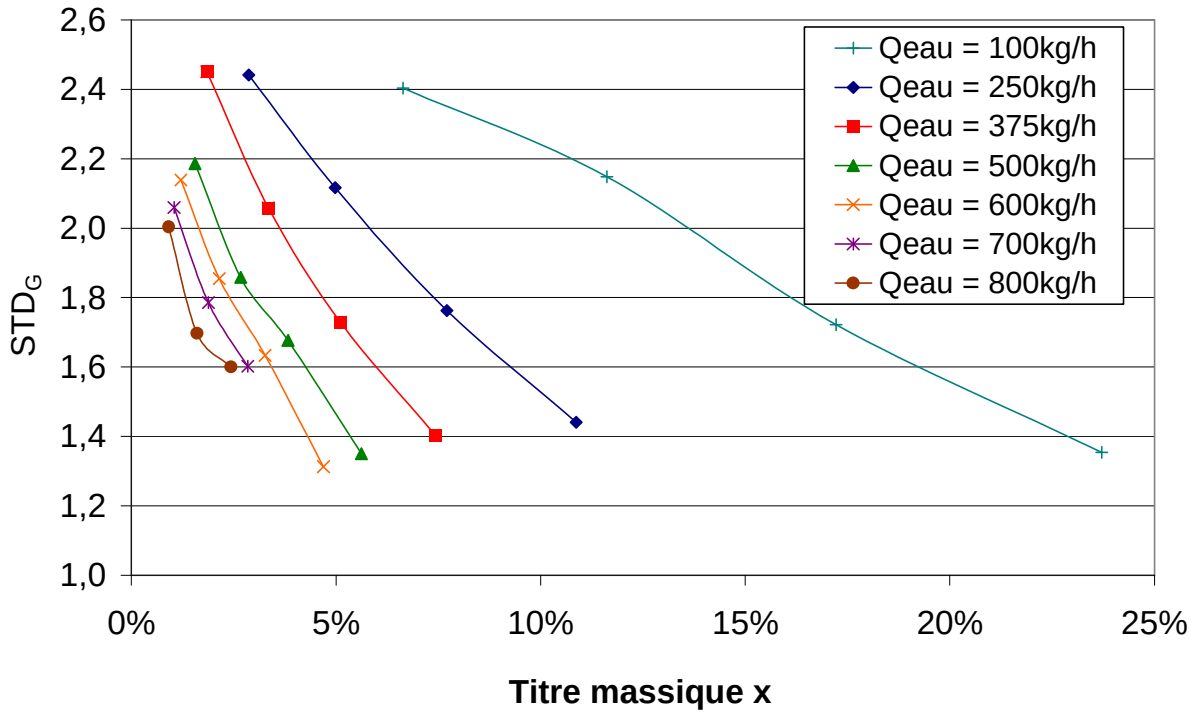


Figure IV- 14 : Évolution du STD_G en fonction du titre massique.

En plus du coefficient STD, il existe deux autres coefficients mathématiques qui permettent de caractériser une distribution statistique. Ces deux termes sont utilisés dans la thèse d'**IDRISS [1992]**.
Le premier est le coefficient d'asymétrie S_k d'ordre 3 qui permet de qualifier l'asymétrie de la distribution. Ceci signifie qu'il permet de déterminer si la sous-alimentation des canaux est plus importante que la suralimentation. Ce coefficient est déterminé par la relation suivante :

$$S_k = \frac{\mu_{3,k}}{STD_k^3} \quad avec \quad \mu_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(r_{i,k} - \bar{r}_{i,k}\right)^3}{N} \qquad .8)$$

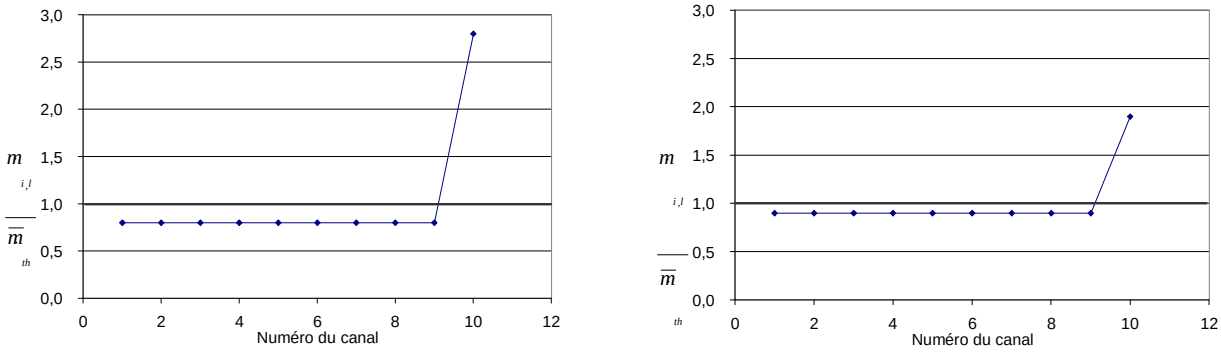
Lorsque ce coefficient est positif, cela signifie que l'ampleur de la sous-alimentation des canaux est plus grande que la suralimentation. Au contraire, lorsqu'il est négatif, c'est la suralimentation qui présente une intensité plus importante. Une distribution symétrique ou alors homogène donnera lieu à un coefficient d'asymétrie nul.

Le second paramètre supplémentaire est le coefficient d'aplatissement E_k *d'ordre 4*, qui permet de déterminer la concentration des points autour de la moyenne. Plus les valeurs sont concentrées autour de la moyenne, plus ce coefficient devient grand :

$$E_k = \frac{\mu_{4,k}}{STD_k^4} \quad avec \quad \mu_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(r_{i,k} - \bar{r}_{i,k}\right)^4}{N} \qquad .9)$$

Deux distributions peuvent donc avoir le même STD mais différents coefficients S_k ou E_k.

Le coefficient d'aplatissement peut être compliqué à comprendre. Pour cela, la Figure IV- 15 aide à mieux définir ce paramètre. Sur ces graphiques, celui de gauche représente une première distribution avec neuf canaux avec un ratio de 0,8 et le dernier à 2,8. Le graphique de droite montre une distribution avec neuf canaux avec un ratio de 0,9 et le dernier canal un ratio de 1,9.



(a) (b)

Figure IV- 15 : Distributions factices pour la compréhension du coefficient d'aplatissement.

Sur ces deux figures, deux distributions ayant la même forme mais des valeurs différentes peuvent donc être observées. Le graphique (a) possède un coefficient STD de l'ordre de 0,6 alors que (b) a un STD de 0,3. Cependant ces deux graphes possèdent le même coefficient d'aplatissement. En effet, E_k détermine bien la concentration des points autour de la moyenne mais dépend du STD au préalable, comme indiqué dans l'équation (IV.9). Les points sont donc répartis de la même façon proportionnellement à l'écart-type.

De la même façon, en prenant en exemple ces graphiques, le coefficient d'asymétrie peut clairement en être déduit. Sur ces deux graphiques, S_k possède la même valeur et est bien sûr positif, ce qui signifie que l'ampleur de la sous-alimentation est plus importante que celle de la suralimentation. Encore une fois, ce coefficient dépend également du STD de la distribution.

Une analyse de ce coefficient d'asymétrie a été menée sur les distributions obtenues. Ces résultats sont représentés par le graphique de la Figure IV- 16.

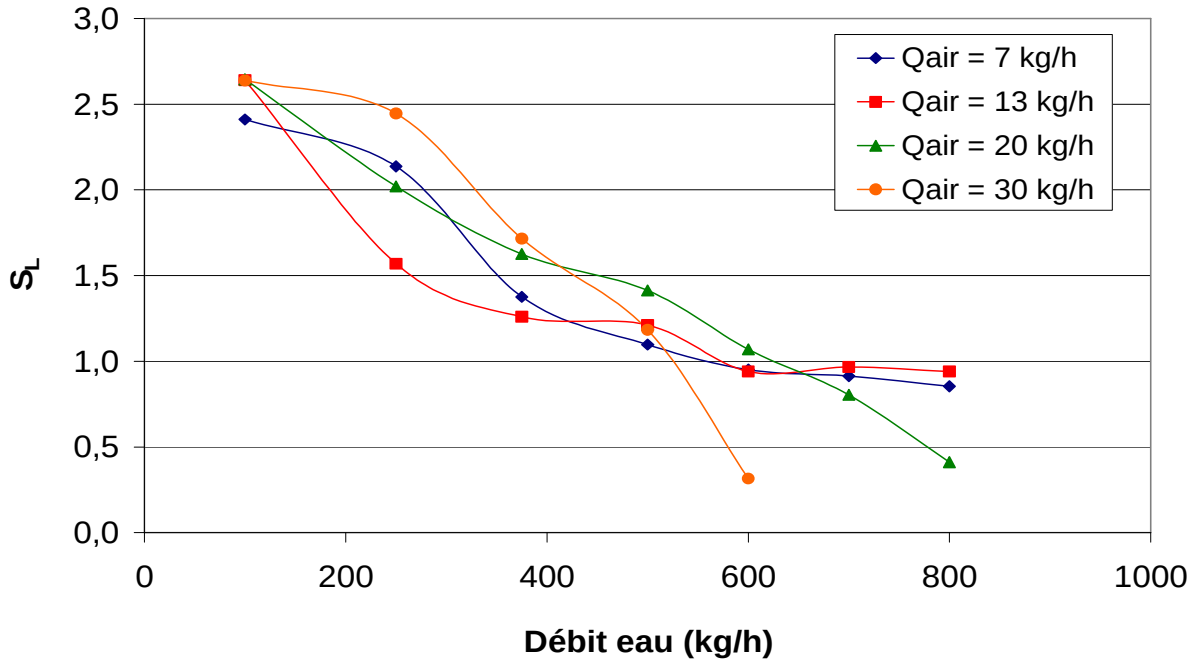


Figure IV- 16 : Évolution du coefficient S_k pour la phase liquide en fonction du débit d'eau.

L'évolution de l'asymétrie de la distribution liquide est nette sur ce graphique. Les distributions de la phase liquide ont tendance à être plus équilibrées lorsque le débit de celle-ci augmente. Cette observation rejoint celles faites précédemment sur la qualité de la distribution mais permettent de les compléter. Comme de plus en plus de canaux sont alimentés et que les derniers canaux sont de plus en plus remplis, la distribution se rapproche donc d'un ratio d'une valeur de 1 et l'asymétrie a tendance à diminuer. Cependant, le coefficient est toujours positif, ce qui veut dire que tous les essais ont présentés une sous-alimentation plus importante comparée à la suralimentation. La différence entre les quatre débits d'air n'est pas significative. En effet, aucune tendance générale ne se dégage quant à l'influence du débit de la phase gazeuse sur l'asymétrie de l'eau. Ceci peut se comprendre en regardant les premiers graphiques où l'augmentation du débit d'air a pour principale conséquence de décaler la distribution liquide, et ne change donc pas l'asymétrie.
La phase gazeuse propose quant à elle des tendances encore plus nettes, qui sont présentées sur la Figure IV- 17.

Pour l'air également, la tendance est à la diminution de l'asymétrie de sa distribution lorsque son débit à l'entrée du distributeur augmente. Cette observation va dans le sens des graphiques précédemment étudiés. L'air remplit de plus en plus de canaux avec l'augmentation de son débit, ce qui permet de réduire l'asymétrie. En effet, comme pour la phase liquide, l'air présente une sous-alimentation importante de l'ensemble des canaux. Le fait d'avoir un débit d'eau plus important semble également diminuer l'asymétrie, cependant l'effet est moins important que pour l'augmentation du débit d'air.

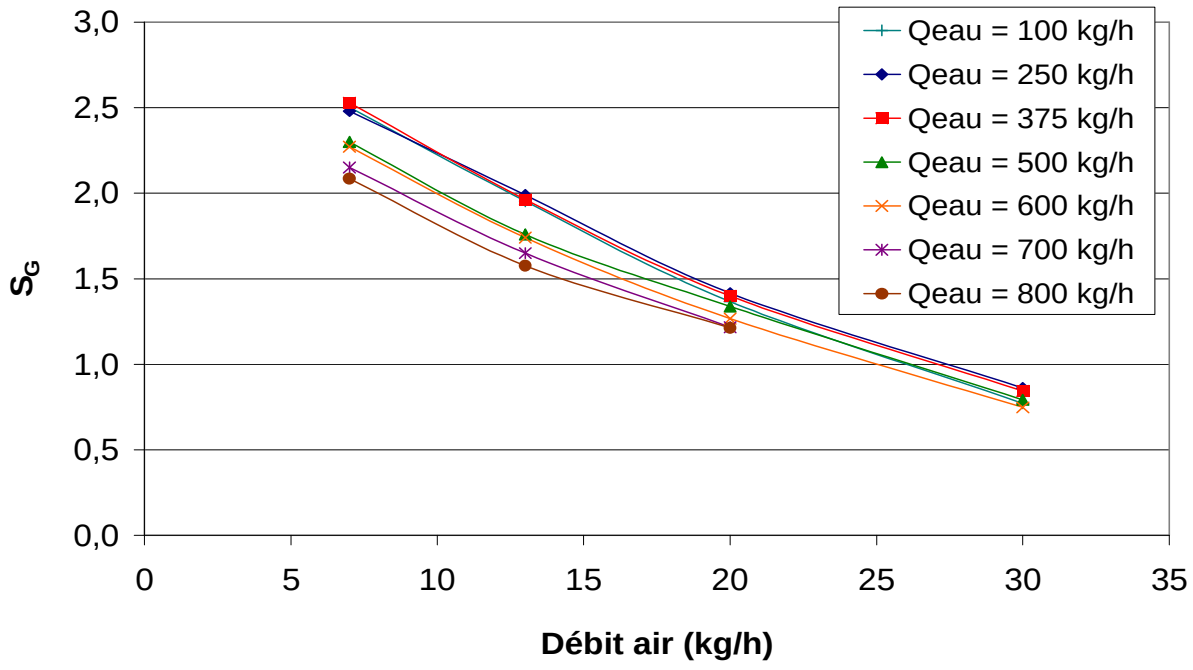


Figure IV- 17 : Évolution du coefficient S_k pour la phase gazeuse en fonction du débit d'air.

Tous ces coefficients tendent à montrer l'influence d'un paramètre sur une phase. Dans l'ensemble, les résultats montrent une amélioration de la distribution d'une phase lorsque son débit en entrée est augmenté. Cependant, un paramètre non négligeable et important lorsque l'aspect thermique sera abordé, est le titre massique. En effet, sa distribution est intéressante et complémentaire à tous les graphiques présentés jusqu'à ce point.

Une analyse similaire à celle sur la distribution avec le coefficient STD peut être faite sur la répartition du titre massique dans les canaux. Le ratio du titre dans chaque canal est ainsi calculé et un écart-type sur l'ensemble de ces dix ratios est ensuite déterminé.

$$Ecart-type = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(x_{i,k} - \bar{x}_{i,k}\right)^2}{N}} \qquad \text{(IV.10)}$$

Ces résultats sont présentés sur le graphique de la Figure IV- 18.

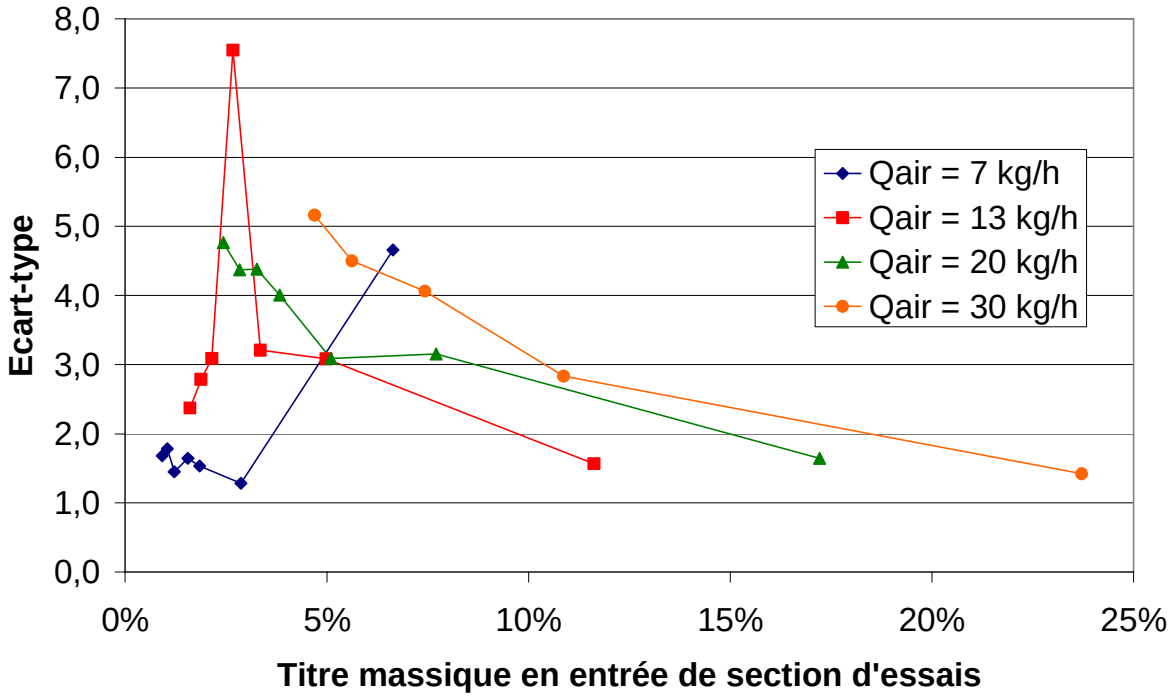


Figure IV- 18 : Évolution de l'écart-type de la distribution du titre dans les canaux en fonction du titre en entrée de distributeur.

Sur ce graphique, plusieurs tendances sont visibles. La première représente l'évolution de l'écart-type de la distribution du titre avec le titre massique à l'entrée de la section d'essais. La valeur de ce paramètre mathématique semble avoir tendance à diminuer lorsque la proportion de gaz augmente. Cependant il faut analyser les autres paramètres en même temps. L'augmentation du titre massique ne veut pas simplement dire augmentation du débit massique de l'air. Les points avec un écart-type très fort sont pour les débits d'air faibles. En effet, le nombre de canaux alimentés change avec l'augmentation du débit liquide (Figure IV-6) Comme le montre le graphique, chaque courbe représente un débit d'air constant. Pour un titre donné, les débits d'air les plus importants sont ceux avec les écart-types les plus importants également. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en augmentant le débit d'air entrant dans la section d'essais, plus d'air devra passer par les canaux. Cependant comme montré précédemment, l'air atteint une limite en termes de débit pour ensuite passer dans les canaux suivants. Ceci provoque une augmentation du ratio des canaux suivants qui provoquera un écart à la moyenne supérieur à celui pour le débit plus faible. En effet, un canal qui a un ratio de 3 et les autres à zéro donnera un écart-type plus faible que les trois premiers canaux à un ratio de 3 et le reste à zéro. Pourtant la distribution sera améliorée.

L'évolution des courbes semble néanmoins moins brutale pour un débit de 30 kg/h que pour les autres. Cette évolution est liée au débit d'eau ; plus le débit liquide est important, moins le changement du débit d'air aura d'influence sur la répartition du titre dans les canaux. De plus, à faible débit d'eau, les valeurs d'écart-types sont les plus faibles obtenues, sauf pour un débit gazeux de 7 kg/h.
Ces résultats semblent montrer une tendance à l'amélioration de la distribution du titre massique dans les canaux pour une diminution du débit massique liquide. Pour les deux plus faibles débits gazeux, l'évolution n'est néanmoins pas nette. La dégradation s'obtient, soit en augmentant le débit liquide, mais l'effet le plus significatif est provoqué par l'augmentation du débit d'air. Mais comme expliqué, cela ne signifie pas pour autant une plus mauvaise distribution des deux phases mais plutôt de leur association. Ce graphique est également intéressant car il donne une indication sur les pertes de pression. En effet, les pertes de pression en écoulement diphasique sont fonction du titre à l'intérieur les canaux. Un plus grand écart-type du titre signifie également une plus grande disparité dans les pertes de pression dans les différents canaux.

2.1.2. Avec ultrasons.

Tous les résultats présentés jusqu'à ce point ont été effectués avec la configuration 0 et également sans l'utilisation d'ultrasons. Des tendances nettes se dégagent, que cela soit en fonction du débit d'une phase, du titre massique ou encore de la densité de flux massique. Les essais avec l'introduction des ultrasons vont maintenant être présentés afin de les analyser, d'observer les tendances générales et évidemment les conséquences sur la distribution.
Tous les essais avec les ultrasons ont été faits avec les dix appareils en marche, même ceux dont le canal leur faisant face est suralimenté. Les générateurs d'ultrasons sont alimentés avec la tension nominale (48 V). Toutes les conditions précédemment testées sans ultrasons ont également été étudiées avec. Ceci permet d'avoir un total de 26 distributions différentes avec les générateurs d'ultrasons activés. De cette façon, les mêmes études peuvent être menées sur les profils de distribution obtenus avec les ultrasons que pour ceux obtenus sans. Dans un second temps, une comparaison entre les deux types de distribution sera effectuée.

2.1.2.1. Influence des ultrasons sur la phase liquide.

Tout d'abord, l'influence des conditions opératoires est étudiée. Cette étude permet également de d'observer le profil de la distribution avec les ultrasons. Les résultats pour différents débits d'air, sont illustrés pour la phase liquide sur la Figure IV- 19. Ces distributions correspondent à un débit d'eau en entrée de 250 kg/h.

Les profils de distribution obtenus présentent tous un maximum qui se dégage très nettement des autres points. Les derniers canaux ne sont pas alimentés par l'eau, cependant la limite d'alimentation dépend du débit d'air. En effet, entre un débit d'air faible et un débit fort, deux canaux de plus sont alimentés par la phase liquide. Cette conséquence est la même que présentée précédemment (Figure IV- 1), et elle est expliquée par le fait que le débit d'air étant plus important, l'écoulement arrive à vaincre les pertes de pression présentes dans les canaux en aval. L'augmentation du débit de la phase gazeuse permet de « pousser » plus fortement la phase liquide. Sur ce graphique, l'augmentation du débit d'air a donc une influence sur le nombre de canaux alimentés en eau mais également sur le canal présentant le débit liquide le plus important. En effet, pour chaque débit d'air, le canal ayant la plus forte alimentation en eau se décale d'une unité vers le fond du distributeur.

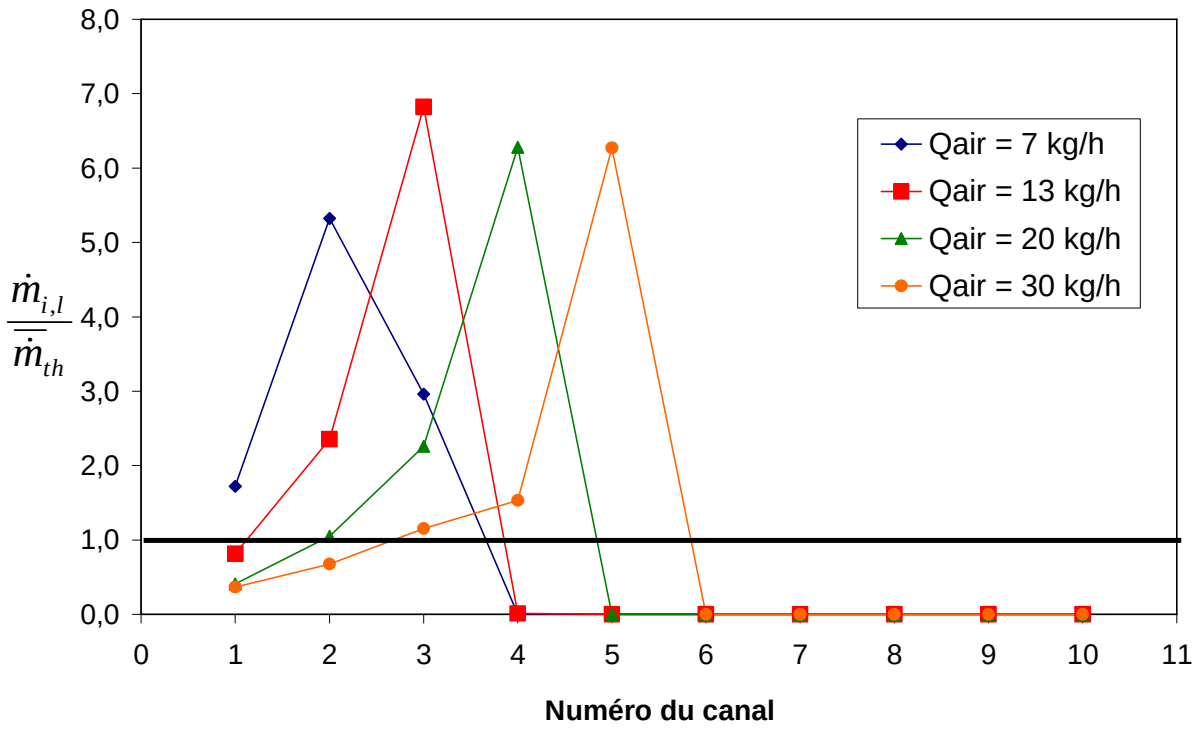


Figure IV- 19 : Distribution avec les ultrasons, des débits massiques liquide selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 250kg/h.

En comparant ces résultats à ceux obtenus sans ultrasons, une remarque peut être faite sur le débit parcourant les premiers canaux. En effet, l'eau s'écoule plus dans les premiers canaux lorsque les ultrasons sont activés. La fontaine créée par les générateurs d'ultrasons permet donc d'imposer une alimentation des canaux leur faisant face. Cependant, cette amélioration n'est pas visible pour tous les essais : pour un débit d'air de 7 kg/h, le premier canal est même moins alimenté en eau avec l'activation des générateurs d'ultrasons.
Les autres essais montrent néanmoins une amélioration à ce niveau. Une remarque peut également être faite sur la tendance de ce changement. Pour le canal n°1 par exemple, le débit semble tendre vers une certaine valeur, car les deux essais avec les débits en air les plus forts présentent des valeurs assez proches pour ce canal mais également pour le deuxième. Une plus forte augmentation du débit d'air permettrait peut-être d'obtenir les mêmes débits sur ces premiers canaux. Ce qui montrerait une influence nette des ultrasons. Ayant atteint un maximum avec le débit d'eau et d'air, l'eau se propage alors vers les canaux suivants. Le fait d'avoir alors une modification de l'alimentation liquide des premiers canaux se répercute aussi sur les canaux en aval. En effet, le maximum atteint semble inférieur, ce qui réduit donc la dispersion des points.

L'influence des ultrasons sur une distribution est mieux illustrée sur le graphique de la Figure IV- 20 où il est comparé les deux situations, avec et sans ultrasons.

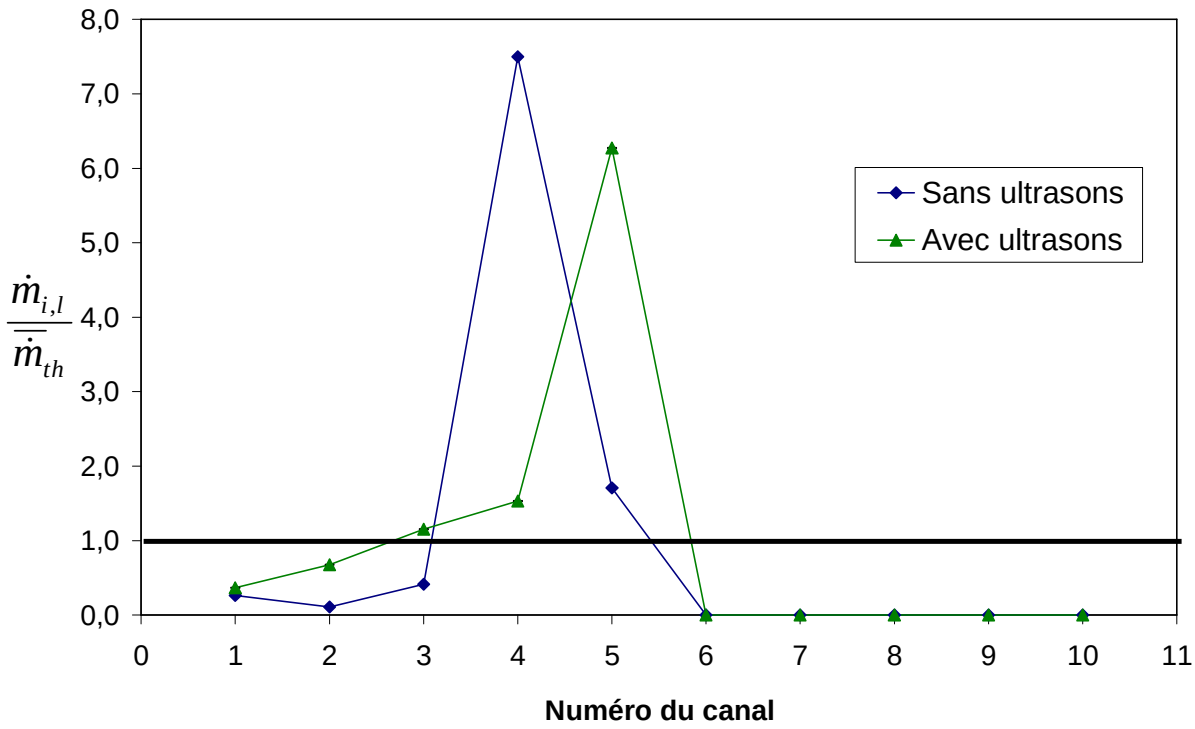


Figure IV- 20 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 250kg/h et Q_{air} = 30kg/h.

Cette figure permet de bien observer l'influence des ultrasons sur la distribution de la phase liquide. Le maximum diminue de plus d'une unité, ce qui équivaut à plus de 30 kg/h sur 250 kg/h en entrée, mais surtout, il n'est pas situé au niveau du même canal. Pris individuellement, le canal 4 passe d'un ratio de 7,5 à un ratio de 1,5 ; converti en débit, cela donne une variation de l'ordre de 150 kg/h. Les variations des deux derniers canaux alimentés (4 et 5) sont importantes, notamment lorsqu'elles sont comparées aux variations des premiers canaux sous-alimentés. Dans ce cas, les ultrasons ne permettent de jouer que sur les canaux déjà alimentés en eau. Aucun des derniers canaux ne voit son cas évoluer.
Une question peut se poser concernant la pertinence de ces écarts entre les deux conditions. En effet l'incertitude sur les résultats doit être définie. Les barres d'incertitudes sont bien présentes sur la Figure IV- 20 mais elles ne sont pas visibles car l'incertitude sur les ratios est très faible (le maximum étant de 1,5% de la valeur). Les débitmètres Coriolis permettent d'avoir une bonne précision sur les mesures (moins de 1%). De plus des essais de reproductibilité ont montré que ces tendances persistaient à chaque fois. Dernier point : les bilans massiques se vérifient à moins de 3% lors de chaque expérience. Ces éléments renforcent notre confiance dans l'interprétation de l'effet des ultrasons.
La distribution liquide avec l'activation des ultrasons pour un débit de 500 kg/h est également étudiée sur la Figure IV- 21.

L'évolution des profils de distribution en fonction de différents débits d'air est sensiblement la même avec ou sans ultrasons que pour l'essai à 250 kg/h en débit d'eau. Une diminution du maximum est observée, ainsi qu'un décalage du canal le plus alimenté. Enfin, les derniers canaux sont de plus en plus alimentés lorsque le débit de la phase gazeuse augmente.

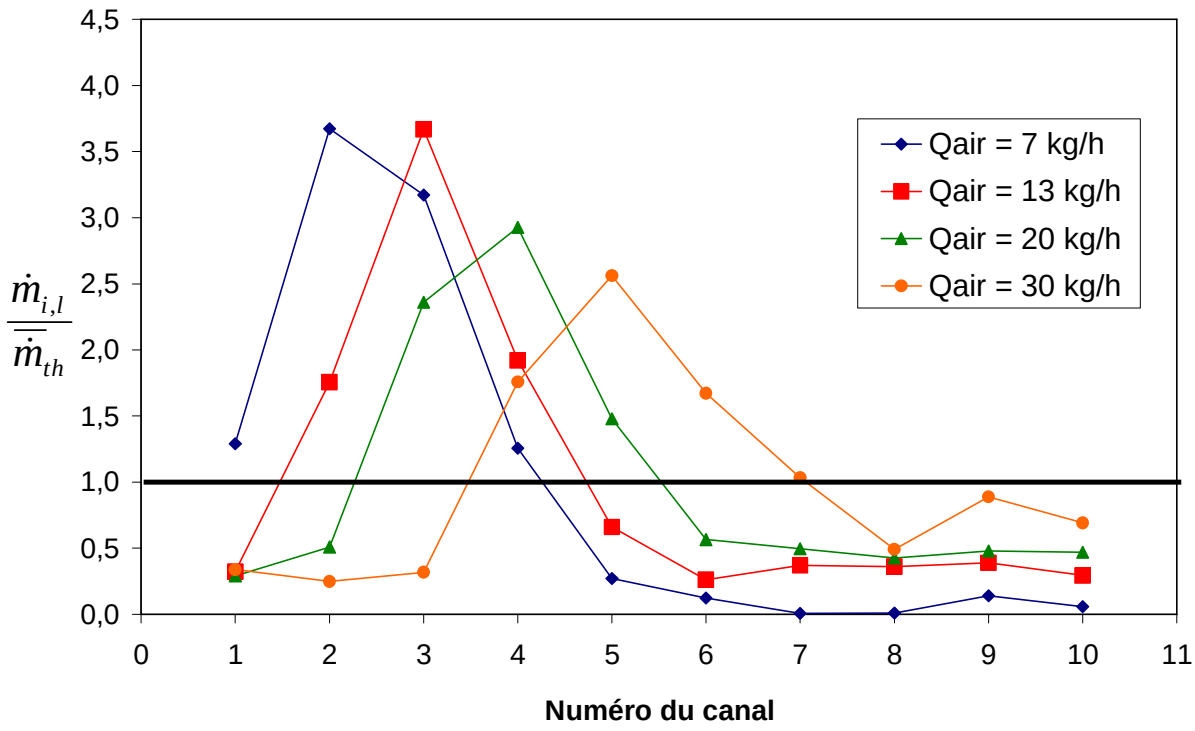


Figure IV- 21 : Distribution avec les ultrasons, des débits massiques liquides selon le débit massique d'air pour Qeau = 500kg/h.

La modification apportée par les ultrasons reste la même que pour un débit liquide en entrée de 250 kg/h. C'est-à-dire qu'un décalage du canal le plus alimenté est observé ainsi que l'augmentation des débits dans les premiers canaux. Les incertitudes restent également dans le même ordre, à savoir inférieures à 1,5% de la valeur du ratio.

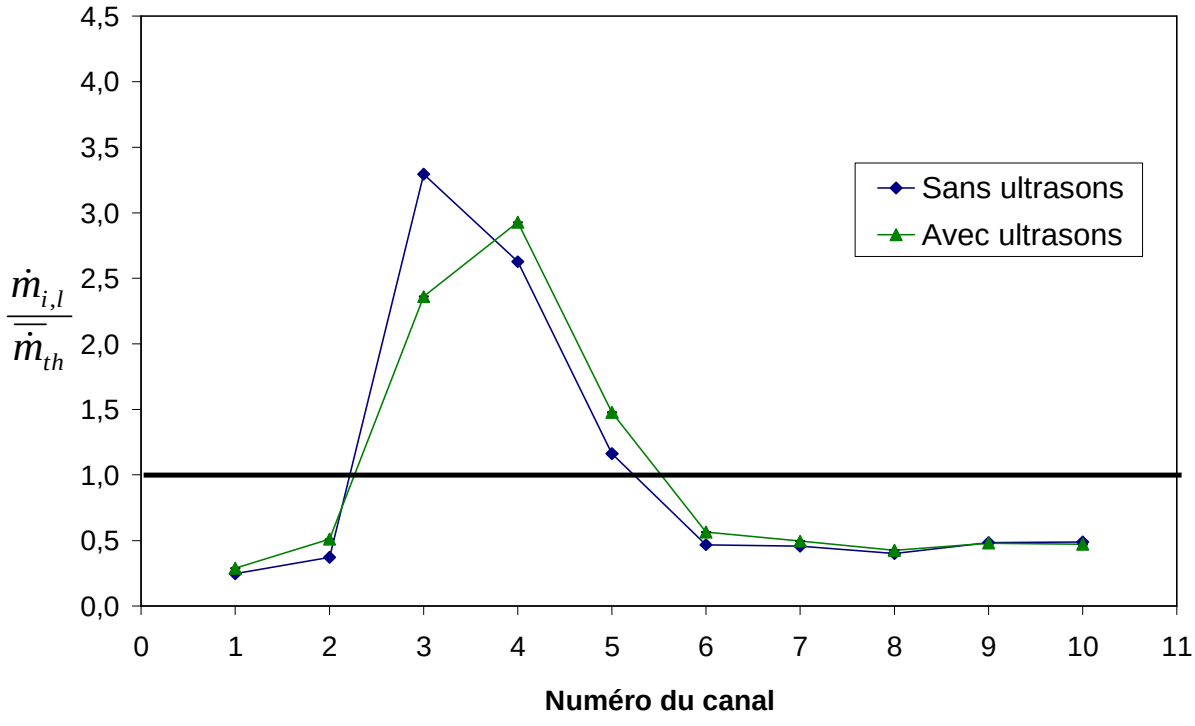


Figure IV- 22 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 500kg/h et Q_{air} = 20kg/h.

La Figure IV- 22 montre un effet moins prononcé des ultrasons sur le changement du profil de la distribution mais ceci est également lié au profil de distribution initial. Par rapport à la répartition pour un débit liquide de 250 kg/h, où un seul canal domine largement par rapport aux autres, pour un débit d'eau plus important, l'alimentation des canaux est mieux répartie donc les changements sont moins prononcés. Cependant les effets sont similaires.

2.1.2.2. Influence des ultrasons sur la phase gazeuse.

Ces profils de distribution de la phase liquide peuvent être complétés par celui de la phase gazeuse qui est représenté sur la Figure IV- 23. Le débit liquide est de 250 kg/h.

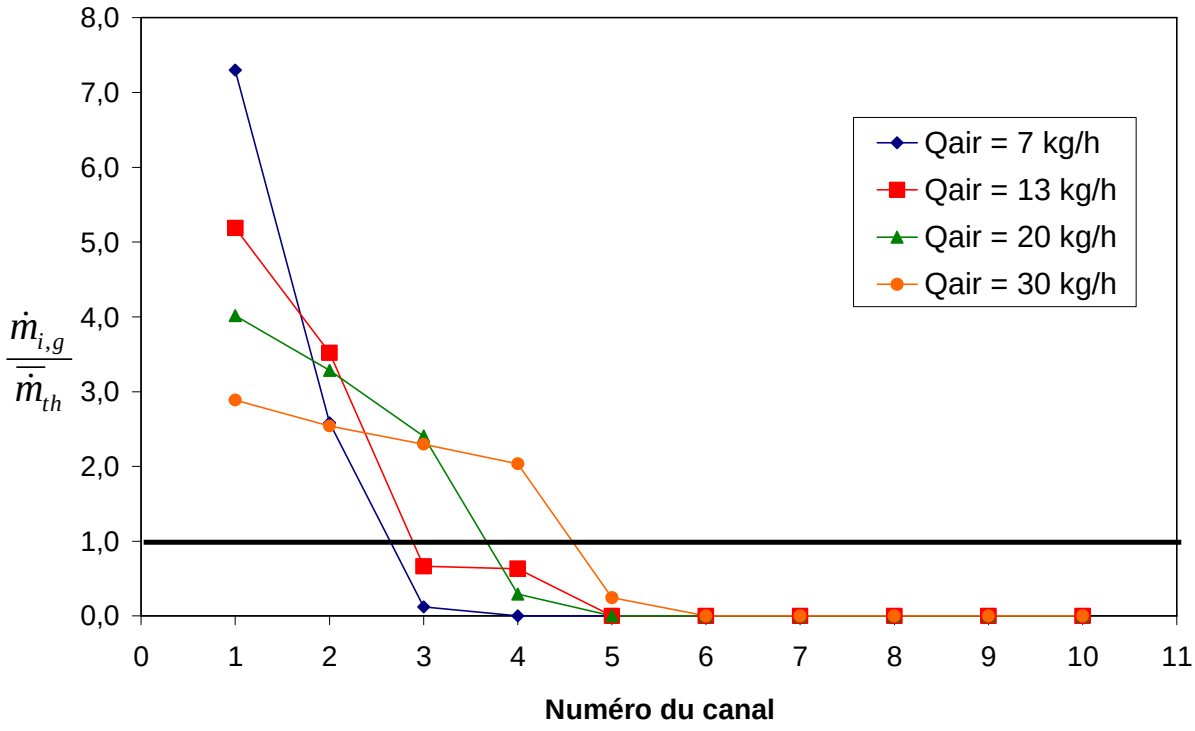


Figure IV- 23 : Distribution gazeuse avec ultrasons selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 250kg/h.

De la même façon que pour la phase liquide, les tendances de l'évolution de la distribution en fonction du débit d'air sans l'activation des ultrasons se retrouvent après leur mise en marche. Le ratio du premier canal diminue lorsque le débit de gaz en entrée augmente et pour les canaux suivants, la tendance est vers l'homogénéisation avec le premier. Cependant l'effet des ultrasons apparaît sur ce graphique. En effet, leur activation permet d'alimenter un canal supplémentaire en air, excepté pour le cas à faible débit de la phase gazeuse en entrée (7 kg/h) comme il peut être observé en comparant la Figure IV- 23 avec ultrasons et la Figure IV- 3 sans ultrasons. Cette conséquence est liée au profil de distribution de l'eau. La distribution liquide étant décalée d'un canal, cela permet alors à l'air de passer plus facilement dans un canal supplémentaire. Cela réduit donc le débit de gaz passant dans les premiers canaux au profit du « nouveau » canal traversé par l'air. Concernant le plus faible débit en air, l'effet des ultrasons n'est pas suffisant pour améliorer cette distribution. Comme la phase liquide ne voit pas son maximum se décaler d'un canal, aucun canal supplémentaire n'est alimenté en air. Cependant, l'air alimente plus le deuxième canal (qui lui, est moins alimenté en eau) au dépend du troisième. Néanmoins, dans tous les autres cas, la phase gazeuse alimente plus de canaux.
L'influence du débit d'eau sur l'effet des ultrasons sur cette phase peut être observée en comparant ce précédent graphique avec celui de la Figure IV- 24.

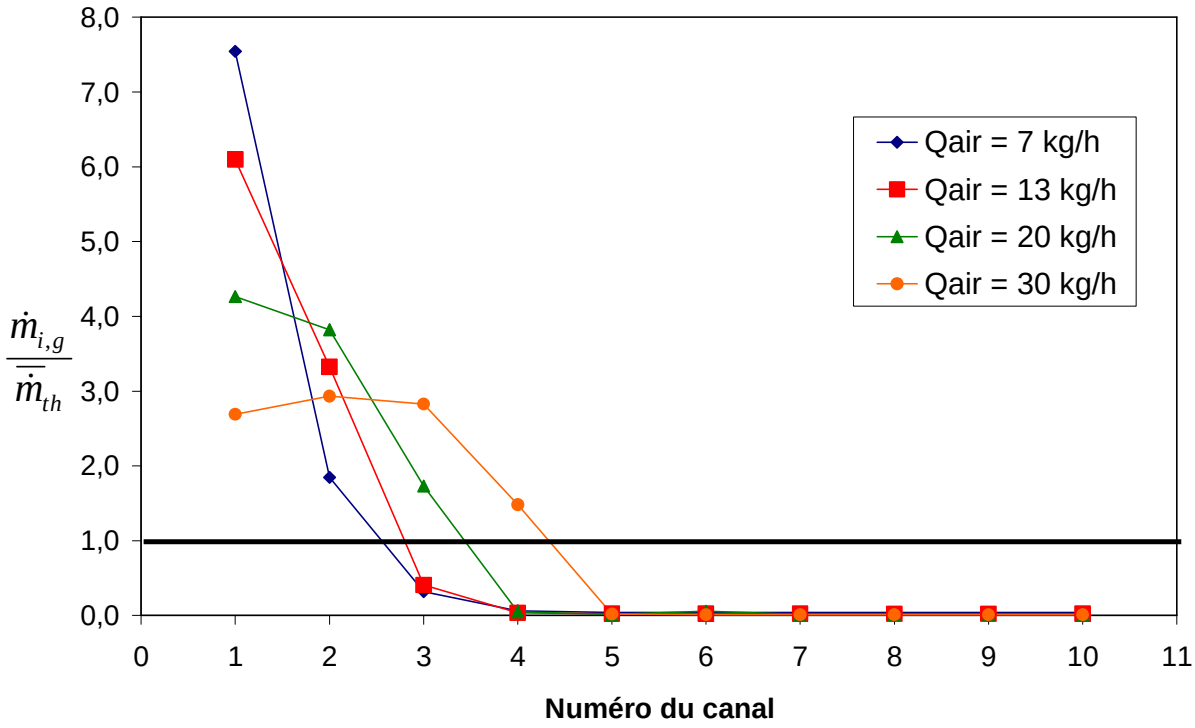


Figure IV- 24 : Distribution gazeuse avec ultrasons selon le débit massique d'air pour Q_{eau} = 500kg/h.

Le débit correspondant à ce graphique est de 500 kg/h pour la phase liquide au niveau de l'entrée de la section d'essais. Les tendances se ressemblent fortement entre les deux figures. La diminution du ratio dans le premier canal se retrouve également pour ces conditions et la même observation est faite pour l'homogénéisation des ratios dans les premiers canaux. L'exception est toujours faite pour l'essai avec le plus faible débit d'air en entrée. Cependant l'homogénéisation de la distribution est moins forte que pour un débit de 250 kg/h car l'eau est plus présente dans ces premiers canaux pour un débit liquide plus important. De plus aucun canal n'est alimenté en plus lors de l'ajout des ultrasons.

En procédant de la même manière que pour la phase liquide, le graphique de la Figure IV- 25 présente la distribution de la phase gazeuse sans ultrasons et également la distribution avec leur activation. Les conditions correspondant à ce graphique sont un débit de 250 kg/h en eau et de 30 kg/h en air.

Sur les courbes, les barres d'incertitudes sont indiquées. Pour comprendre les différences importantes le long d'une même distribution, il faut rappeler l'instrumentation de mesure des débits d'air en sortie des canaux. En effet, en sortie de chaque canal sont placés deux débitmètres venturi qui permettent de calculer le débit à partir des mesures de pertes de pression. L'un est utilisé pour la gamme basse de débit (inférieur à 3 kg/h) et l'autre pour la gamme haute (supérieur à 3 kg/h). Celui pour la gamme basse a une incertitude faible (0,065 % de la pleine échelle sur la mesure du ΔP) alors que l'autre possède une incertitude plus importante (3 % de la pleine échelle sur la mesure du débit). Sachant que le second venturi est principalement utilisé sur le bas de sa gamme de mesure, l'erreur relative est donc plus importante pour les mesures en début de gamme. C'est ainsi qu'une différence importante sur les incertitudes est observée entre les différents points. Lorsque la mesure est faite à l'aide du venturi de la gamme basse, l'erreur n'est pas visible sur le graphique (<1%), tandis que pour le venturi de la gamme haute, l'incertitude est de quasiment 10% pour les premiers débits mesurés.

Cependant il faut nuancer ces incertitudes grâces aux différents essais menés. Les bilans massiques sur l'air se vérifient correctement à chaque essai à moins de 5% et permettent d'être plus confiant sur les résultats obtenus. La reproductibilité des essais donnant les mêmes résultats permet d'aller également dans le même sens.

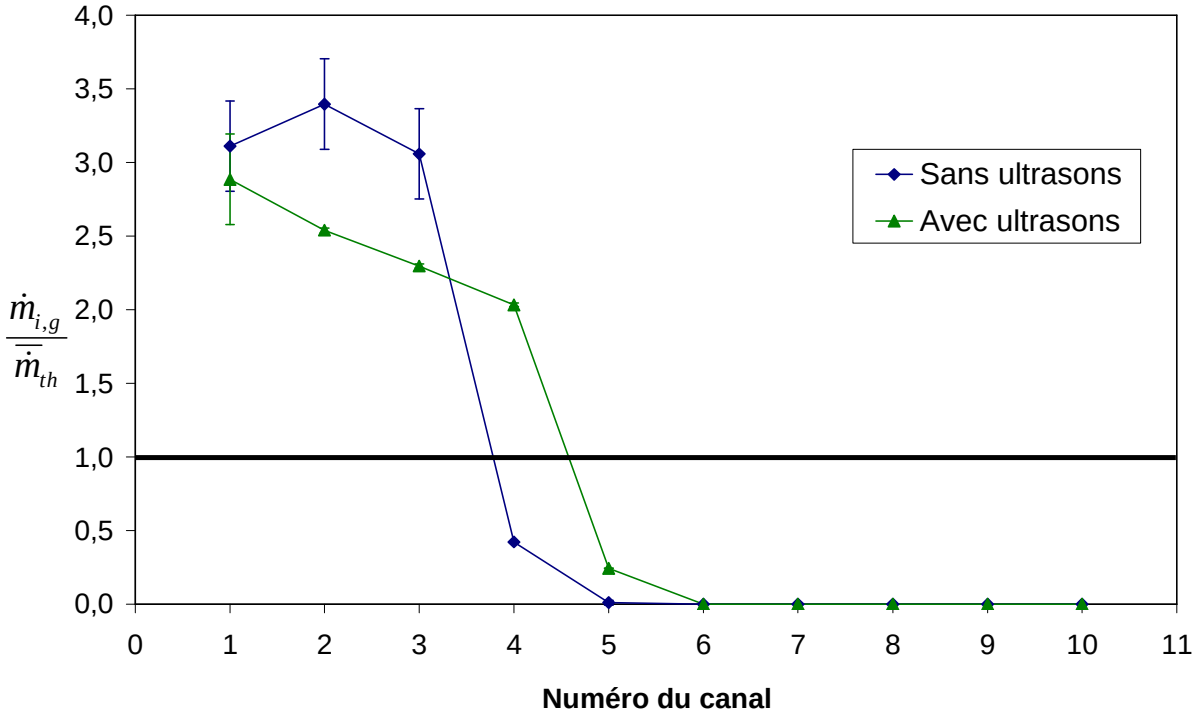


Figure IV- 25 : Distribution gazeuse avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 250kg/h et Q_{air} = 30kg/h.

Concernant la distribution, la tendance décrite précédemment est clairement visible sur cette figure. Le canal cinq se voit alimenter en air lorsque les ultrasons sont activés, alors que les quatre canaux précédents ont des ratios plus homogènes (compris entre 2 et 3) que lorsqu'il n'y pas d'ultrasons (entre 0,5 et 3,5). Les débits parcourant les canaux sont également plus faibles pour ces premiers canaux avec les générateurs d'ultrasons en marche.

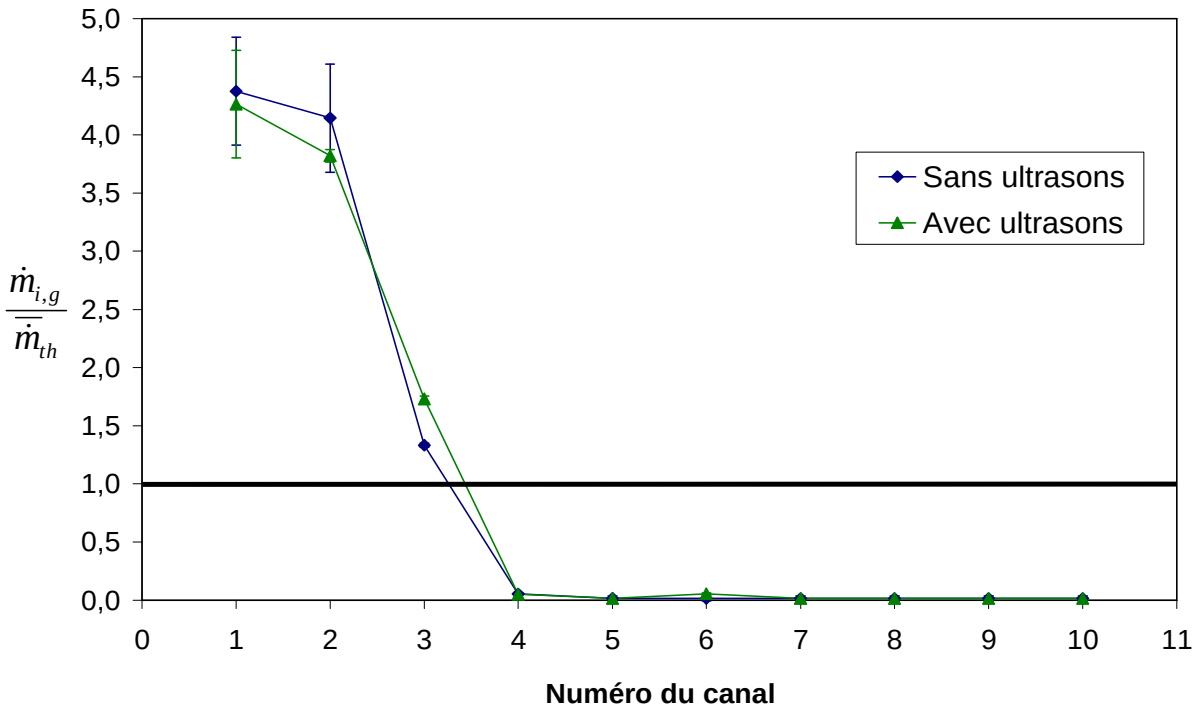


Figure IV- 26 : Distribution gazeuse avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 500 kg/h et Q_{air} = 20kg/h.

La Figure IV- 26 montre elle aussi la comparaison des distributions avec et sans les ultrasons mais avec un débit liquide plus important. Ceci permet de mieux visualiser les observations faites précédemment. Les trois premiers canaux tendent à homogénéiser leur valeur même si la tendance est beaucoup moins nette qu'à plus faible débit liquide. Le quatrième canal reste également sans passage d'air. L'effet des ultrasons semble donc moins sensible pour cet exemple.

2.1.2.3. Visualisations des écoulements.

Pour mieux comprendre ces comportements, des visualisations ont été effectuées à l'aide d'une caméra rapide FASTCAM SA3 permettant une acquisition de 2000 images par seconde pour la résolution maximale. L'installation de ce dispositif est présentée sur la Figure IV- 27.

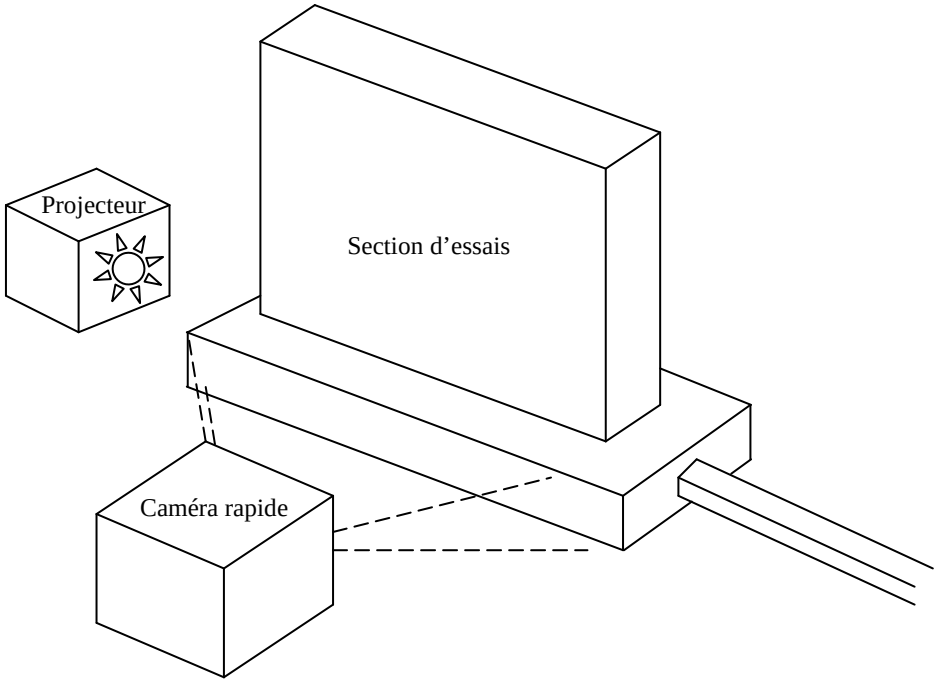


Figure IV- 27 : Schéma de principe de l'installation de la caméra rapide.

Ces visualisations ont permis d'étudier ce qu'il se passe dans le distributeur avec l'ajout des ultrasons. La position de la caméra rapide pouvait être changée afin de se focaliser sur une partie spécifique du distributeur. Des enregistrements ont été faits en se concentrant sur la première partie du distributeur (quatre premiers canaux) car le reste étant rempli d'eau, cela n'était donc pas pertinent. Les résultats correspondant à un débit d'eau de 250 kg/h et un débit d'air de 30 kg/h sont exposés sur la Figure IV- 28.

La figure présente le distributeur avec une alimentation de la droite vers la gauche et un écoulement vertical ascendant dans les canaux. Seuls les quatre premiers canaux sont visibles, le début du cinquième se situe sur la gauche des images. Ces photos permettent d'analyser le comportement de l'écoulement dans le distributeur. La photo du haut montre celui-ci lorsqu'il n'y a aucun générateur d'ultrasons activé. Dans ce cas-là, une nette stratification de l'écoulement est observée, ce qui conduit à une sous-alimentation en liquide des trois premiers canaux. Lorsque les ultrasons sont activés, la seconde photo montre alors ce que devient l'écoulement. Des fontaines sont créées au niveau de chaque générateur d'ultrasons, déstructurant complètement l'écoulement. Celui-ci se retrouve en partie en régime dispersé. En effet, les fontaines créées ne permettent pas de nébuliser l'eau mais perturbe l'écoulement. Le débit d'air permet ensuite de « casser » les fontaines, ce qui provoque un entraînement de gouttes dans le distributeur. Les fontaines étant dirigées vers les canaux et sous l'impulsion de l'air, cette eau se dirige en partie dans les premiers canaux. Cette alimentation des premiers canaux en eau a alors pour conséquence de diminuer la quantité d'eau au fond du distributeur. C'est ainsi que le « front » d'eau (schématisé par un trait rouge sur l'ensemble des figures) présent au niveau des canaux 3 et 4 pour les essais sans ultrasons se décale au niveau des canaux 4 et 5 lorsque les ultrasons sont présents. Ceci permet donc à l'air de passer plus facilement dans un canal de plus. Ceci explique donc le changement de distribution de la phase gazeuse. Cela explique aussi la translation du canal le plus suralimenté en eau, car le front liquide et donc la zone d'engorgement recule dans le distributeur en passant du canal 4 au canal 5. (Figure IV- 1 et Figure IV- 19 pour la distribution liquide ; Figure IV- 3 et Figure IV- 23 pour la distribution gazeuse).

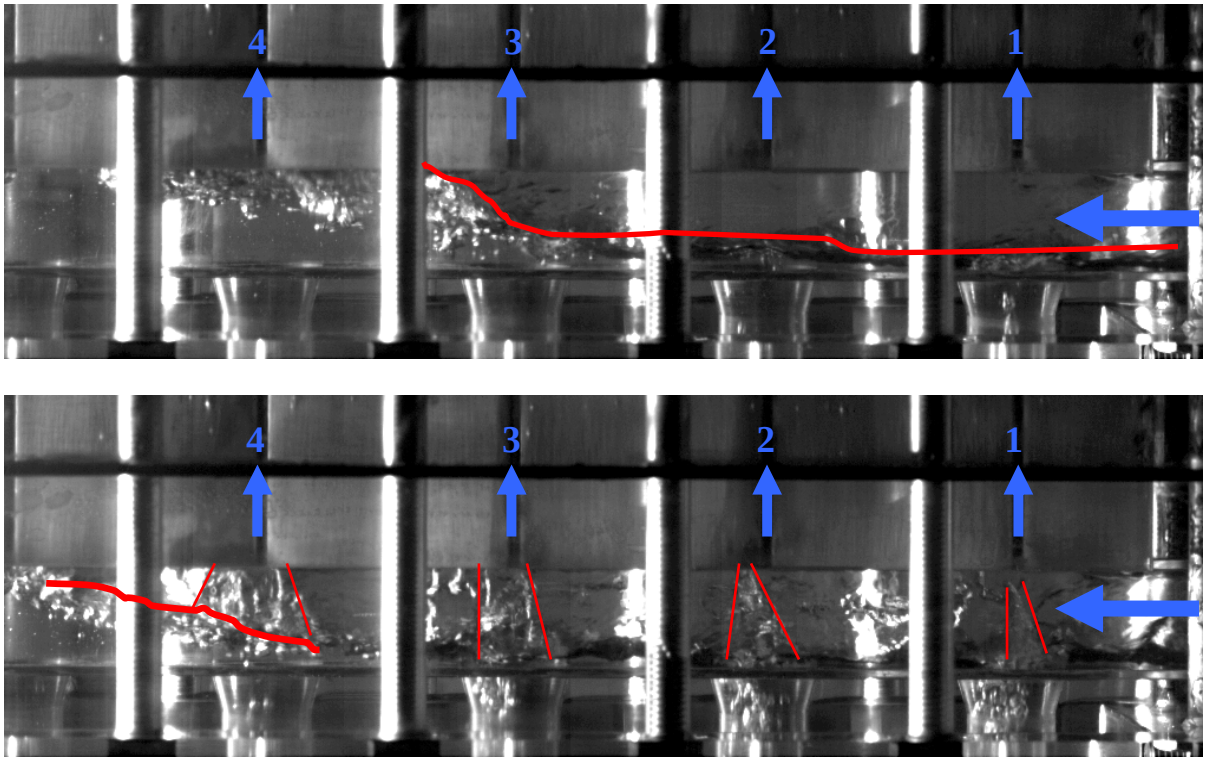
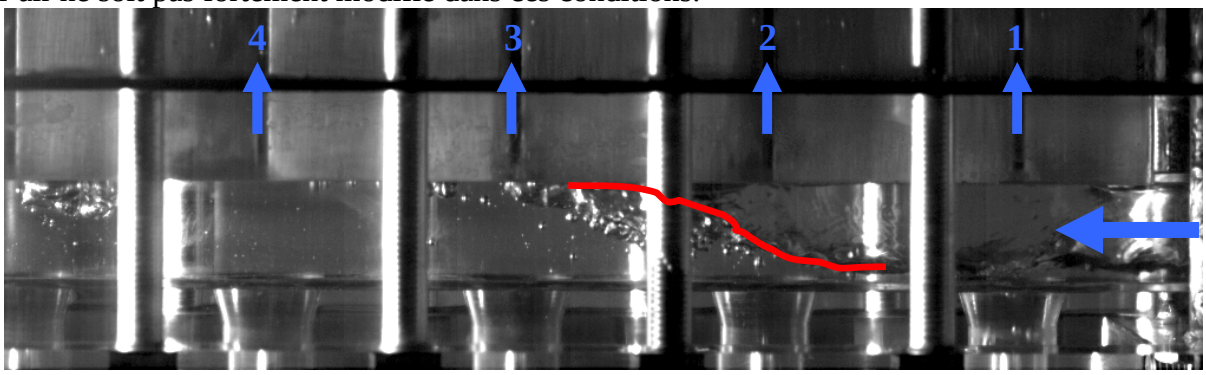


Figure IV- 28 : Photos de l'écoulement à l'avant du distributeur sans ultrasons (haut) et avec ultrasons (bas) avec Q_{eau} = 250kg/h et Q_{air} = 30kg/h.

La même étude de visualisation a été faite pour toutes les conditions opératoires testées. Les images correspondant à l'autre comparaison faite précédemment sont représentées sur la Figure IV- 29. (Figure IV- 1 et Figure IV- 19 pour la distribution liquide ; Figure IV- 3 et Figure IV- 23 pour la distribution gazeuse).

La même configuration de visualisation que pour la figure précédente est reprise, à savoir que seuls les quatre premiers canaux sont visibles sur ces photos ainsi que le début du cinquième. Sur cet exemple, l'effet des ultrasons est clairement visible. Pour le cas sans ultrasons, le régime d'écoulement est stratifié, alors que les fontaines apparaissent lorsque les ultrasons sont utilisés.

Sur ces photos, les deux premiers canaux ne sont pas en contact avec l'eau sauf lorsque les fontaines sont présentes. Le « front » de l'eau ne se décale pas non plus, même si sa pente est plus brutale avec les ultrasons. Ceci explique également le fait que le profil de distribution de l'air ne soit pas fortement modifié dans ces conditions.



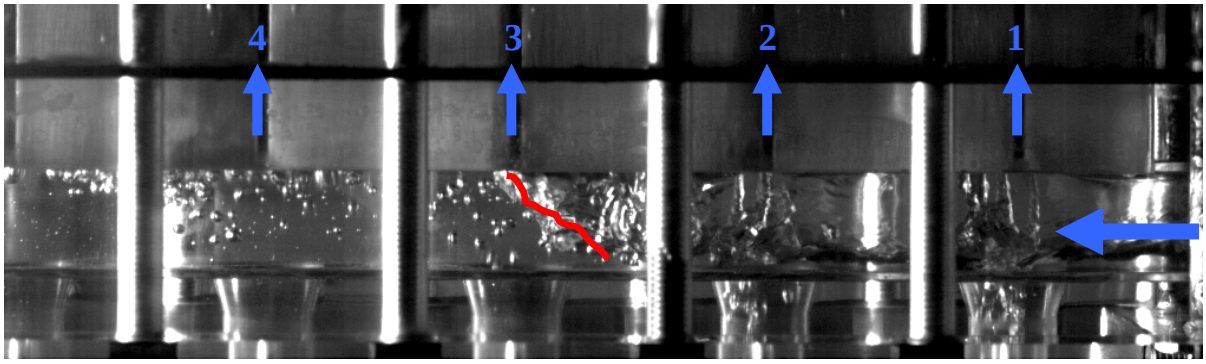


Figure IV- 29 : Photos de l'écoulement dans l'avant du distributeur sans ultrasons (haut) et avec ultrasons (bas) avec Q_{eau} = 500kg/h et Q_{air} = 20kg/h.

La présence de l'eau dans les premiers canaux est également assurée par les fontaines dirigées vers eux. A partir du troisième canal, l'effet des ultrasons n'est plus vraiment visible car la fontaine est quasiment inexistante puisqu'il n'y a presque que de l'eau. Néanmoins, la pente plus raide du « front » d'eau montre une alimentation moins forte de ce canal par l'eau, ce qui provoque donc un décalage du maximum vers le canal suivant, qui lui est complètement noyé. Les fontaines sont également plus distinctes que pour l'essai précédent, ceci est dû à deux paramètres : le premier est le débit d'air qui est moins grand et donc l'impact est moins prononcé sur la fontaine ; le second est lié à la phase liquide qui est plus importante dans ce cas, ce qui permet de mieux alimenter les générateurs d'ultrasons et de ne pas avoir un manque d'eau au niveau des « puits ». Ceci permet alors d'avoir une fontaine plus stable et qui projette une quantité d'eau plus importante.

2.1.2.4. Approche statistique de la distribution avec les ultrasons.

Les ultrasons permettent donc de perturber l'écoulement et également de diriger le fluide vers les canaux. L'impact de ces modifications sur la distribution semble cependant dépendant des conditions expérimentales. Ces modifications donnent donc des changements de distribution différents. Le coefficient STD présenté précédemment permet de comparer rapidement plusieurs distributions correspondant à différentes conditions expérimentales. Le graphique de la Figure IV- 30 montre l'évolution de ce coefficient en fonction du débit de la phase liquide en entrée de la section d'essais.

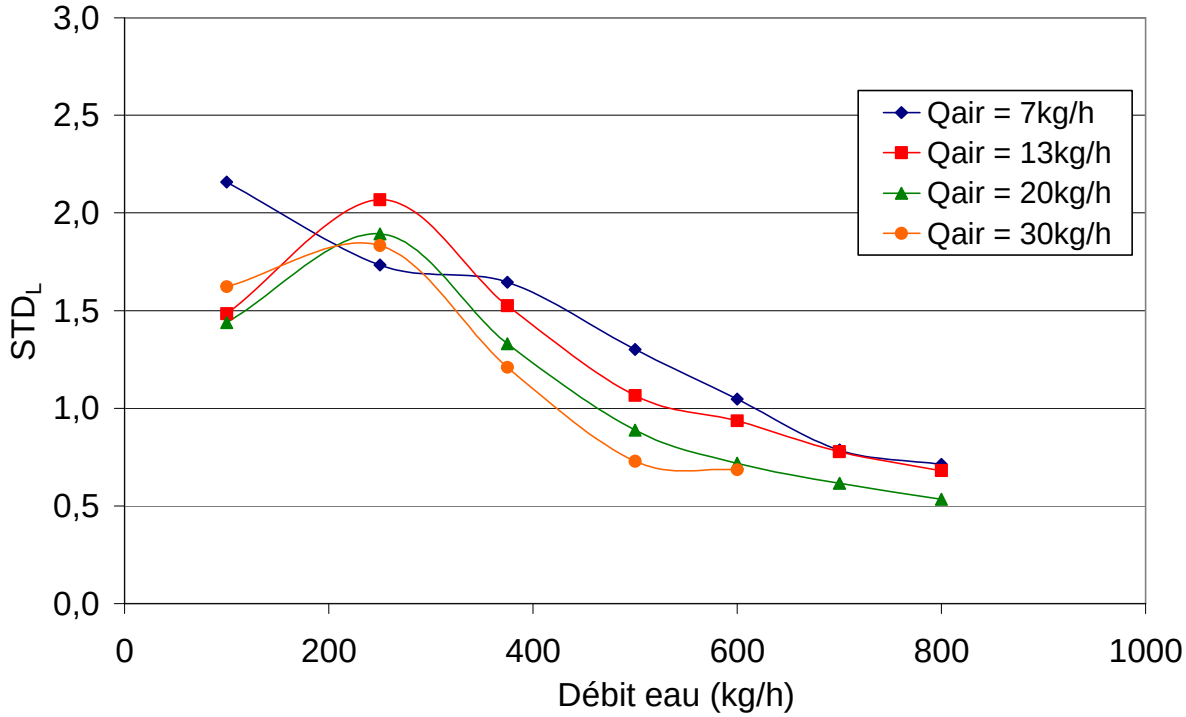


Figure IV- 30 : Évolution du STD_L en fonction du débit d'eau avec les ultrasons activés.

Cette figure permet d'observer les mêmes tendances que celles constatées pour les essais sans ultrasons (Figure IV- 9). En effet, le coefficient STD de l'eau tend à diminuer avec l'augmentation du débit de cette phase. Ceci confirme les différences remarquées sur les graphiques comparant la distribution avec et sans ultrasons. Toutefois, une différence peut être observée sur ce graphique. Lorsque les ultrasons ne sont pas activés, les courbes sont en tous points décroissantes, alors que sur ces résultats (avec les ultrasons) les conditions avec le plus faible débit en eau montrent un coefficient plus faible que pour un débit de 250 kg/h. Le contraste entre ces deux graphiques est également présent sur la Figure IV- 31. L'écart entre les deux distributions est caractérisé par la différence entre les valeurs des coefficients STD, selon :

$$\Delta STD = STD_{avec\ ultrasons} - STD_{sans\ ultrasons} \qquad \text{(IV.11)}$$

$$\Delta STD\ (\%) = \frac{STD_{avec\ ultrasons} - STD_{sans\ ultrasons}}{STD_{sans\ ultrasons}} \qquad \text{(IV.12)}$$

De ce fait, lorsque cette valeur est négative, cela signifie que le coefficient est plus faible avec les ultrasons que sans. Il peut alors en être déduit que la distribution est améliorée. Il faut néanmoins étudier les autres paramètres comme le coefficient d'asymétrie pour compléter cette analyse mais c'est une première approche de l'influence des ultrasons sur la distribution diphasique.

Les valeurs sont, pour la plupart, négatives sur ce graphique, ce qui montre que la majorité des essais avec les ultrasons ont permis d'avoir un coefficient STD moins important que la distribution « normale » pour la phase liquide. Une tendance générale se dégage de ces résultats : plus le débit d'eau est faible plus la différence entre les deux coefficients est importante. Cependant, cette tendance semble prendre une ampleur plus importante pour un

débit de 100 kg/h. Les ultrasons semblent jouer un rôle plus important pour les faibles débits d'eau.

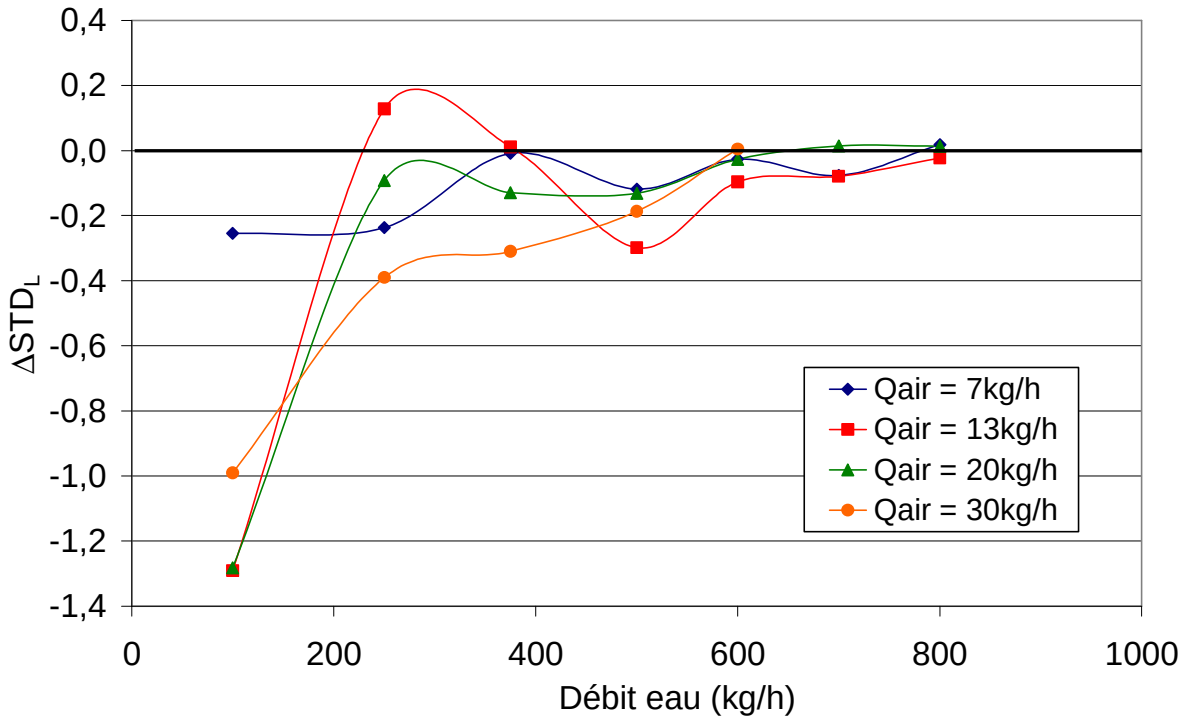


Figure IV- 31 : Écart entre le STD_L obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide.

La figure précédente présente les écarts en valeur absolue, néanmoins, en étudiant le rapport de cette différence sur le coefficient STD sans ultrasons (équation IV.12), les mêmes tendances se dégagent, comme le montre la Figure IV- 32.

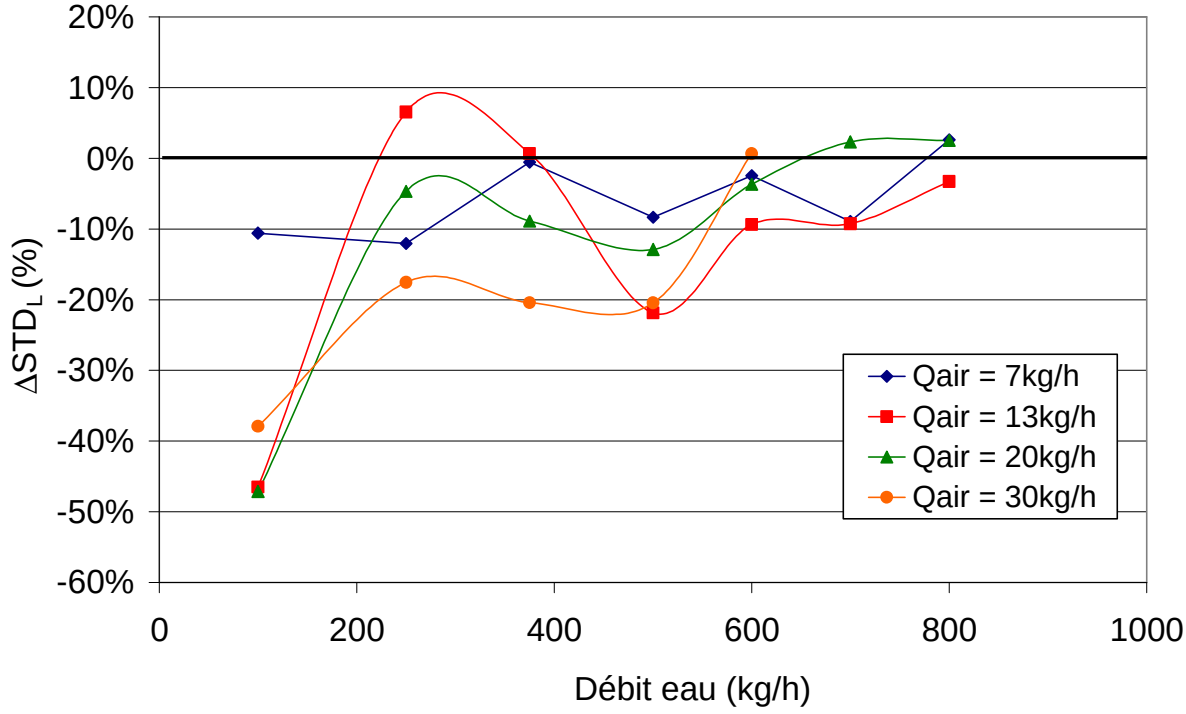


Figure IV- 32 : Écart relatif entre le STD_L obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide.

Ces évolutions sont liées à la modification apportée par les ultrasons. En effet, les ultrasons permettent de déstructurer l'écoulement, comme présentés sur les photos précédentes (Figure IV- 28 et Figure IV- 29). Toutefois, l'intensité de cette déstructuration semble fonction des débits d'eau et d'air parcourant le distributeur. En effet, pour un débit d'eau plus important, plus de turbulences sont présentes, ce qui fait que celles provoquées par les ultrasons deviennent relativement moins importantes. Cette remarque peut également être comparée avec les améliorations apportées aux échangeurs pour augmenter les transferts thermiques. L'ajout d'éléments géométriques dans l'échangeur (comme des ailettes à pas décalé par exemple) va être plus intéressant dans un régime de transition que dans un régime turbulent. L'augmentation du transfert thermique y est plus importante que l'amplification des pertes de pression. Toutes ces modifications changent le comportement du fluide en lui apportant de la turbulence, il est donc logique que cet apport soit plus significatif lorsque peu de turbulences sont présentes dans l'écoulement initial.
Dans cette analyse, le changement de débit apporté dans chaque canal par les ultrasons est alors pondéré dans le ratio. De plus, le coefficient STD est plus faible pour les forts débits que pour les faibles. Il est alors plus difficile d'améliorer une « bonne » distribution qu'une « mauvaise ».

Les mêmes observations peuvent être faites sur la Figure IV- 33 présentant l'évolution de l'écart relatif du coefficient STD avec et sans ultrasons pour la phase gazeuse.

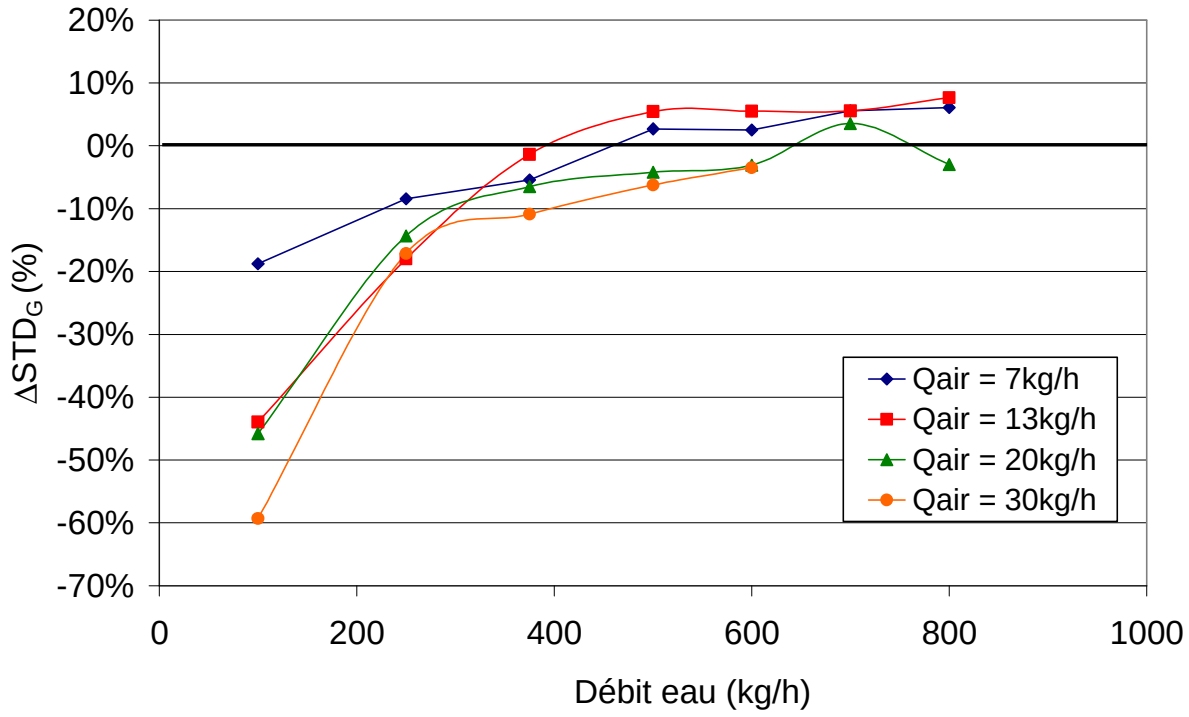


Figure IV- 33 : Écart relatif entre le STD_G obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide.

Les courbes de la phase gazeuse sont moins fluctuantes que celles de la phase liquide. Une tendance nette à la dégradation de la différence entre les deux coefficients STD apparaît lorsque le débit liquide augmente. En effet, plus la différence tend vers une valeur positive importante, moins les ultrasons améliorent le coefficient STD. La limite du débit d'eau pour laquelle la distribution est détériorée dépend du débit d'air à l'entrée. Le comportement observé en fonction du débit d'eau est lié à l'évolution de la distribution liquide. En effet, comme vu précédemment, la distribution gazeuse n'est pas très affectée par la variation du

débit liquide. Cependant, avec les ultrasons, la distribution liquide change dans les premiers canaux, là où passe la phase liquide. Comme ces premiers canaux sont davantage alimentés en eau lorsque le débit d'eau augmente, la phase gazeuse se propage dans les suivants. Toutefois, ceci atteint une certaine limite qui est représentée par le « front » présenté sur les photos du distributeur (Figure IV- 28 et Figure IV- 29). En effet, ce front est moins affecté pour des débits d'eau plus importants : l'eau prélevée par les premiers canaux ne suffisant pas à déplacer de la même façon ce front. L'amélioration de la distribution gazeuse présentée sur la Figure IV- 25 et la Figure IV- 26 est donc décroissante avec le débit liquide. La dégradation observée pour les faibles débits en air est liée au fait que le nombre de canaux alimentés est moins important que pour 20 ou 30 kg/h par exemple. L'eau empêchant l'air d'alimenter les canaux en aval conduit donc à une suralimentation du premier à cause des pertes de pression. La fontaine agit alors comme un obstacle à l'air, l'incitant à pénétrer dans le premier canal. Cette dégradation n'est pas vraiment visible pour les forts débits en air car la vitesse de la phase gazeuse est assez importante pour « casser » ces fontaines et alimenter les canaux suivants.

❖ Cas particulier des essais avec un débit liquide de 100 kg/h.

Sur les graphiques présentant l'influence des ultrasons sur la distribution, et plus particulièrement le coefficient STD, une observation particulière est à noter pour les résultats concernant le plus faible débit en eau en entrée testé. Comme noté sur l'évolution de ce coefficient en fonction du débit liquide, un comportement spécifique est constaté pour un débit de 100 kg/h avec ultrasons. Ce comportement se retrouve sur les graphiques avec le ΔSTD où les points correspondant à ce débit possèdent une valeur négative et très différente des autres résultats. Ceci est dû au calcul du coefficient pour ces conditions. En effet pour le plus faible débit en eau, des cycles de distribution apparaissaient. Lors de ces cycles, les distributions de l'eau et de l'air n'ont pas de régime établi. C'est-à-dire que pendant un certain temps les x premiers canaux étaient alimentés et pendant un second temps, les y canaux suivant l'étaient à leur tour. Pendant cette seconde période, aucun écoulement n'était alors observé dans les x premiers canaux.

Pour obtenir une valeur pour le coefficient STD, la moyenne des débits sortant d'un canal sur l'ensemble d'un cycle a été calculée. Ceci permet d'obtenir une distribution pour les dix canaux sur la durée d'un cycle, cette durée étant sensiblement la même d'un cycle à un autre. La valeur obtenue pour les débits à 100 kg/h en eau est donc issue d'une moyenne sur un cycle et ne permet pas de prendre en compte l'aspect transitoire des cycles. Il a cependant été choisi de montrer ces valeurs dans les précédents graphiques, notamment parce que les valeurs présentaient les mêmes tendances que pour les autres conditions. Ce phénomène de cycle est un artefact de la boucle, mais n'apparaît que lorsque les générateurs d'ultrasons sont en marche. En effet, les hauteurs entre la sortie des canaux et la surface du fluide dans les séparateurs jouent un rôle important.

Dans la première partie du cycle, la distribution ressemble sensiblement à celle attendue, avec cependant des modifications dans les débits parcourant les canaux. En effet, la distribution est améliorée, en suivant les tendances présentées précédemment. Cependant une variation du débit d'eau sortant est observée, effet visible d'une accumulation d'eau dans la boucle expérimentale. C'est notamment ce point qui a permis de déterminer la durée des cycles. Lors de cette partie du cycle, le débit d'air dans le premier canal diminue, ce qui signifie que de moins en moins d'air passe par le canal mais surtout que plus d'eau en sort. En effet, la diminution du débit d'air dans le canal est liée à l'augmentation de la perte de pression entre

la sortie du canal et les séparateurs. Le débit d'entrée en eau est en effet trop faible pour maintenir un équilibre dans le distributeur. Cet apport en eau ne vient pas de l'entrée mais de l'aval du distributeur. Lorsque les canaux suivants sont observés, une baisse du niveau de la surface de l'eau dans les séparateurs est remarquée. Lorsque cette surface atteint une hauteur critique, l'air s'engouffre alors dans ces canaux, n'alimentant alors plus du tout les premiers canaux. Ces premiers canaux se vident donc de leur eau ; le liquide alimentant ensuite les canaux où passe l'air.

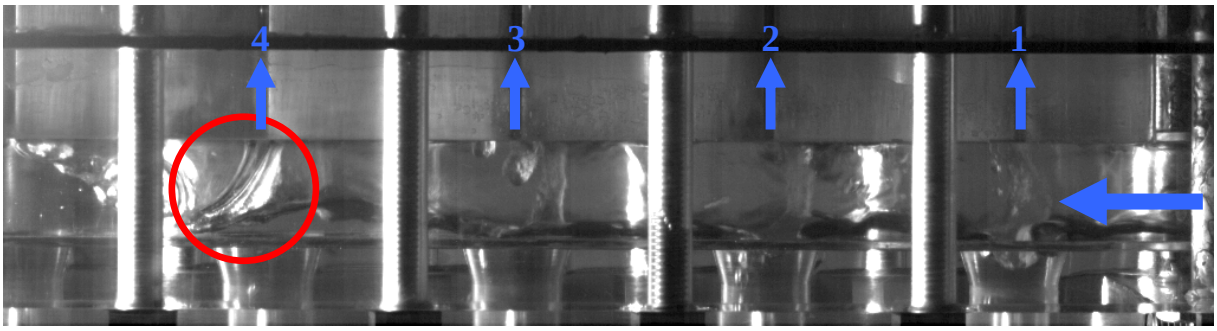


Figure IV- 34 : Photo du distributeur (5 premiers canaux) avec les ultrasons activés pour Q_{eau} = 100kg/h et Q_{air} = 20kg/h.

Les rôles sont alors inversés par rapport à la première partie du cycle. Néanmoins, cette période est beaucoup plus rapide que la première car l'entrée des premiers canaux n'est pas noyée contrairement aux canaux en aval lorsque ceux-ci se vident lors de la première partie du cycle. La Figure IV- 34 montre l'écoulement inversé dans le canal numéro 4 (entouré par un cercle rouge).Pendant un certain temps, les premiers canaux et les séparateurs vont se vider pour eux aussi atteindre une hauteur de surface limite. Ensuite, l'air alimente de nouveau les premiers canaux, de même que l'eau, pour recommencer un nouveau cycle. La hauteur de colonne de fluide (mélange eau-air) entre la sortie des canaux et la surface libre du fluide dans les séparateurs (Figure IV- 8) semble donc à l'origine de ces cycles, spécifiques aux moyens d'essais mis en place mais provoqués par l'usage des ultrasons qui perturbent l'écoulement dans le distributeur par le biais des fontaines.

Cette particularité liée aux ultrasons qui créent donc une instabilité dans la distribution n'a été observée que pour ce débit de 100 kg/h et dans cette configuration de section d'essais. Il faut également noter que la durée des cycles varie en fonction du débit d'air. En effet, la période augmente lorsque le débit de la phase gazeuse diminue. Ce comportement est lié au fait que pour un débit de gaz moindre, moins d'eau sera emportée par cette phase. Ceci fait que les canaux en aval se videront plus lentement. Pour un débit d'air de 7 kg/h un comportement quasi-similaire à un régime établi a d'ailleurs été observé. L'air est également initialement présent dans moins de canaux, ce qui diminue l'instabilité possible.

Pour avoir une idée de ce que donne cette distribution moyennée sur un cycle, le graphique de la Figure IV- 35 présente les résultats de la phase liquide avec et sans ultrasons pour un débit d'air de 20 kg/h et un débit d'eau de 100 kg/h.

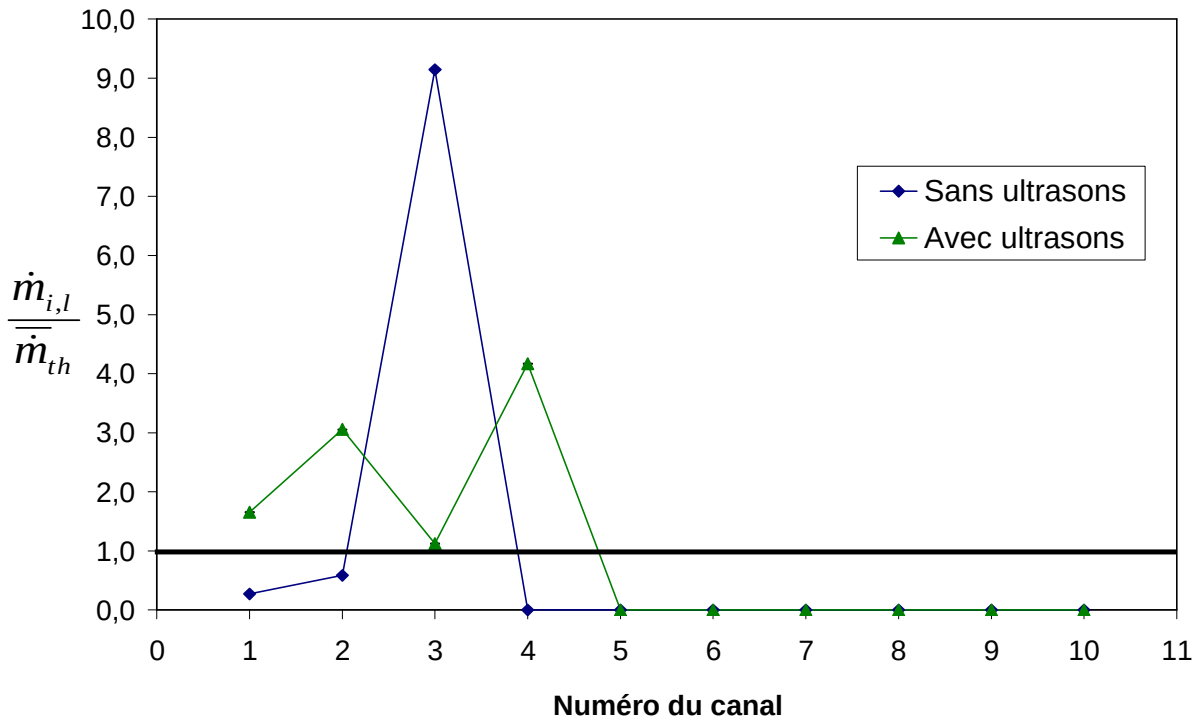


Figure IV- 35 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 100kg/h et Q_{air} = 20kg/h.

Cette distribution avec ultrasons calculée avec les moyennes sur la durée d'un cycle ressemble sensiblement à ce vers quoi les précédents profils tendent. Un canal de plus alimenté et une homogénéisation des premiers. Cependant le débit parcourant les canaux n'est pas continu. La différence est toutefois plus importante sur la phase gazeuse, comme le montre la Figure IV- 36. En effet, mêmes les derniers canaux sont alimentés en air à un moment du cycle, ce qui permet d'observer un débit sur la moyenne du cycle.

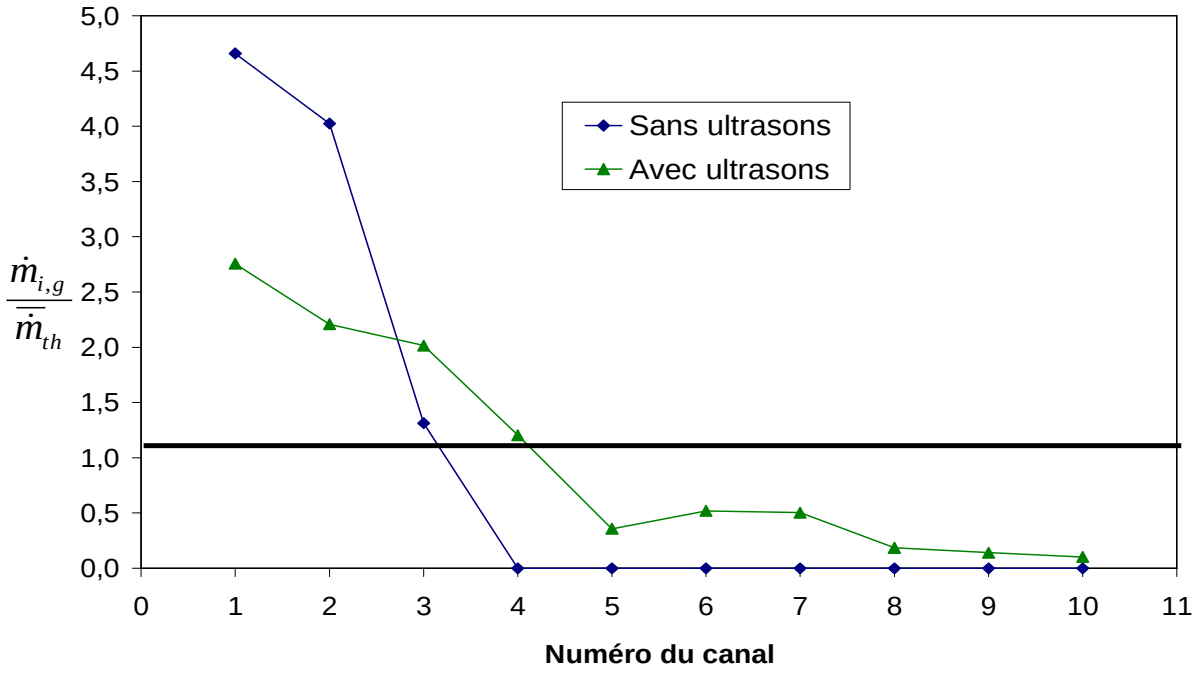


Figure IV- 36 : Distribution gazeuse avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 100kg/h et Q_{air} = 20kg/h.

Ces résultats pour un débit d'eau de 100 kg/h sont importants car ils montrent que les ultrasons peuvent avoir un impact très important sur la distribution diphasique. Il est donc nécessaire de les présenter et de les expliquer. Néanmoins, ces résultats ne seront pas réutilisés dans la suite de l'analyse de cette configuration d'échangeur car les outils mathématiques font totalement abstraction des cycles. Les coefficients calculés n'auraient alors pas de réel sens physique.

Pour l'ensemble des essais, les ultrasons améliorent le coefficient STD de la distribution liquide pour 76% d'entre elles. Le coefficient de la phase gazeuse est quant à lui amélioré dans 65% cas grâce aux ultrasons. L'amélioration des deux phases simultanément à lieu dans 54% des conditions. Les ultrasons apportent donc une plus-value dans la majorité des cas. Cependant cette observation ne se fait qu'en analysant un seul coefficient : le STD.

Le second point d'analyse porte sur le coefficient d'asymétrie S_k. En effet, l'amélioration du coefficient STD est à compléter par l'analyse de l'asymétrie de la distribution. Lorsque ces deux coefficients ont les mêmes tendances, alors la distribution est réellement améliorée. Si les deux présentent des tendances opposées, l'amélioration ou la dégradation de la distribution est alors à nuancer. Dans un premier temps, la Figure IV- 37 présente l'évolution du coefficient d'asymétrie de la phase liquide en fonction du débit d'eau à l'entrée du distributeur.
Des tendances similaires à celles observées sans les ultrasons (Figure IV- 16) sont constatées sur ce graphique. En effet, lorsque le débit d'eau augmente, l'asymétrie de la distribution diminue. La suralimentation est donc moins importante à fort débit en eau. Cependant pour comparer correctement les essais sans ultrasons et ceux avec, il faut étudier la différence de la valeur du coefficient. Ceci est représenté sur le graphique de la Figure IV- 38.

$$\Delta S_k = S_{k\ avec\ ultrasons} - S_{k\ sans\ ultrasons} \qquad \text{(IV.13)}$$

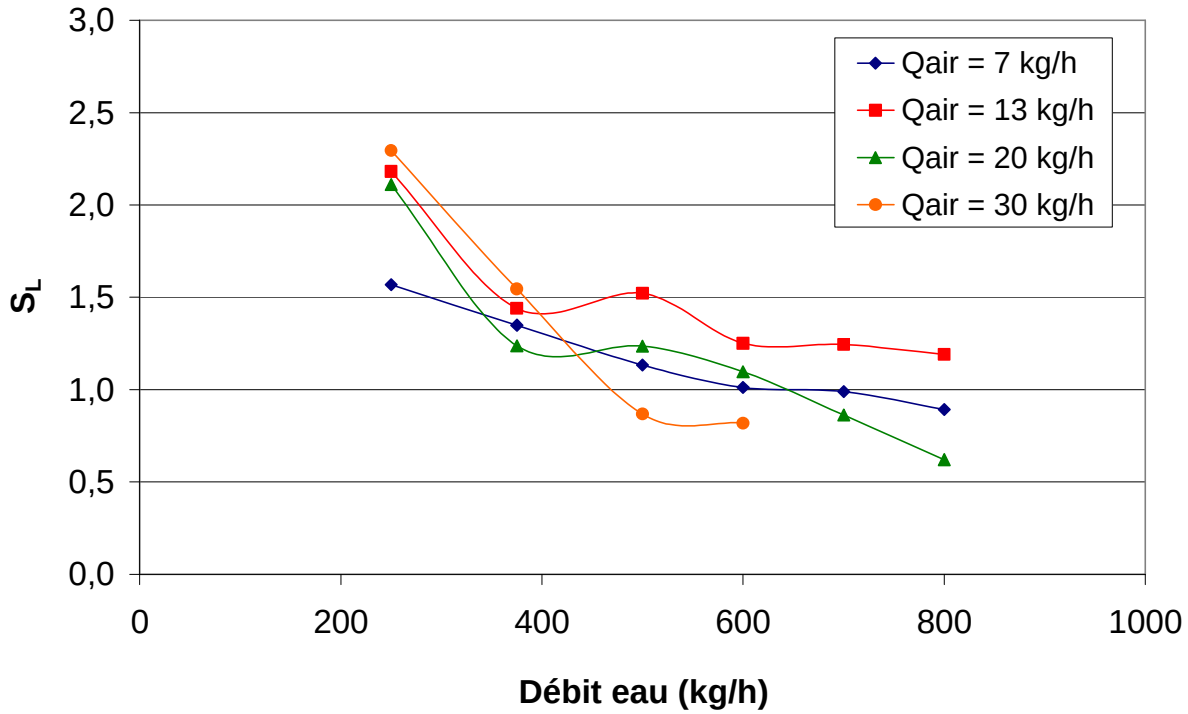


Figure IV- 37 : Évolution du coefficient S_k pour la phase liquide avec les ultrasons activés en fonction du débit de celle-ci.

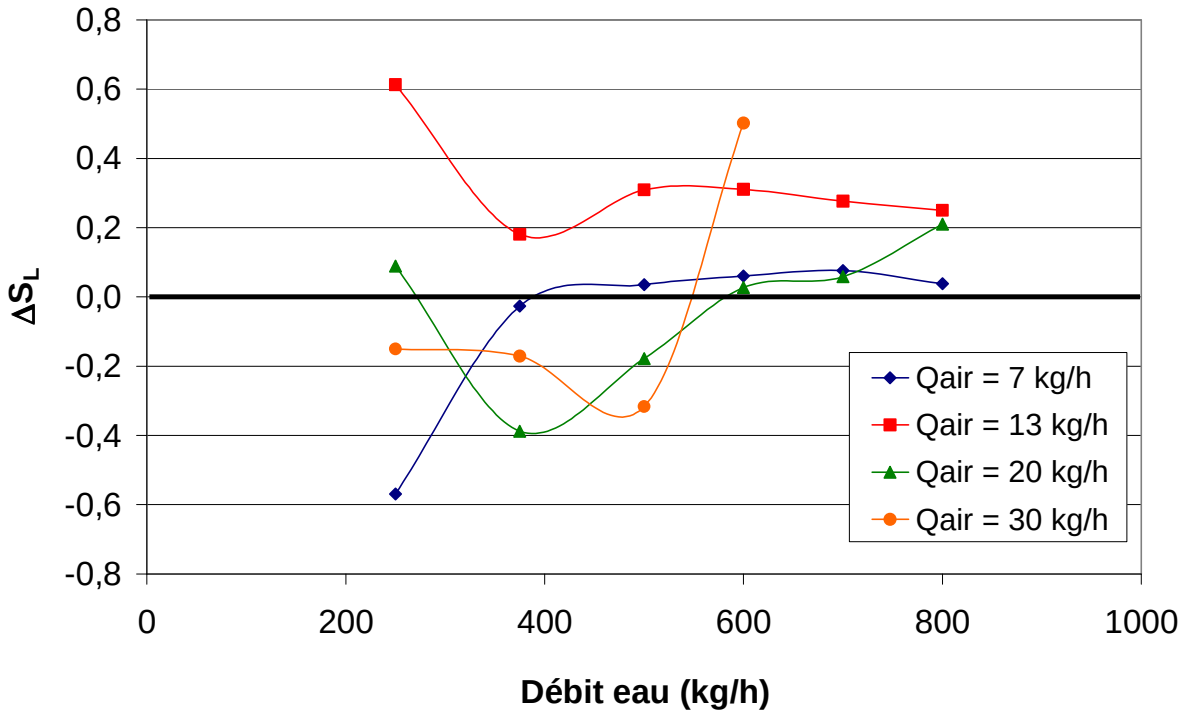


Figure IV- 38 : Évolution du coefficient ΔS_k pour la phase liquide avec les ultrasons activés en fonction du débit de celle-ci.

Lorsque le ΔS_L, dont la définition a été donnée précédemment (Equ .IV.12), est analysé, les tendances ne sont pas du tout similaires à celles observées pour le ΔSTD. En effet, de ce graphique, aucune tendance générale ne peut être tirée pour l'ensemble des points, sauf peut-être pour les forts débits en eau, dont l'asymétrie est toujours plus importante avec les ultrasons. Aucune tendance ne se dégage non plus lorsque d'autres paramètres sont pris comme référence, tels que le débit d'air, le titre en entrée de distributeur ou bien le STD_L. L'amélioration n'est présente que dans sept conditions, ce qui peut être lié au fait que les changements apportés sur la distribution ne se situent que sur les premiers canaux. En effet, la distribution sur les cinq premiers canaux est homogénéisée et les cinq derniers semblent à part compte tenu qu'ils sont totalement noyés par la phase liquide. Ceci peut s'apparenter à deux échangeurs, le premier où les ultrasons agissent et le second où ils sont inefficients. Dans le premier, si la distribution a tendance à s'homogénéiser, les valeurs vont alors tendre vers un ratio de 2, qui correspond à un débit homogène pour cinq canaux. Ceci a donc tendance à renforcer la suralimentation et donc augmenter le coefficient d'asymétrie.

Afin de compléter et finaliser l'analyse de l'influence des ultrasons, l'étude de la répartition du titre massique de gaz dans les canaux a été menée. Celle-ci est représentée par le graphique de la Figure IV- 39.
Les tendances observées sont les mêmes que celles remarquées sans ultrasons (Figure IV- 18). En effet, l'augmentation du titre à l'entrée, et donc la diminution du débit liquide, va diminuer l'écart-type de la répartition du titre. Les titres dans les canaux sont donc plus dispersés avec des faibles titres ou forts débits en eau. Cependant, comme pour la première analyse, il faut être prudent dans l'interprétation de ces tendances. L'air passe dans plus de canaux lorsque le débit gazeux augmente à l'entrée de la section d'essais. Toutefois, la différence entre la répartition du titre avec et sans ultrasons est intéressante. Ces résultats sont analysés dans la Figure IV- 40. De la même façon que les précédentes comparaisons, la valeur sans ultrasons

est soustraite à celle avec ultrasons. Une valeur négative est donc synonyme d'une amélioration.

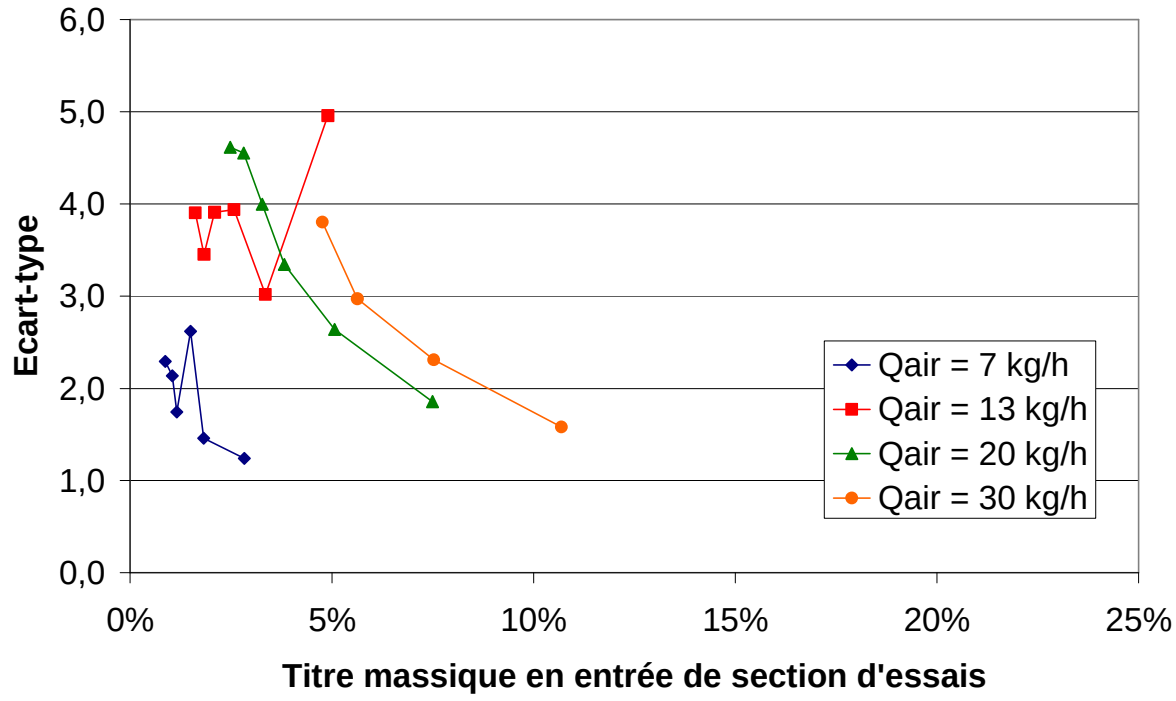


Figure IV- 39 : Évolution de l'écart-type de la distribution du titre massique dans les canaux en fonction du titre massique en entrée de distributeur avec les ultrasons activés.

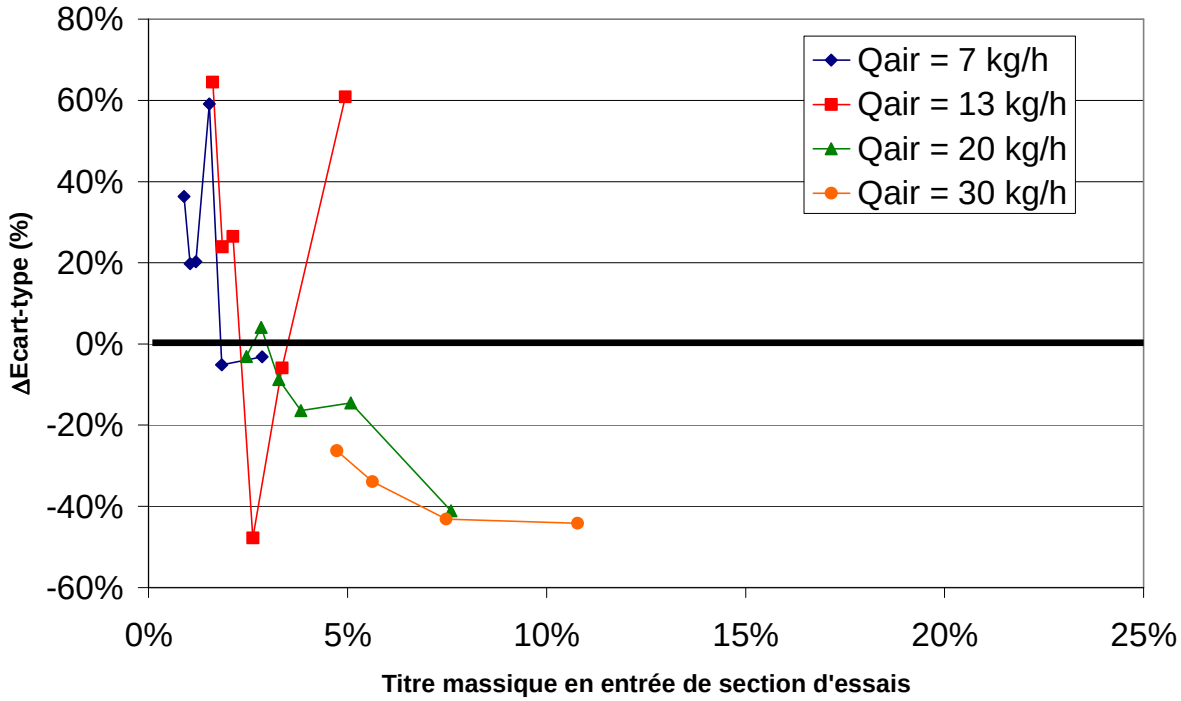


Figure IV- 40 : Évolution de la différence sur l'écart-type de la distribution du titre dans les canaux avec et sans ultrasons.

Des tendances intéressantes apparaissent sur ce graphique. Lorsque le titre en entrée augmente, la distribution du titre dans les canaux tend à être meilleure avec les ultrasons sauf

pour les titres les plus importants avec un débit d'air de 13 kg/h. Il y a donc une amélioration de la distribution du titre lorsque les débits d'eau sont faibles. De plus, lorsque le débit gazeux augmente, cette amélioration est amplifiée. Ces remarques sont similaires à celles de l'étude du coefficient STD où les faibles débits en eau présentaient une plus grande amélioration du coefficient lorsque les ultrasons étaient ajoutés. L'amélioration liée à l'augmentation du titre correspond également à l'augmentation du débit d'air présent sur le graphique étudiant le ΔSTD_L. Ceci est logique car les distributions des deux phases présentent les mêmes tendances. De ce fait, les tendances du titre massique sont les mêmes.

2.1.3. Conclusion partielle.

Ces essais sur la section d'essais dans la configuration 0 permettent de dégager certaines tendances ainsi que certains comportements. La répartition d'une phase tend à s'améliorer lorsque le débit de celle-ci en entrée de la section d'essais augmente. La distribution présentée reste spécifique aux moyens d'essais utilisés, cependant les ultrasons ont un effet non négligeable sur celle-ci. En effet, les ultrasons perturbent fortement l'écoulement par le biais des fontaines créées dans le distributeur. Cela aboutit à une amélioration de la distribution liquide ou gazeuse dans une majorité des cas, et dans quelques cas, elles se trouvent dégradées.
Il a également été observé que pour certaines conditions (100 kg/h), le système n'est pas stable et possède une alimentation périodique des canaux. Les ultrasons peuvent donc jouer sur la stabilité du système. Cependant, cette particularité n'a été observée que dans ces conditions.
L'étude menée à partir des coefficients statistiques STD a permis de montrer concrètement cette amélioration en fonction des différents paramètres opératoires choisis et également de comparer les différents résultats obtenus. Les ultrasons provoquent des changements plus importants sur la distribution lorsque le débit liquide diminue. Le débit gazeux semble également jouer un rôle, lorsque celui-ci est plus grand, la différence entre le coefficient STD sans et avec ultrasons semble augmenter également.
L'analyse de la distribution du titre massique a confirmé cette amélioration en présentant les mêmes tendances d'amélioration. La distribution semble donc être plus améliorée lorsque le titre est fort. La réflexion menée sur cette distribution atypique et différente de celles observées dans la littérature scientifique, permet de mieux comprendre les phénomènes (décalage du front liquide, zone noyée, formation de la fontaine, transport des gouttes et déstructuration de l'écoulement) mis en jeu dans la section d'essais, avec et sans l'ajout des ultrasons. Les grandes tendances sont également montrées.
Néanmoins, un besoin d'observer l'influence des ultrasons sur une distribution similaire à la littérature s'impose. La conception de la section d'essais a d'ailleurs été faite pour avoir une distribution typique de cette configuration d'échangeur, même si dans cette première partie, les éléments périphériques de la section d'essais perturbent cette distribution.

2.2 Résultats pour les configurations 1 et 2.

Cette partie concerne les essais réalisés avec des modifications sur les vannes pour faire correspondre aux configurations 1 et 2 présentées en début de chapitre en imposant un profil de pertes de pression. Les distributions observées sont donc plus proches de celles observées dans la littérature.

2.2.1. Sans ultrasons.

2.2.1.1. Influence du débit d'eau.

Le premier profil de distribution forcée obtenu est celui présenté par la Figure IV- 41 qui ressemble fortement à la distribution typique de la littérature pour une configuration avec un distributeur horizontal et des canaux verticaux avec un écoulement ascendant (**Vist et Petterson [2004]**, Figure 35 et 36 du Chapitre 1). La phase liquide alimente principalement les derniers canaux alors que la phase gazeuse alimente les premiers.

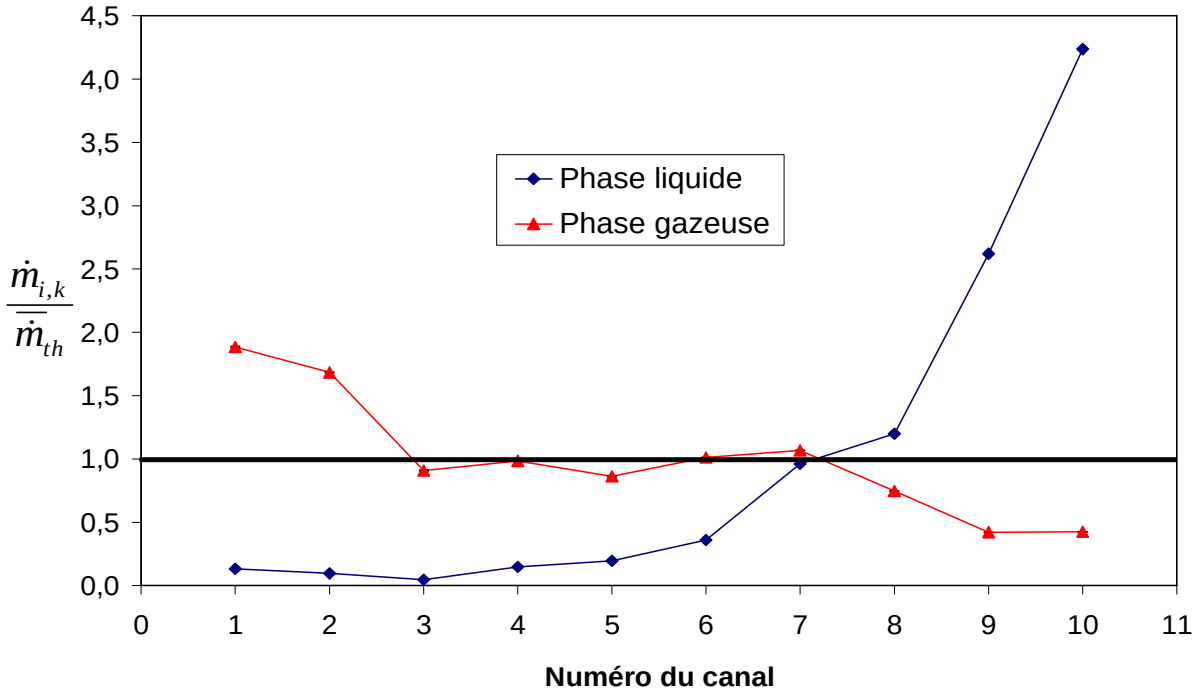


Figure IV- 41 : Distribution liquide forcée pour Qeau = 600 kg/h dans la configuration 1.

Cette répartition des deux phases est totalement différente de celle observée pour les mêmes conditions sans régler les vannes. Elle permet d'avoir un régime stratifié sur une plus grande partie du distributeur, ce qui devrait être bénéfique à l'utilisation des ultrasons, qui auront la possibilité de fonctionner suivant les prévisions. Cette configuration permet également de ne pas avoir de canal où le débit est contrôlé par la hauteur d'eau dans le séparateur en aval.

En procédant de la même façon que pour la première partie, l'influence du débit d'eau sur la distribution liquide pour la configuration 1 est analysée sur la Figure IV- 42.
La distribution de l'eau n'est que très peu influencée par son débit à l'entrée de la section d'essais. Les ratios restent sensiblement les mêmes, ce qui signifie également que la valeur absolue du débit alimentant ces canaux augmente sans atteindre une limite. Une tendance peut néanmoins se dégager : plus le débit d'eau est faible, plus les deux derniers canaux sont alimentés, au dépend du septième canal. Cependant cette tendance est de faible ampleur.

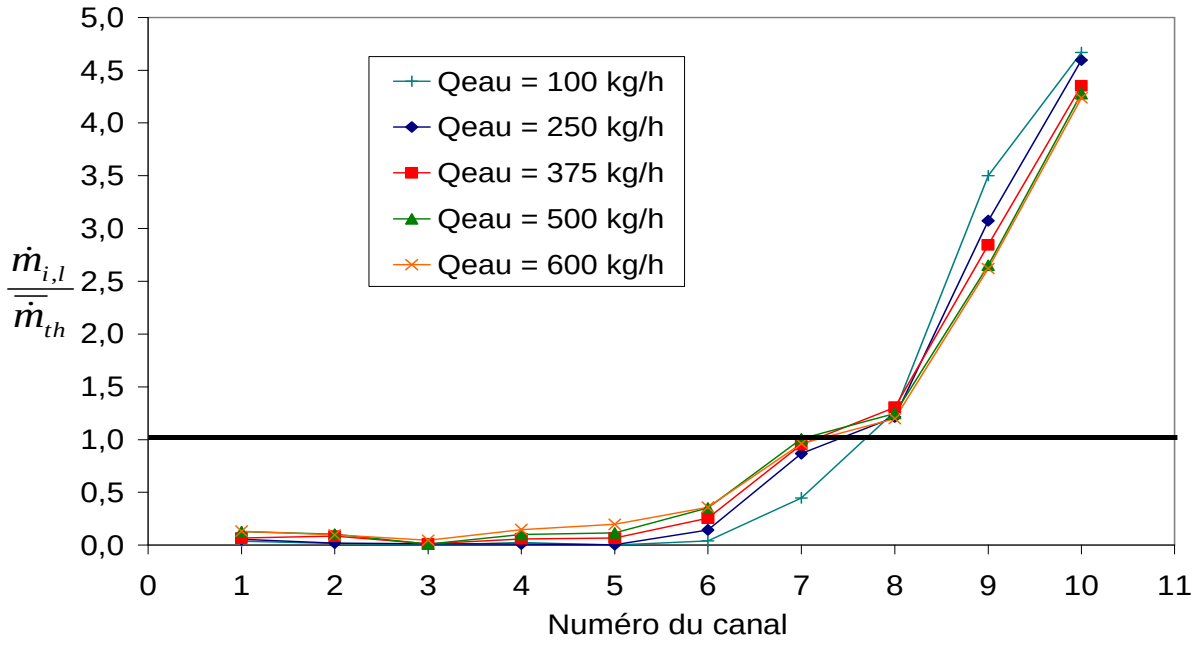


Figure IV- 42 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'eau dans la configuration 1.

Il apparaît donc une légère modification de la distribution liquide lorsque le débit d'eau diminue à l'entrée. Ceci est lié à la zone noyée au fond du distributeur qui est plus importante lorsque le débit est plus grand. Les photos du distributeur sur la Figure IV- 43 illustrent ces propos.

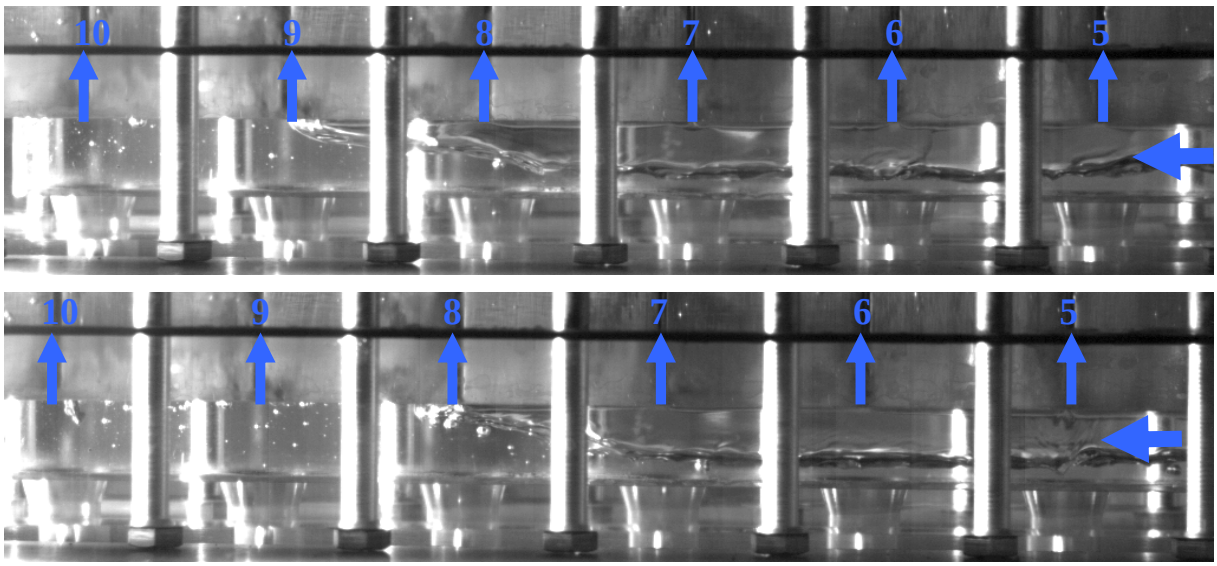


Figure IV- 43 : Photos des derniers canaux du distributeur pour la configuration 1 avec Q_{eau} = 100 kg/h (haut) et Q_{eau} = 600 kg/h (bas).

Pour la configuration 2, les distributions liquides en fonction du débit d'eau entrant dans la section d'essais sont illustrées sur la Figure IV- 44.
Les résultats liés à cette seconde configuration sont différents de ceux liés à la première. En effet, en fonction du débit, les valeurs des ratios changent significativement, notamment pour les derniers canaux. Plus le débit d'eau augmente, plus la phase liquide tend à mieux se répartir dans les canaux. C'est la tendance de la première configuration mais avec une

amplitude beaucoup plus importante. Cette différence est liée au fait que la pression à l'intérieur du distributeur est plus importante avec un débit d'air de 30 kg/h. Les vannes ont donc besoin d'être plus fermées que pour le débit de 7 kg/h. Ceci provoque une limite de débit possible dans les derniers canaux, ce qui permet alors au liquide d'alimenter les canaux en amont du dixième.

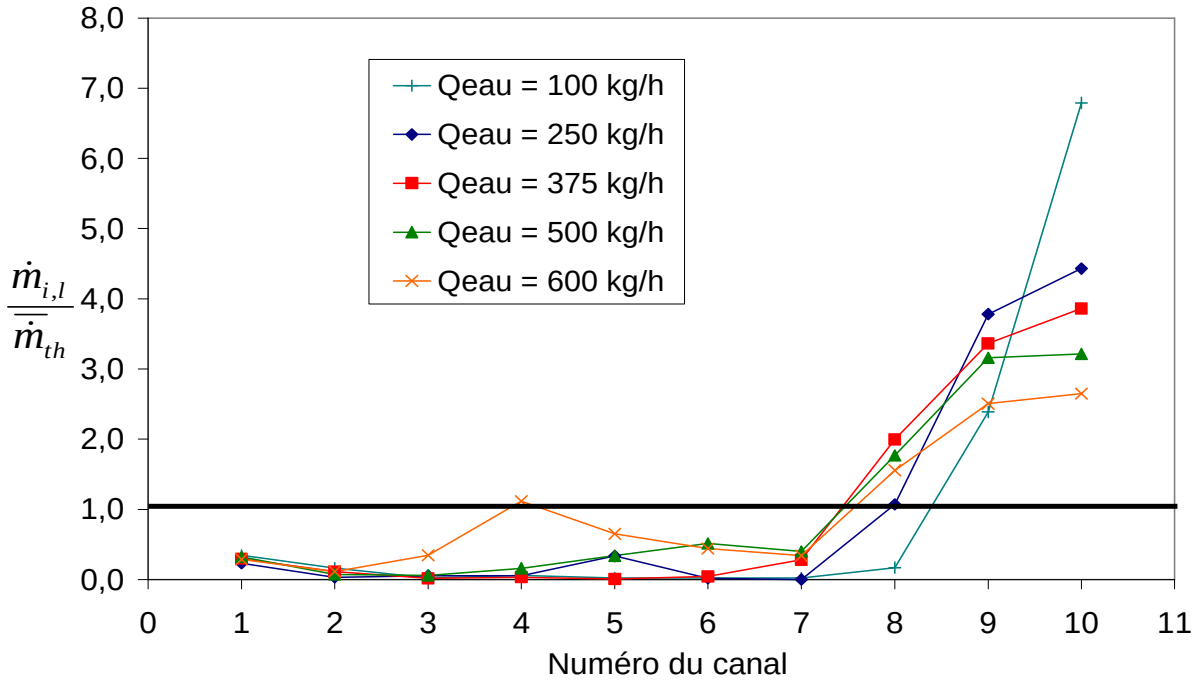


Figure IV- 44 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'eau pour la configuration 2.

Une plus grande zone du distributeur se retrouve alors noyée car toute l'eau ne peut plus s'écouler de la même façon que pour 100 kg/h. Les photos de la Figure IV- 45 représentent cette évolution.

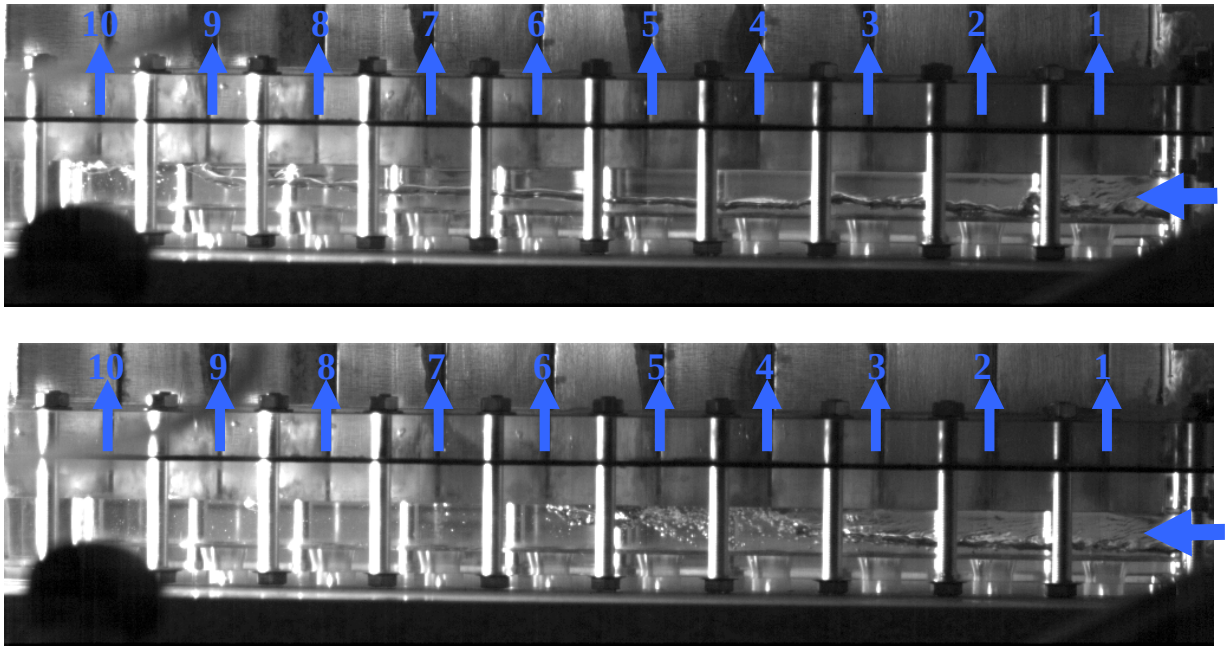


Figure IV- 45 : Photos de l'ensemble des canaux du distributeur pour la configuration 2 avec Q_{eau} = 100 kg/h (haut) et Q_{eau} = 600 kg/h (bas).

Sur la première photo, seuls les deux derniers canaux sont en contact avec cette zone noyée, alors que pour un débit de 600 kg/h, (photo du bas) six canaux sont en contact. Le profil de la distribution est alors complètement changé. Cependant, dans tous les cas, c'est un régime stratifié qui apparaît dans le distributeur.

L'ensemble de ces résultats de la phase liquide montre que pour une augmentation du débit d'eau à l'entrée, la distribution de cette phase tend à s'améliorer. Toutefois, cette amélioration se fait avec une amplitude plus ou moins importante en fonction du débit d'air. Cette amélioration se retrouvait également pour la configuration 0, sans l'utilisation des vannes. Le comportement observé pour ces configurations est donc validé par les précédents essais, ce qui montre encore une fois leur utilité.

La phase gazeuse est également influencée par la variation du débit d'eau en entrée. Sa distribution sur la Figure IV- 41 montre une phase assez bien répartie sur l'ensemble des canaux pour la configuration 1. La distribution liquide ne changeant pas beaucoup, il pourrait être attendu le même comportement pour l'air. La figure suivante montre alors son évolution en fonction du débit liquide arrivant dans la section d'essais.

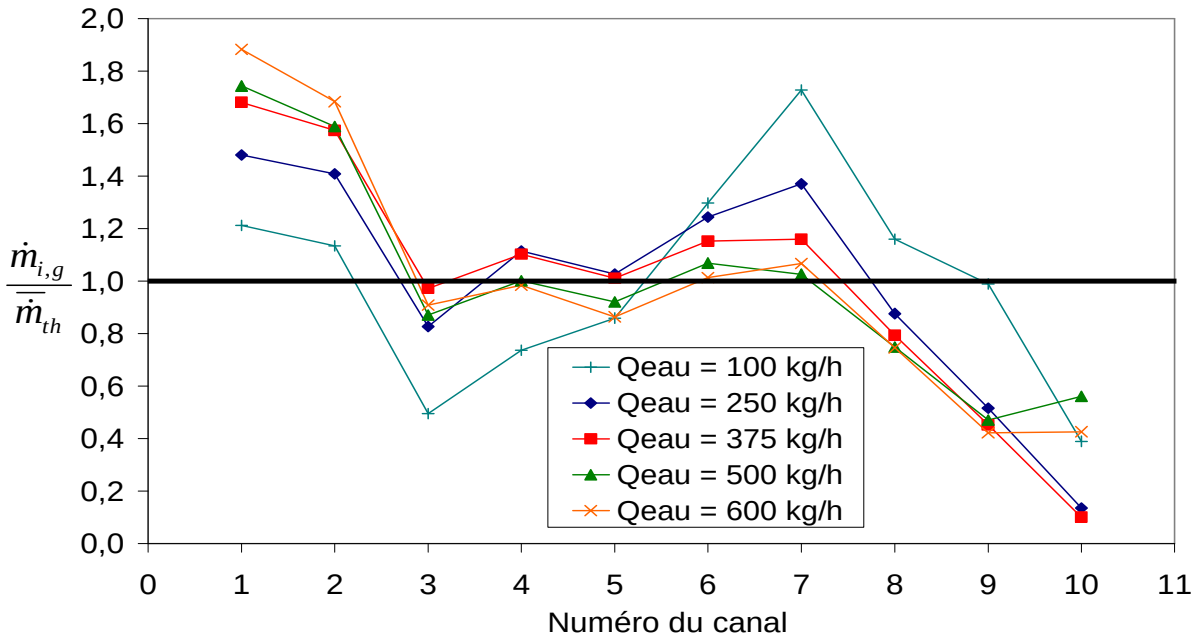


Figure IV- 46 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'eau pour la configuration 1.

Le profil de distribution gazeuse évolue de manière plus significative que celui de l'eau. La réduction du débit liquide tend à diminuer et à changer l'asymétrie de la distribution. Ceci est la conséquence du réglage du profil au débit d'eau maximum. En effet, un débit liquide plus faible permet au gaz de se propager plus loin dans le distributeur et de passer dans les canaux pour lesquels les vannes sont moins fermées. De ce fait, l'air passe moins dans les premiers canaux pour alimenter de plus en plus ceux situés en aval du distributeur. Les faibles changements des débits liquides dans les canaux du milieu expliquent aussi cette évolution.

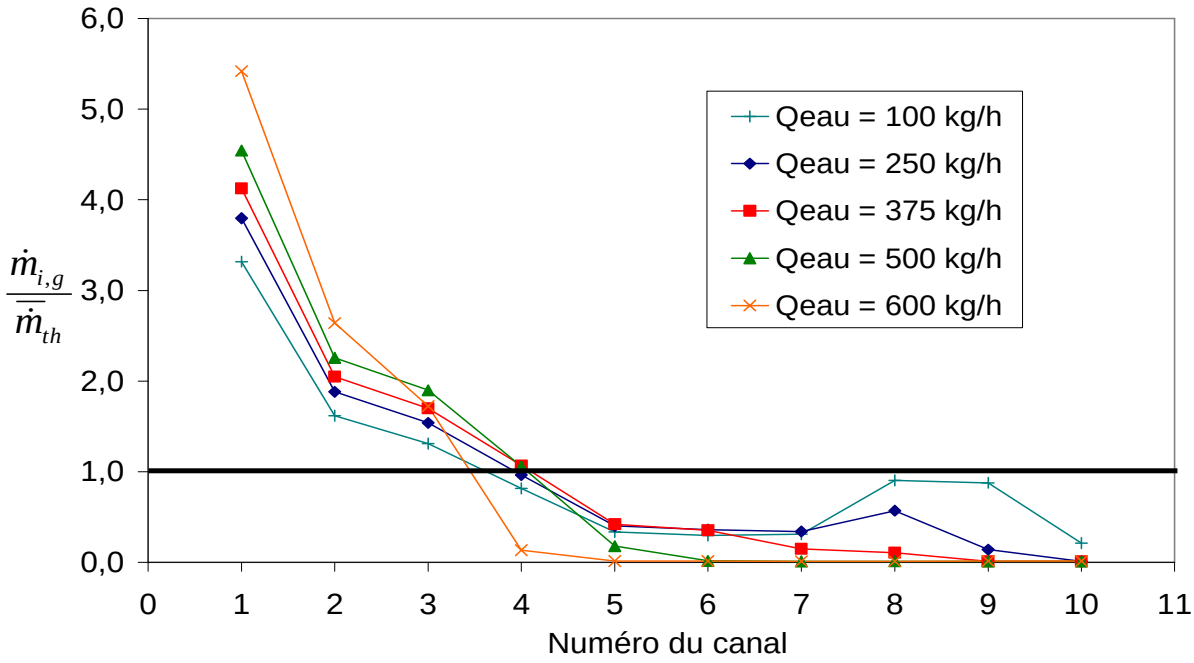


Figure IV- 47 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'eau pour la configuration 2.

Ce changement de tendance dans la distribution gazeuse n'est pas souhaité mais pour cette configuration de la section d'essais, c'est surtout la phase liquide qui est importante. C'est sur l'eau que les fontaines agissent et le fait d'avoir une plus grande partie du distributeur en régime stratifié est dans l'esprit de cette étude afin de voir l'effet des ultrasons sur une plus grande partie de l'échangeur.
L'effet de la variation du débit liquide sur la phase gazeuse est moins important pour un débit d'air de 30 kg/h comme montré sur la Figure IV- 47. Les mêmes tendances sont observées, à savoir une asymétrie moins prononcée pour des débits d'eau plus faibles, ce qui conduit alors à une meilleure distribution de cette phase. De plus, ces tendances sont similaires à celles étudiées avec la configuration 0. L'ajout de pertes de pression ne modifie donc pas l'influence du débit d'eau sur la répartition liquide ou gazeuse.

2.2.1.2. Influence du débit d'air.

L'étude de l'influence du débit d'air doit être faite pour une même configuration. Les précédents résultats ne peuvent pas être correctement comparés car ils correspondent à deux configurations différentes, qui n'ont pas les mêmes réglages des vannes. Il a alors été décidé pour la configuration 1 de faire varier le débit gazeux pour un débit liquide constant à 250 kg/h. L'influence de ce débit d'air sur la répartition des débits liquides est présentée sur la Figure IV- 48.
Cependant pour la configuration forcée, le canal qui présente l'alimentation en liquide la plus importante est le dernier. Aucun décalage ne peut donc s'effectuer et toute l'eau prélevée dans les précédents canaux est redirigée vers le dernier, ce qui augmente l'amplitude du ratio de celui-ci pour les forts débits d'airs. Les conséquences sur l'amélioration ou la dégradation de la distribution sont donc différentes mais les conséquences sur l'écoulement sont les mêmes. En effet, le « front » séparant la zone noyée de la zone stratifiée dans le distributeur se décale vers le fond de celui-ci lorsque le débit d'air augmente.

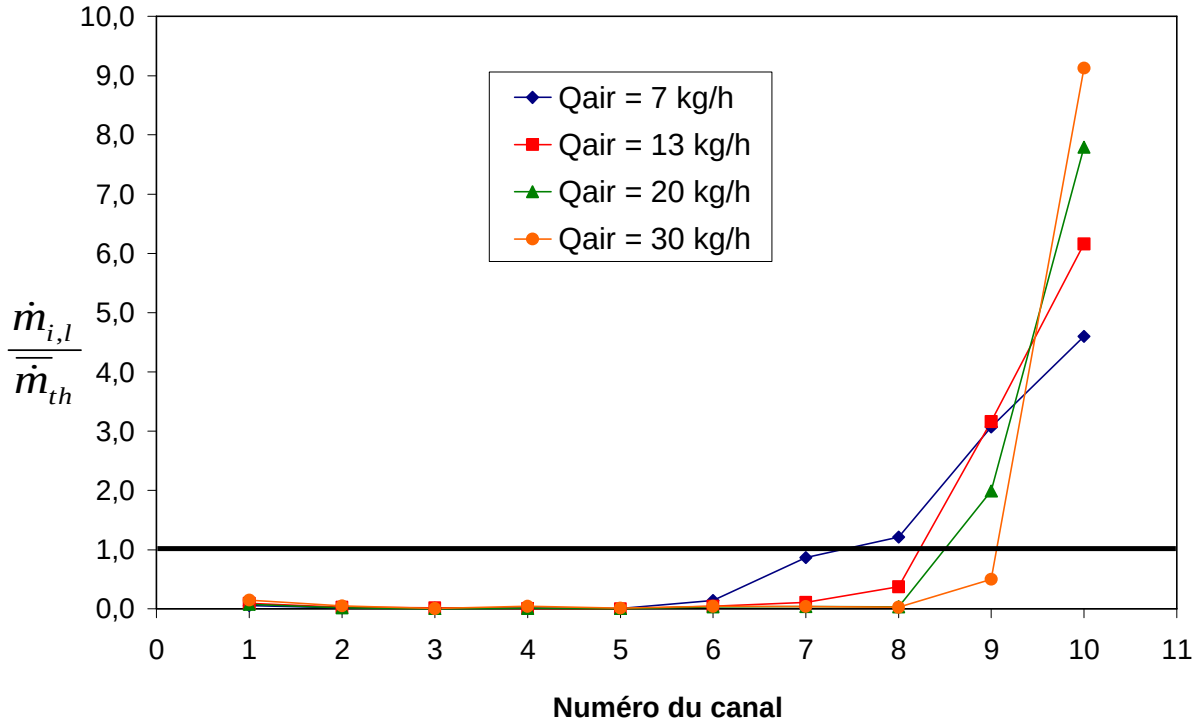


Figure IV- 48 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'air pour la configuration 1 avec un débit massique d'eau à Q_{eau} = 250 kg/h.

La phase gazeuse voit également sa distribution évoluer avec l'augmentation du débit d'air, cette évolution est également affectée par les réglages des vannes comme le montre la Figure IV- 49.

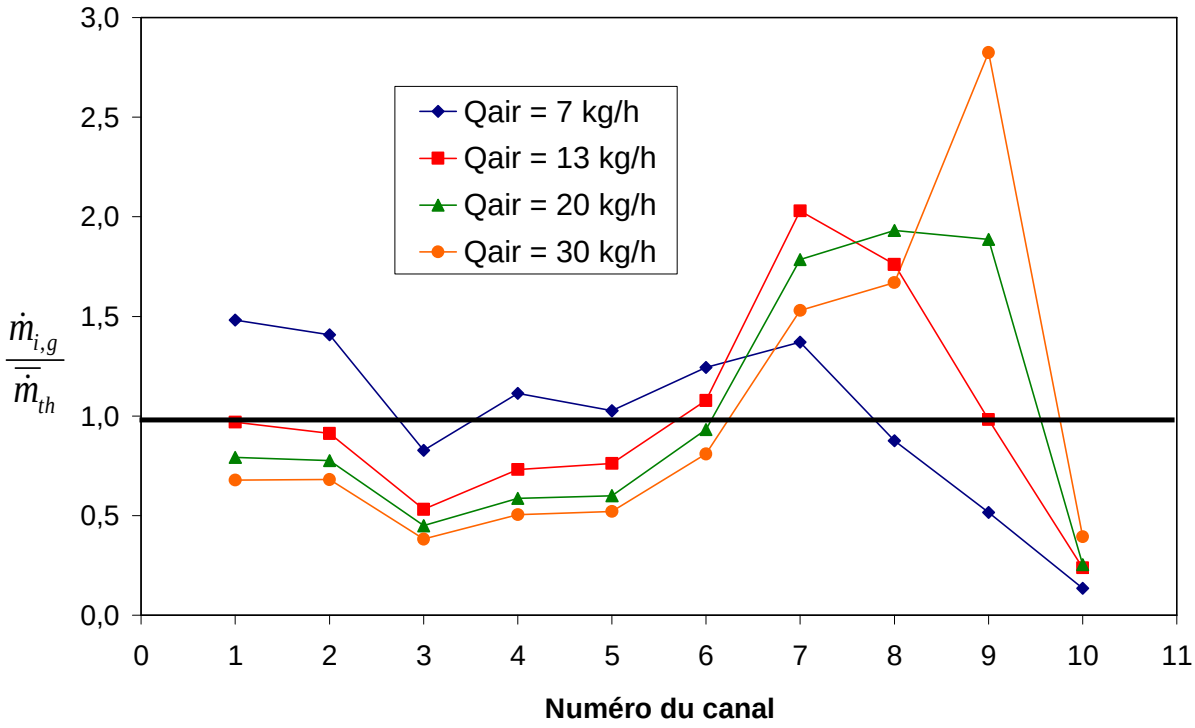


Figure IV- 49 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'air pour la configuration 1 avec un débit massique d'eau à Q_{eau} = 250 kg/h.

L’alimentation des derniers canaux, pour les deux phases, est plus importante lorsque le débit d’air augmente. De plus, comme les vannes sont moins fermées lorsque le canal considéré est proche du dixième, le gaz a donc tendance à plus alimenter ces derniers canaux qui sont alors dépourvu d’eau. De ce fait, un profil complètement différent se dégage pour la distribution de l’air. Plus le débit gazeux augmente, plus les derniers canaux sont alimentés. Les premiers canaux ne sont que légèrement influencés concernant leur ratio. Encore une fois, une certaine valeur limite est atteinte, cette valeur étant fonction du débit mais également du niveau de fermeture de la vanne en sortie du canal associé. Cette observation est également similaire à celle faite pour l’évolution de la distribution gazeuse en fonction du débit d’air à l’entrée dans la distribution 0. Cependant, comme la distribution est dépendante des pertes de pression dans les canaux, les configurations forcées donnent naissance à des répartitions des débits différentes de ce qui était analysé pour la configuration 0 (Figure IV- 3).
Les grandes tendances constatées avec les premiers résultats avec la configuration 0 se retrouvent donc avec les essais avec la distribution forcée. Cependant les résultats directs sur la distribution ne sont pas exactement les mêmes, suivant la fermeture partielle des vannes (et donc des pertes de pression) mais également suivant le placement du « front » dans le distributeur.

2.2.1.3. Approche statistique de la distribution.

Pour ces résultats, les différents coefficients mathématiques sont également calculés. Une analyse sur l’évolution du coefficient STD peut alors être faite en fonction des deux configurations mais également de la variation des paramètres opératoires que sont les débits d’eau et d’air.
Le graphique de la Figure IV- 50 présente les valeurs obtenues pour le coefficient STD de la phase liquide en fonction du débit d’eau pour les deux configurations. En configuration 1 le débit d’air est 7 kg/h et en configuration 2, 30 kg/h. Il faut rappeler que la comparaison entre les deux configurations des vannes doit être faite avec prudence car les réglages des vannes sont différents et donc les pertes de pression imposées ne sont pas les mêmes. Ceci pourrait être assimilé à deux échangeurs différents. De ce fait, même si les tendances peuvent être considérées comme bonnes, les amplitudes sont vraisemblablement dépendantes des degrés de fermeture des vannes.

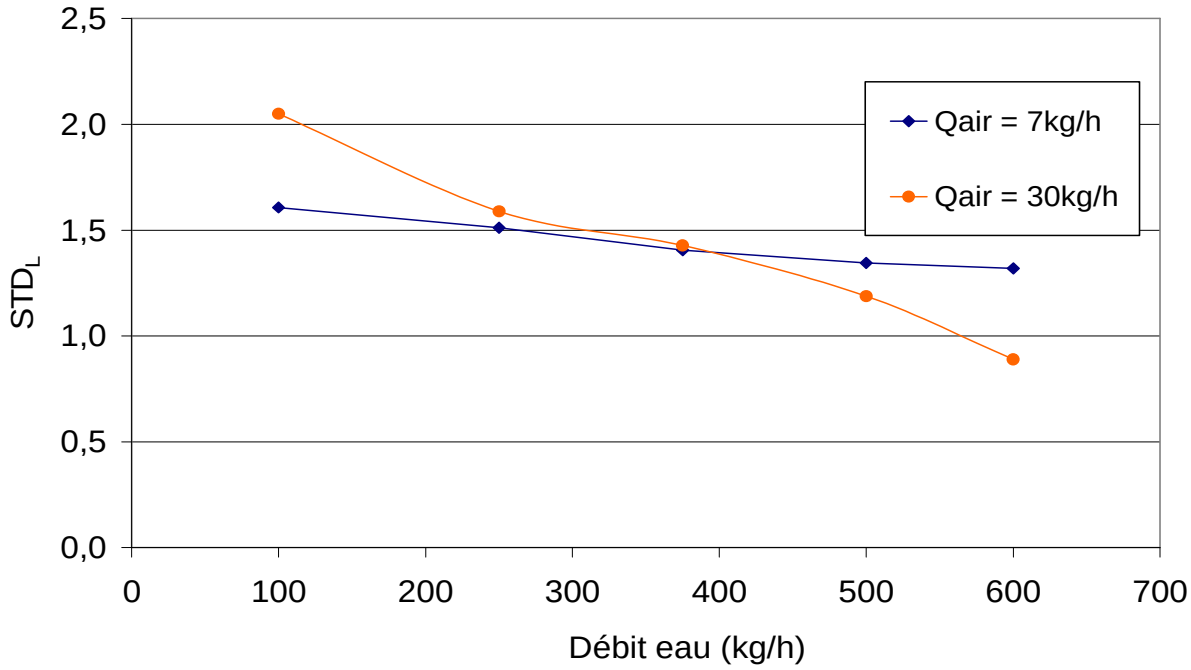


Figure IV- 50 : Évolution du STD_L en fonction du débit d'eau pour les configurations forcées.

De la même façon que pour la configuration 0, une diminution de la dispersion des ratios est observée lorsque le débit liquide augmente. Les phénomènes physiques en jeu ont déjà été expliqués précédemment, à savoir que l'augmentation du débit liquide permet d'avoir une plus grande partie du distributeur noyé. De ce fait, les canaux du milieu sont plus alimentés alors que le ratio des derniers diminue. Il faut bien sûr, faire encore une fois la différence avec les valeurs absolues des débits. En effet, en considérant ces valeurs absolues, le débit dans les derniers canaux augmente. Cependant, la distribution générale est améliorée avec l'augmentation du débit d'eau en entrée.

Une autre tendance peut être tirée de cette figure en comparant les deux courbes. La pente de la courbe correspondant à la configuration 2 est plus importante que celle de la configuration 1. Cette remarque se retrouvait sur l'analyse du coefficient STD_L pour la configuration 0 (Figure IV- 9). L'ajout de pertes de pression à l'aide des vannes ne semble donc pas influencer les tendances générales de la phase liquide. Cependant l'amplitude de la différence entre les deux configurations ne peut être comparée à celle observée avec les résultats sans usage des vannes.
L'étude de l'évolution du coefficient STD est également faite sur la phase gazeuse, dont les résultats sont présentés sur la Figure IV- 51.

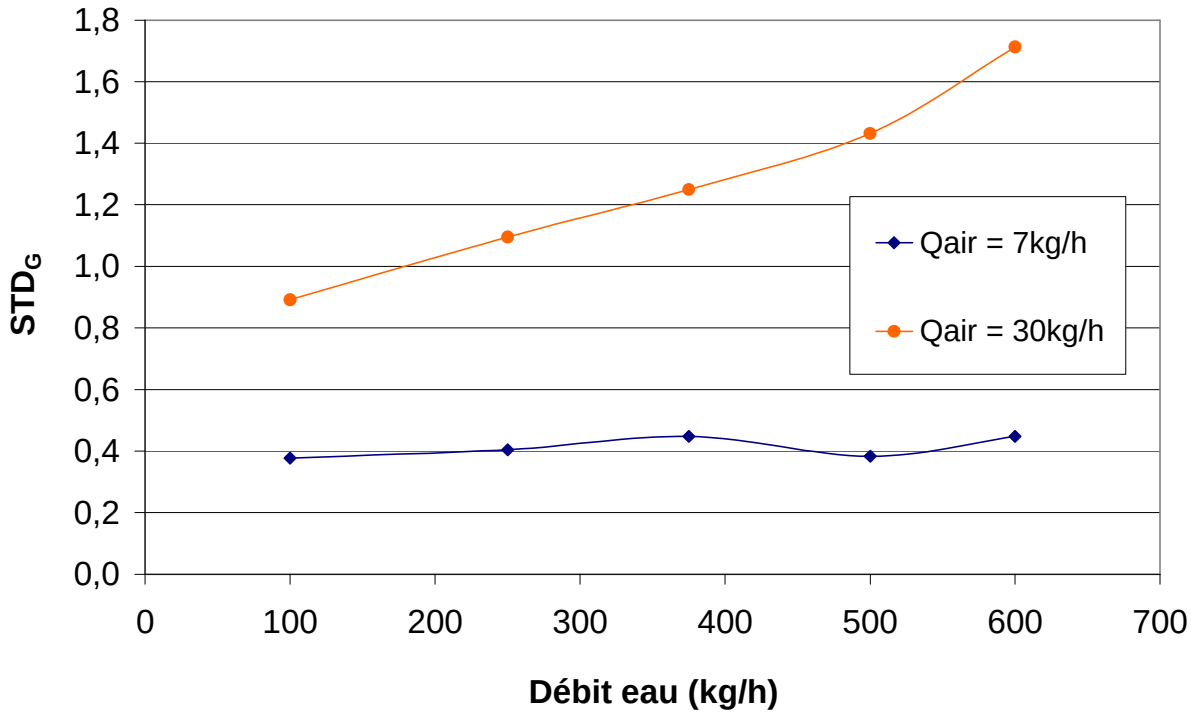


Figure IV- 51 : Évolution du STD_G en fonction du débit d'eau pour les configurations forcées.

Pour ce graphique, les tendances ne sont pas les mêmes suivant la configuration des vannes considérée. En prenant en compte la configuration 1, celle pour un débit d'air de 7kg/h, la dispersion des ratios n'est que très peu influencée par le changement du débit d'eau arrivant dans la section d'essais. Le coefficient STD_G reste même pratiquement constant entre 100 et 600 kg/h en débit d'eau. Cette observation semble concorder avec celles faites pour les résultats sans usage des vannes (Figure IV- 11).
Les remarques sont totalement différentes en ce qui concerne la configuration 2 des vannes, pour un débit d'air de 30 kg/h. En effet, lorsque le débit d'eau augmente, la dispersion de la phase gazeuse augmente. Ce comportement est complètement différent de celui observé pour les premiers résultats. Cependant il confirme les profils analysés sur la Figure IV- 47, plus le débit liquide est important, moins les canaux du milieu sont alimentés en air au profit des premiers. Comme expliqué précédemment, le « front » d'eau est plus avancé dans le distributeur pour des faibles débits, ce qui permet à l'air de mieux se répartir.
Les tendances sont donc différentes en fonction du débit d'air, ce qui peut être lié aux configurations des vannes pour lesquelles le débit d'air de 30 kg/h est plus sensible. De plus la distribution de base, celle pour laquelle la distribution a été réglée est beaucoup moins bonne pour le débit d'air important (STD_G = 1,25) que pour la configuration 1 (STD_G = 0,45). Les deux distributions de base n'étant pas les mêmes, les évolutions sont difficilement comparables. Les résultats obtenus correspondent à la meilleure répartition des débits liquides possibles sur la section d'essais. En effet, dans une optique thermique, c'est la distribution liquide qui revêt le plus d'importance, ce qui ne permet donc pas de régler précisément la distribution de la phase gazeuse.

L'étude de l'influence du débit gazeux sur la distribution des deux phases a été élargie par le biais des essais à 250 kg/h en eau et avec la configuration 1. Les résultats obtenus pour les deux phases sont présentés sur le graphique de la Figure IV- 52.

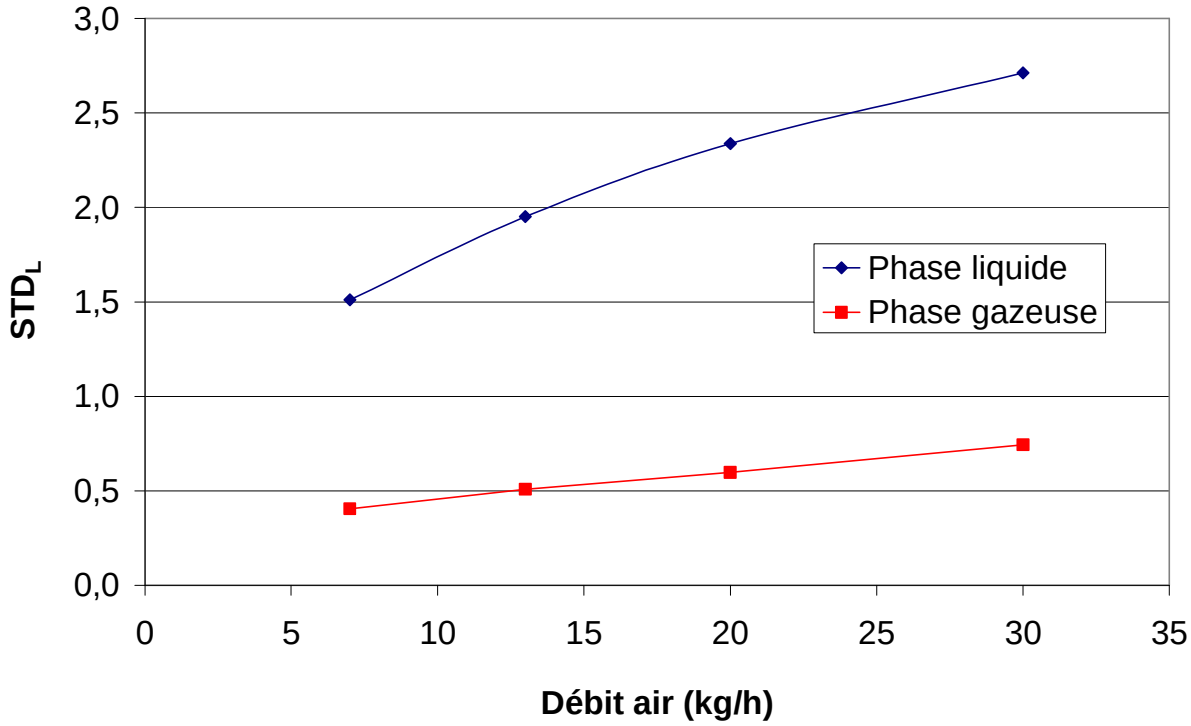


Figure IV- 52: Évolution des STD_k en fonction du débit d'air avec la configuration 1 avec un débit massique d'eau à Q_{eau} = 250 kg/h.

Les observations de cette figure sont en opposition à celles présentées pour la configuration 0 (Figure IV- 10 et Figure IV- 12). En effet, l'augmentation du débit d'air dégrade de manière significative la distribution des deux phases. Ceci est la conséquence des comportements observés sur les graphiques présentant les distributions. Les causes de ces évolutions ont été décrites précédemment et sont donc liées à la configuration 1, ce qui implique un profil de pertes de pression plus sensible aux valeurs du débit d'air dans cette configuration. Cette figure montre donc bien la nécessité d'avoir deux configurations pour étudier la distribution avec un faible et un fort débit. Il peut cependant être noté que la distribution gazeuse reste meilleure que la distribution liquide.

Dans l'ensemble, l'étude de ce coefficient STD montre des similitudes sur certaines tendances mais diffère sur certains points, notamment en rapport avec le débit d'air, liés à la fermeture plus ou moins prononcée des vannes. Les valeurs absolues de ces coefficients restent sensiblement les mêmes pour la phase liquide qu'avec la configuration 0 mais sont inférieures pour la phase gazeuse. En effet celle-ci a plus de possibilité d'alimentation dans ces deux configurations, alors que l'eau est repoussée au fond du distributeur, ce qui donne un cas sensiblement similaire à la configuration 0.

En poussant un peu plus l'analyse de ces coefficients STD et surtout leur évolution en fonction des paramètres opératoires, leur étude peut être faite par le biais de la densité de flux massique surfacique et du titre massique. Les résultats sont présentés respectivement sur les graphiques de la Figure IV- 53 et de la Figure IV- 54. Les tendances observées sont similaires à celles sans l'usage des vannes. En effet, plus la densité de flux massique surfacique augmente, plus le coefficient STD de la phase liquide diminue. De la même façon, plus le titre massique en entrée est important, plus la dispersion des ratios de la phase gazeuse va diminuer. Il faut néanmoins noter que pour le titre massique les courbes sont tracées pour un

débit d'air constant et non pour un débit d'eau constant afin de mieux correspondre aux essais réalisés.
Encore une fois, les tendances générales sont donc conservées avec ces modifications. Cependant, l'usage des vannes pour générer une distribution forcée semble favoriser un régime d'écoulement davantage stratifié qu'avec la distribution initiale. La création des fontaines ultrasonores est a priori facilitée au sein d'un écoulement stratifié. Les comportements de la distribution en fonction de ces paramètres opératoires confirment donc l'utilité et la validité de ces essais.

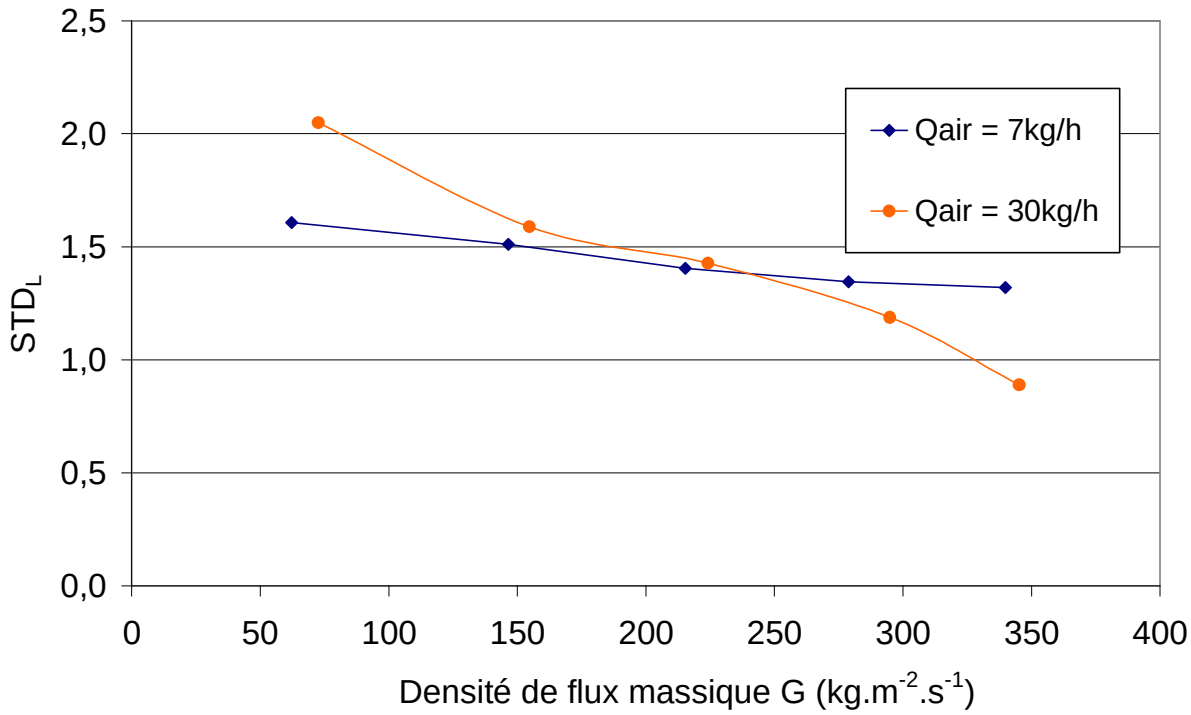


Figure IV- 53 : Évolution du STD_L en fonction de la densité de flux massique en configuration forcée.

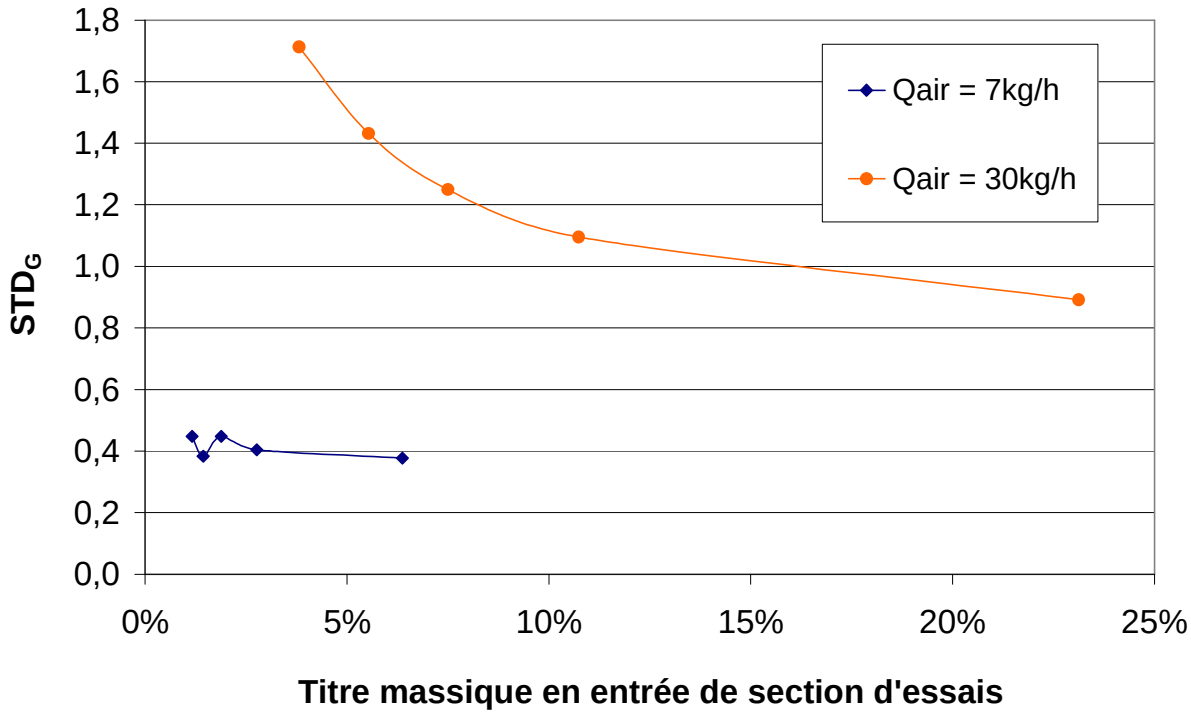


Figure IV- 54 : Évolution du STD_G en fonction du titre massique en configuration forcée.

Un dernier point est étudié sans l'introduction des ultrasons : l'asymétrie de la distribution à l'aide du coefficient associé S_k. Cet aspect de la distribution a déjà été évoqué lors de l'étude des profils de distribution, cependant, les graphiques suivants permettent de mieux synthétiser l'ensemble des résultats.
La Figure IV- 55 présente les résultats du coefficient d'asymétrie pour les essais à débit d'air constant pour les deux configurations.

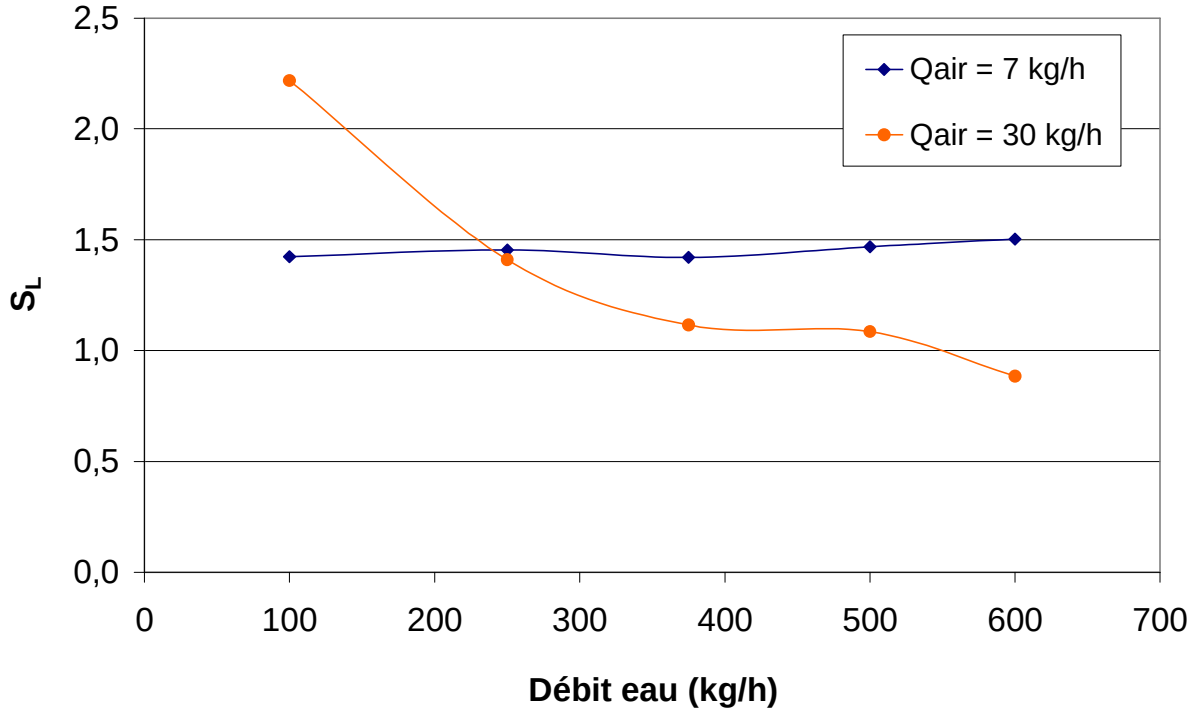


Figure IV- 55 : Évolution du coefficient S_k pour la phase liquide en fonction du débit de celle-ci pour les configurations forcées.

Les deux courbes exposent deux tendances opposées : pour la configuration à faible débit d'air, le coefficient d'asymétrie est faiblement influencé par le débit d'eau En effet, comme observé précédemment, la distribution liquide n'est pas vraiment affectée par les variations du débit liquide, une alimentation plus importante d'un canal (le septième) permet cette croissance du coefficient S_L. La seconde courbe correspondant à la configuration à fort débit en air présente une tendance contraire : le coefficient diminue avec l'augmentation du débit d'eau. Cette constatation, observée sur les profils de distribution, est due à l'alimentation des derniers canaux qui diminue (en termes de ratio) au profit de ceux situés au milieu du distributeur. Les comportements de l'évolution de ce coefficient sont similaires à ceux observés pour le STD. En effet, l'influence du débit liquide est faible pour la première configuration et est plus importante pour la seconde. Cependant, en comparant avec les résultats où les vannes n'étaient pas utilisées, la configuration 1 présente une tendance différente (Figure IV- 16). Bien que l'ampleur de l'effet du débit liquide soit également moins prononcée à faible débit d'air, pour les premiers résultats, l'augmentation du débit d'eau faisait diminuer l'asymétrie. Pour la configuration 2, les mêmes tendances avec et sans usage des vannes sont visualisées.

L'asymétrie de la phase gazeuse est analysée sur la Figure IV- 56. Celle-ci présente l'évolution de S_G en fonction du débit d'eau également et pour les deux configurations de vannes. Des comportements très différents de ce qui a été analysé jusqu'à présent sont observés sur cette figure, notamment pour la configuration 1. En effet, pour ces conditions, aucune tendance nette ne se dégage de ces résultats.

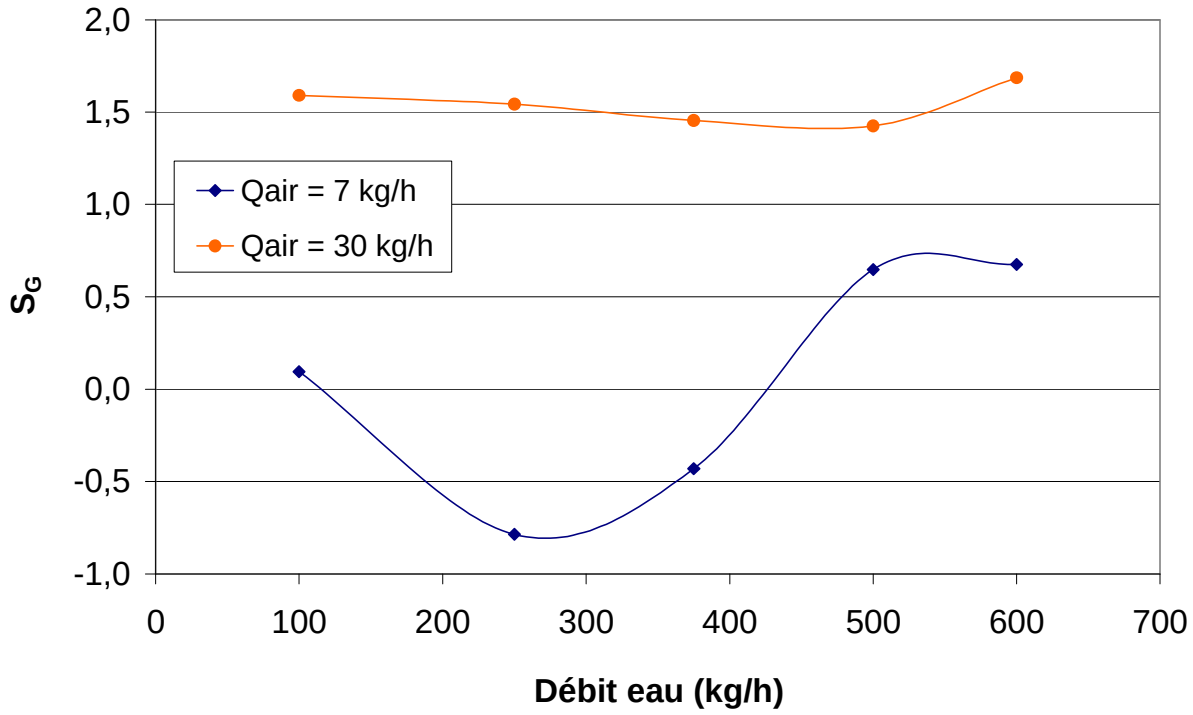


Figure IV- 56 : Évolution du coefficient S_G en fonction du débit de gaz pour les configurations forcées.

Ce comportement est lié à l'inversion de la distribution qui s'opère sur la répartition des débits d'air lorsque le débit massique d'eau augmente. En effet, pour le plus faible débit liquide, la distribution gazeuse est déformée par rapport à celle créée initialement avec les vannes. Elle est pratiquement symétrique, sans pour autant être bonne, en alimentant fortement les derniers canaux et faiblement les premiers. L'accroissement du débit liquide va

forcer l'eau à s'accumuler au fond du distributeur, empêchant l'air de pénétrer dans ces derniers canaux. Une transition vers une distribution « typique » s'effectue alors, ce qui provoque cette évolution du coefficient d'asymétrie. Le comportement de ce même coefficient pour la configuration correspondant à un débit gazeux plus élevé, présente lui aussi une courbe avec un minimum. Cependant l'amplitude est moindre. Cette réaction est également due au passage de l'air dans les derniers canaux pour les plus faibles débits liquide.

Les résultats des essais avec un débit liquide constant et égal à 250 kg/h sont également présentés sur la Figure IV- 57. Pour ces conditions, de la même façon que pour l'étude du coefficient STD, les deux phases sont réunies sur le même graphique. Les tendances sont similaires à celles observés pour le premier, à savoir le STD. En effet, l'asymétrie augmente avec le débit gazeux entrant dans la section d'essais. La distribution est donc bien détériorée avec l'accroissement du débit d'air, quel que soit le coefficient étudié. Ceci est la conséquence de la configuration des vannes qui, comme expliqué précédemment, est spécifique à un débit d'air. En changeant le débit gazeux, le titre augmente d'une manière non négligeable ce qui permet à l'air de remplir une plus grande partie du distributeur. Les vannes étant de moins en moins fermées du début à l'extrémité du distributeur, les pertes de pression sont moindres et donc l'air a plus de facilité à s'engouffrer dans ces canaux. La distribution est donc dégradée avec l'augmentation du débit gazeux à l'entrée de l'échangeur.

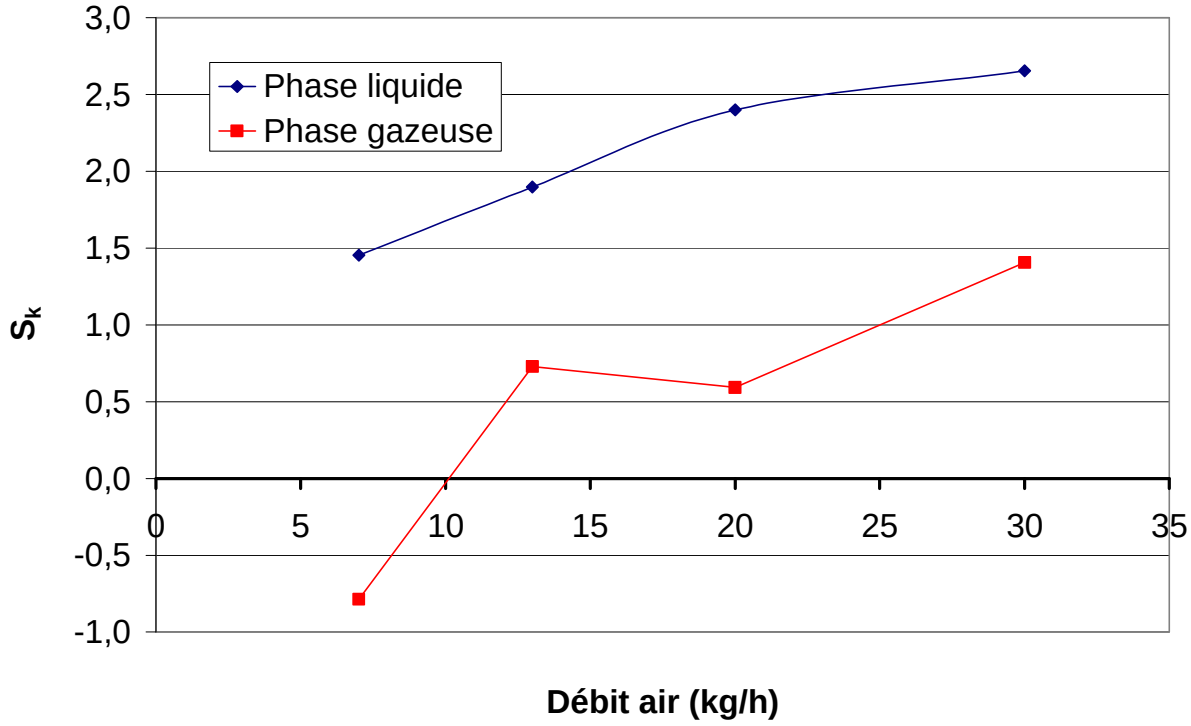


Figure IV- 57 : Évolution des S_k en fonction du débit d'air avec la configuration 1 avec un débit massique d'eau à Q_{eau} = 250 kg/h.

Le dernier point étudié pour ces résultats sans ultrasons concerne la distribution du titre massique dans l'ensemble des dix canaux de la section d'essais. Les résultats à débit d'air constant et également à débit d'eau constant sont exposés sur la Figure IV- 58.

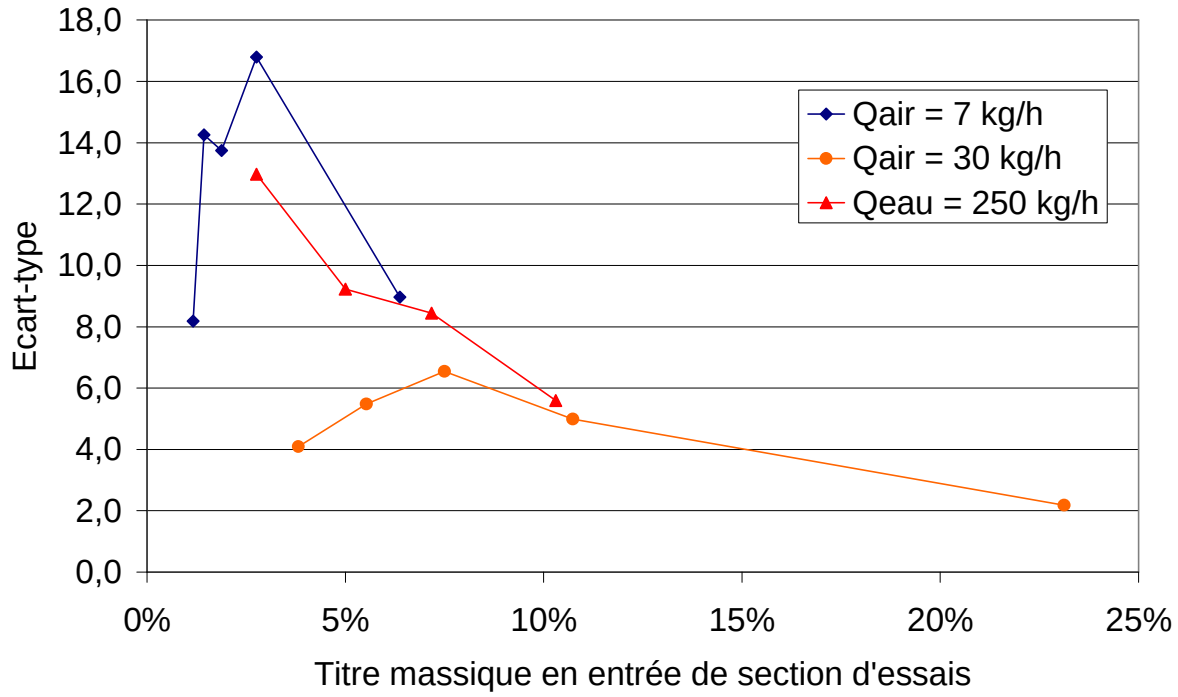


Figure IV- 58 : Évolution de l'écart-type de la distribution du titre dans les canaux en fonction du titre en entrée de distributeur pour les configurations forcées 1 et 2.

La répartition du titre à tendance à être moins bonne pour un débit liquide constant et à faible titre massique à l'entrée du distributeur. La dégradation est donc associée à la diminution du débit d'air. Pour les débits d'air à 7 kg/h et 30 kg/h, un maximum apparaît. Pour un débit d'air constant, il n'est donc pas possible d'avoir une seule tendance en fonction du titre massique. Ces observations sont similaires à celles faites lorsque les vannes en sortie des canaux n'étaient pas modifiées mais il faut cependant noter qu'il y a moins de variations car le nombre de canaux alimentés ne change pas. Les comportements restent donc les mêmes en fonction des paramètres opératoires. Cependant, la pente de ces courbes est plus importante dans les cas de distribution forcée. Cette différence est notamment due à la distribution gazeuse qui est plus sensible aux variations du débit liquide dans les derniers résultats que les premiers.

En conclusion, les meilleures distributions diphasiques semblent être obtenues pour les titres massiques les plus forts, mais également les densités de flux massique importantes. Ces remarques sont encore une fois en accord avec celles préalablement faites pour la configuration 0.

2.2.2. Avec ultrasons.

2.2.2.1. Conditions d'essais.

Ces essais ont été réalisés dans le but d'avoir une plus grande partie du distributeur en écoulement stratifié, ce qui pourrait permettre aux ultrasons d'avoir une influence plus importante sur la distribution. Les résultats avec les ultrasons sont étudiés dans cette partie. Différentes combinaisons ont été testées afin de mieux analyser le comportement des ultrasons et leur influence dans l'écoulement diphasique. Pour faire cette étude, cinq configurations différentes des ultrasons ont été mises en œuvre :

- La première est celle précédemment analysée, à savoir tous les transducteurs activés (X), cela permet d'observer les effets pour la puissance ultrasonore maximale.

- La deuxième configuration correspond aux cinq premiers générateurs d'ultrasons activés (5p), afin d'observer si la déstructuration de l'écoulement se propage même sans ultrasons au fond du distributeur. Cela permet également de vérifier si la déstructuration de l'écoulement est la cause principale du changement de la distribution.

- La troisième complète la précédente, en effet, seuls les cinq derniers appareils sont en marche (5d). Ces essais sont surtout faits pour compléter la deuxième configuration, mais aussi pour voir si les mêmes résultats sont obtenus sur ces derniers canaux par rapport au premier cas.

- Les deux dernières dispositions sont similaires car elles consistent à activer un générateur d'ultrasons sur deux. La quatrième disposition correspond alors au cas où les appareils faisant face aux canaux impairs sont (Im), alors que la cinquième coïncide avec les pairs (Pa).

Ces essais n'ont pas été réalisés pour toutes les conditions opératoires, le Tableau IV- 3 permet de répertorier pour quelles conditions, quelles configurations ont été étudiées.

Tableau IV- 3 : Conditions opératoires pour les différentes configurations des ultrasons.

		Q_{air} (kg.h^{-1})			
		7	13	20	30
Q_{eau} (kg.h^{-1})	100	X, 5p, Im et Pa			X, 5p et 5d
	250	X, 5p, Im et Pa	X, 5p, Im et Pa	X, 5p, Im et Pa	X, 5p, Im et Pa et X, 5p et 5d
	375	X, 5p, Im et Pa			X, 5p et 5d
	500	X, 5p, Im et Pa			X, 5p et 5d
	600	X, 5p, Im et Pa			X, 5p et 5d

De la même façon que pour le Tableau IV- 2 les indications en rouge correspondent à la configuration 2 alors que celles en noir indiquent la configuration 1.

2.2.2.2. Influence du débit d'eau.

Pour commencer, l'étude avec l'ensemble des générateurs d'ultrasons activés sera décrite, les autres configurations, avec une activation de certains générateurs, seront étudiées par la suite. La Figure IV- 59 montre l'évolution des profils de distribution avec ultrasons pour la configuration 1.

La distribution liquide pour un débit d'air constant de 7 kg/h avec les ultrasons n'est pas fortement influencée par les variations du débit d'eau. C'est donc la même observation que celle sans ultrasons (Figure IV- 42). La technologie rajoutée ne modifie pas l'influence du débit liquide dans cette configuration des vannes. Cependant, la différence principale réside au niveau des premiers canaux et des canaux intermédiaires pour lesquels un débit d'eau est mesuré. Les ultrasons permettent donc de changer la distribution. Néanmoins, à partir d'un

débit liquide de 375 kg/h en entrée, l'augmentation du débit ne change plus significativement la distribution.

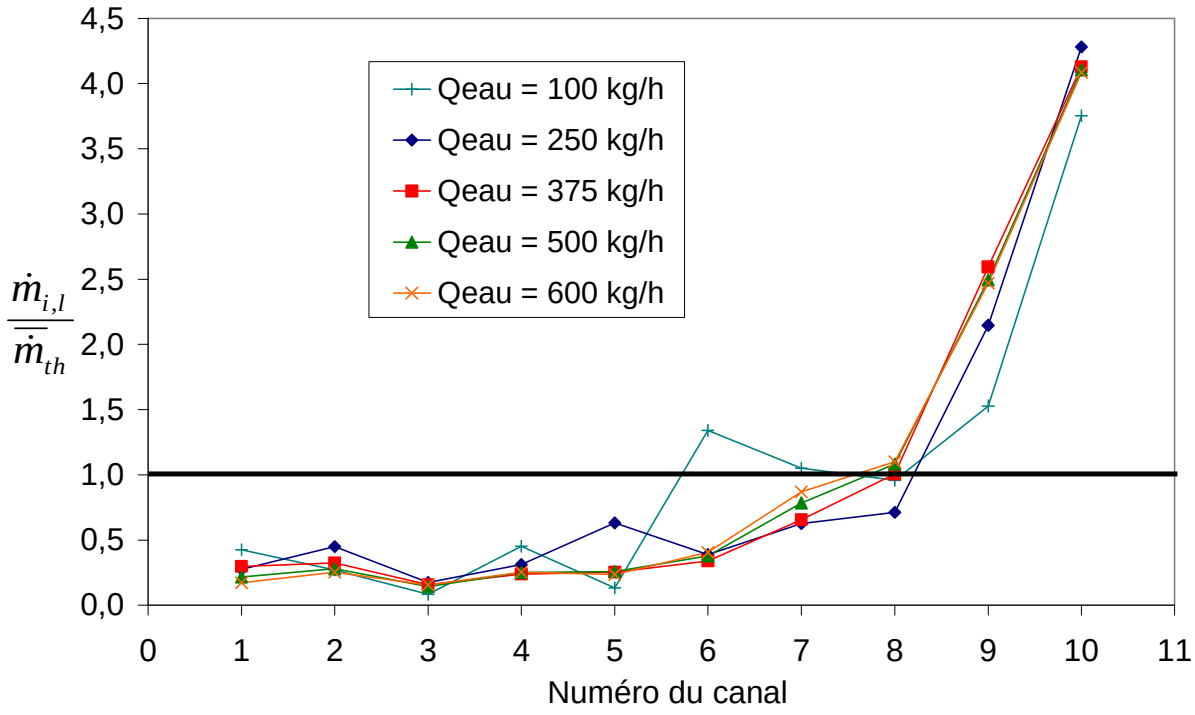


Figure IV- 59 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'eau pour la configuration 1 avec les ultrasons.

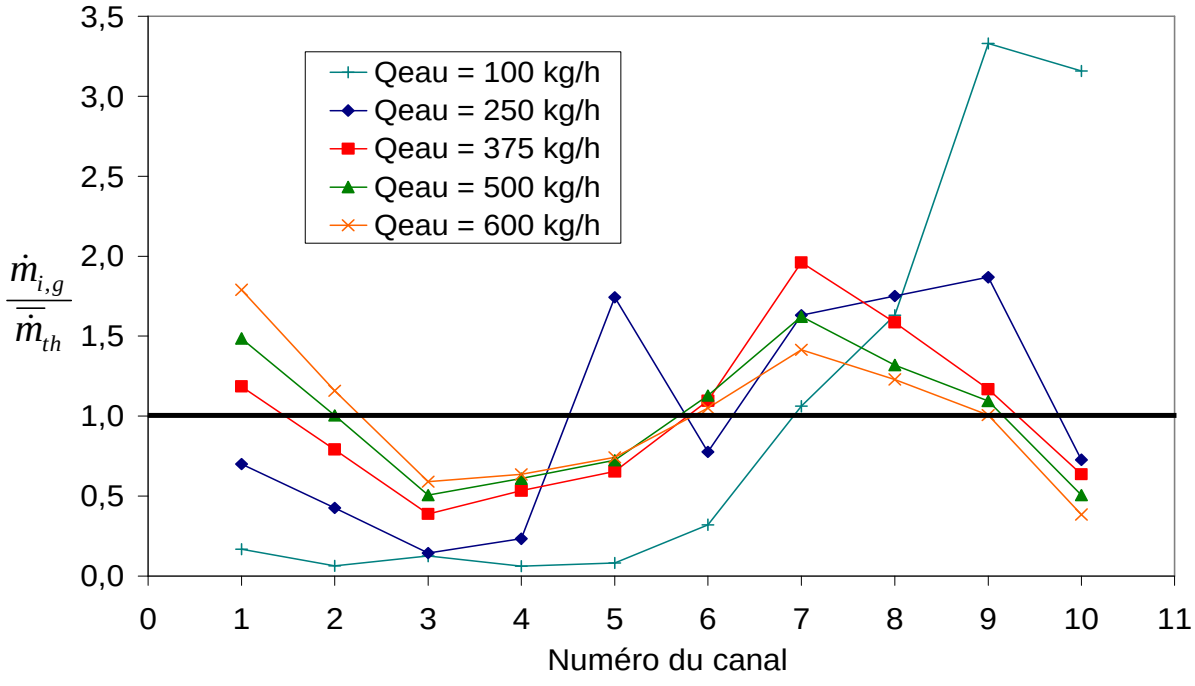


Figure IV- 60 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'eau pour la configuration 1 avec les ultrasons.

La distribution de la phase gazeuse est quant à elle beaucoup plus perturbée par les variations du débit liquide entrant. La Figure IV- 60 illustre ces propos en montrant les résultats obtenus dans la même configuration 1 pour différents débits massiques d'eau. Les variations de la

répartition des débits gazeux sont plus importantes que lorsqu'il n'y a pas les ultrasons (Figure IV- 46). Le sens de tendance reste le même, à savoir une diminution du débit d'air dans les derniers canaux et une augmentation dans les premiers. Cependant, l'amplitude de ces changements est plus grande avec les ultrasons. Dans le cas du plus faible débit en eau, cette phase est même distribuée dans la deuxième partie du distributeur. Ceci est à l'inverse du profil de base souhaité. Les ultrasons pour la phase gazeuse ne changent pas les tendances en fonction du débit liquide mais amplifie les différences entre chaque cas étudié.

Ces études permettent de voir le comportement général de la distribution en fonction du débit liquide. La comparaison entre un essai sans et un essai avec ultrasons est effectuée à l'aide de la Figure IV- 61. Les conditions pour cet essai correspondent à un débit massique en eau de 375 kg/h et en air de 7 kg/h.

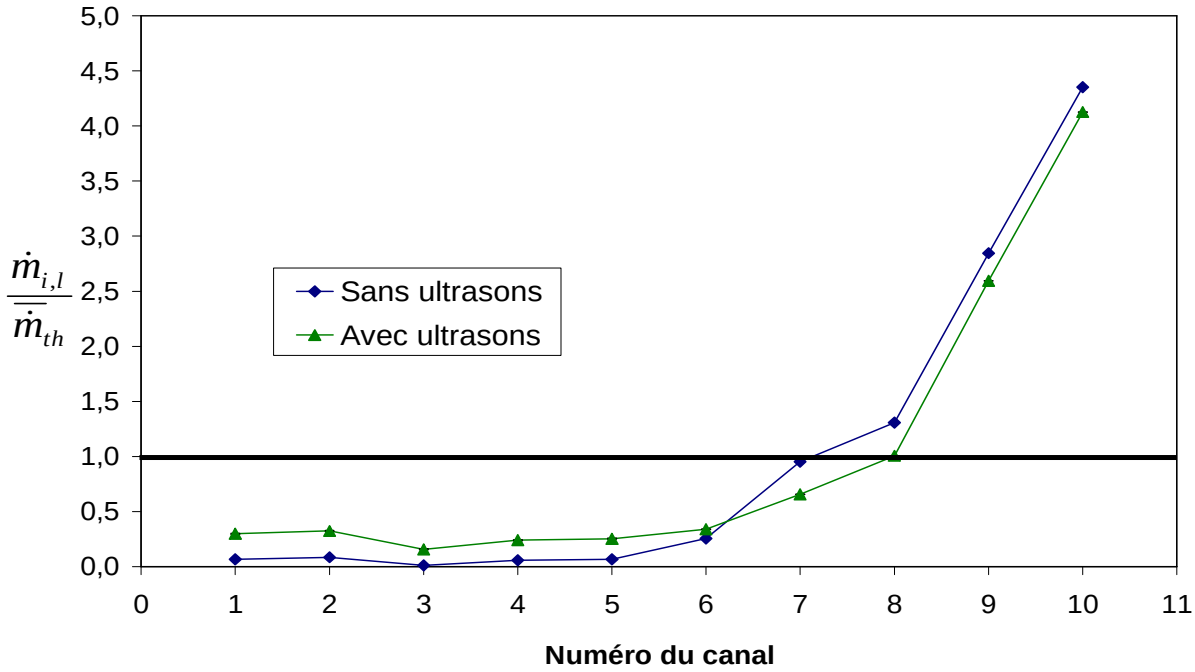


Figure IV- 61 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 375 kg/h et Q_{air} = 7 kg/h pour la configuration 1.

L'ensemble des canaux de la première partie du distributeur qui, sans ultrasons, ne sont pas alimentés, le deviennent lorsque les ultrasons sont ajoutés. Cette augmentation correspond à un ratio supplémentaire de 0,25 environ, ce qui correspond à un débit massique de 10 kg/h. Cet accroissement du débit dans les premiers canaux se ressent alors sur la deuxième partie du distributeur, où le débit passant dans les canaux diminue. Cet effet se fait ressentir même pour les canaux avec un débit correspondant à celui pour une distribution homogène tel que le septième canal. Les fontaines semblent donc jouer un rôle jusqu'au sixième canal, ensuite les changements observés sont la conséquence des variations en amont.
Cette limite semble liée au débit initial passant dans le canal. En effet, en prenant en exemple le sixième canal, celui-ci ne voit pas son débit varier énormément avec les ultrasons, la valeur du débit sans ultrasons étant sensiblement proche de la valeur du débit dans les canaux précédents avec les ultrasons. Le canal suivant, le septième présente un ratio de 1 qui est supérieur aux précédents, les ultrasons ne peuvent donc pas maintenir cette valeur avec les prélèvements en amont. La même observation est également faite pour les trois derniers canaux. Cette diminution du canal 7 est néanmoins dépendante du débit d'eau entrant. En effet, la diminution est moins importante pour les plus forts débits. La comparaison de la Figure IV- 59 avec la Figure IV- 42 permet de faire cette observation.

L'effet des ultrasons sur la phase gazeuse est également observé sur la Figure IV- 62 qui expose dans les mêmes conditions que le graphique précédent, la distribution de l'air avec et sans ultrasons.

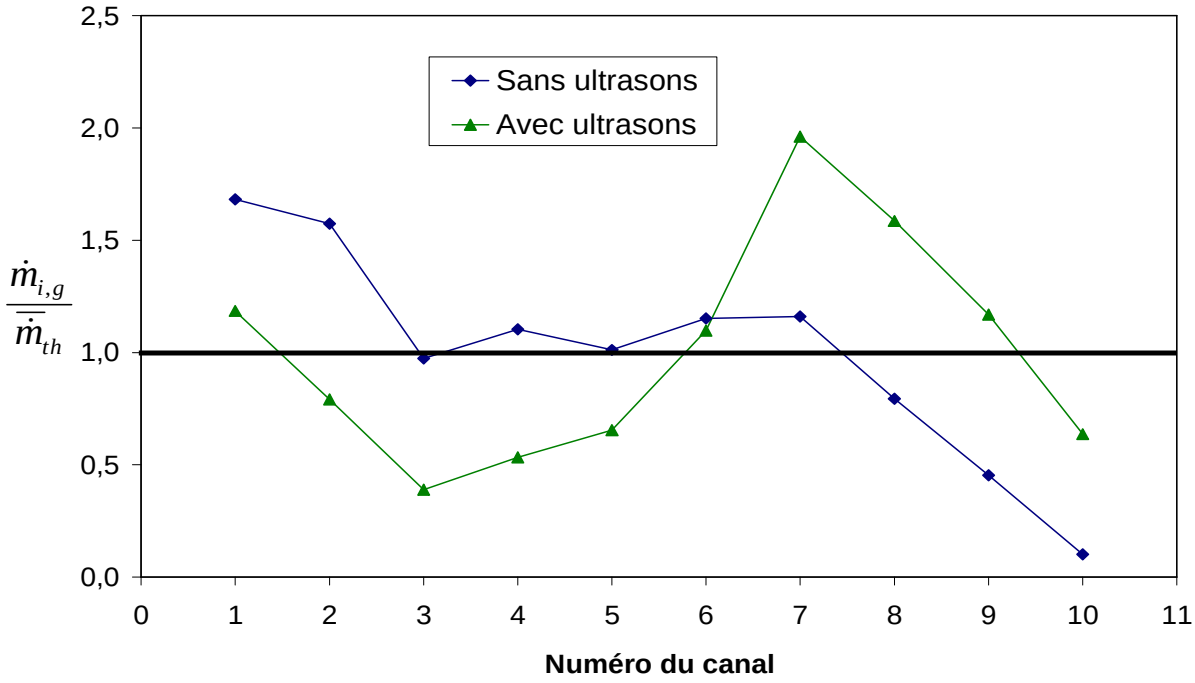


Figure IV- 62 : Distribution gazeuse avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 375 kg/h et Q_{air} = 7 kg/h pour la configuration 1.

La distribution est plus fortement influencée par l'utilisation des ultrasons. La phase gazeuse était déjà significativement affectée par les changements de débits liquides entrant dans la section d'essais (Figure IV- 46). Pour cet exemple, la répartition des débits s'inverse même avec les ultrasons, en effet, les derniers canaux sont plus alimentés en air que les premiers. Ceci est la conséquence de l'alimentation plus importante des premiers canaux en liquide. De ce fait, l'air est forcé de passer dans les canaux en aval pour garder l'équilibre des pertes de pression. Il est notamment intéressant de noter que le canal correspondant au « pivot » de la distribution de l'air est le même que pour l'eau, à savoir le sixième canal.
Les fontaines agissent peut être directement sur les débits d'eau mais elles agissent également indirectement sur les débits de gaz dans les canaux. La différence avec et sans ultrasons est plus importante lorsque le débit liquide est faible, l'augmentation de ce débit d'eau va diminuer l'impact des ultrasons sur la phase gazeuse. Ces conséquences sont valables pour un débit d'air de 7 kg/h et la configuration 1. Il faut alors voir ce que les tendances deviennent pour un débit d'air plus important avec la seconde configuration des vannes.

Les différents profils de distribution liquide obtenus avec tous les générateurs d'ultrasons activés, pour la configuration 2 sont présentés sur la Figure IV- 63.

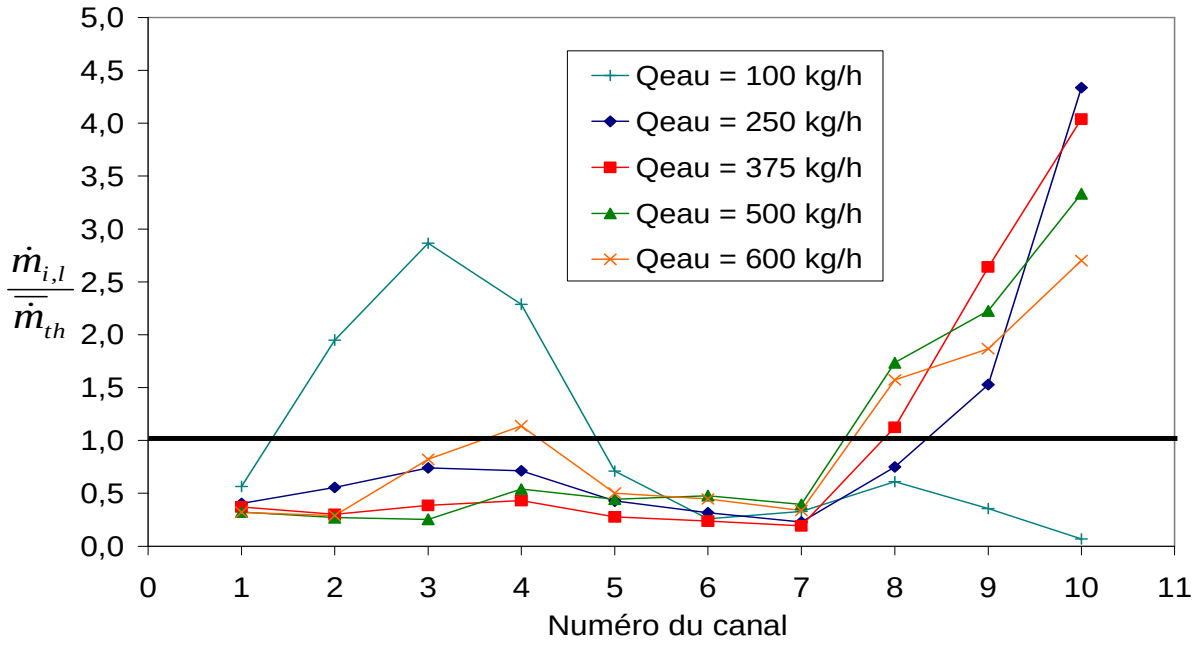


Figure IV- 63 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'eau pour la configuration 2 avec les ultrasons.

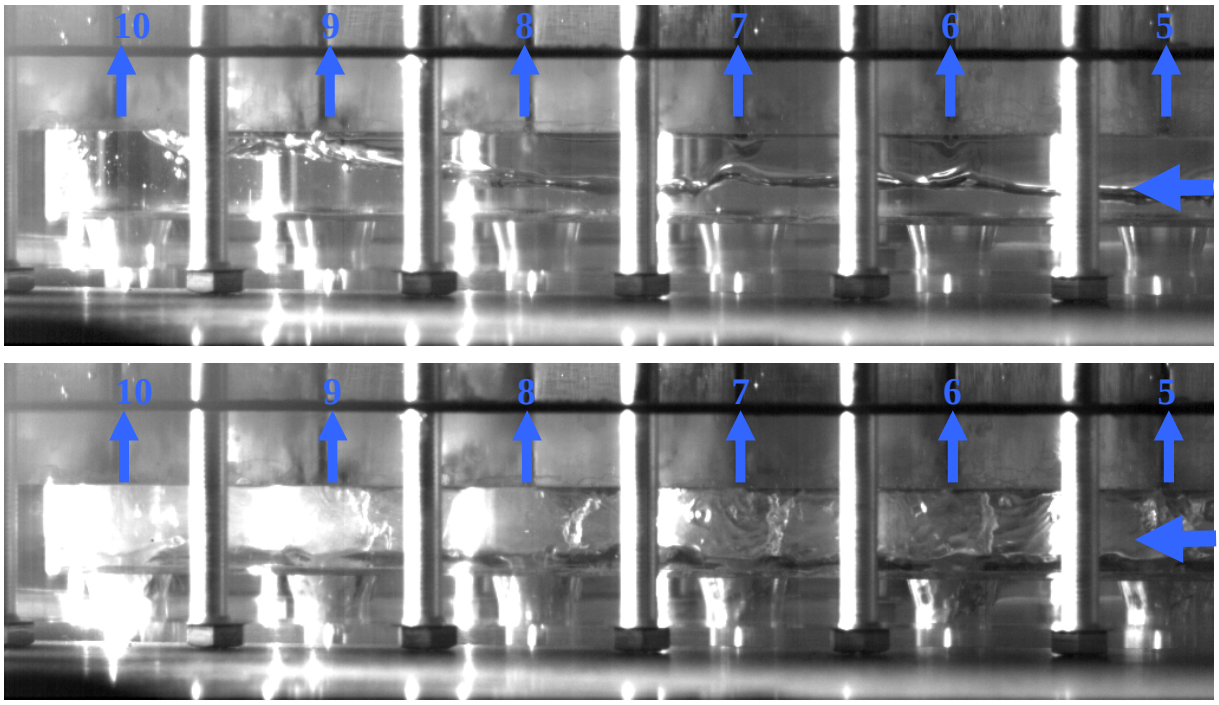


Figure IV- 64 : Photo du fond du distributeur pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 30 kg/h pour la configuration 2 sans ultrasons (haut) et avec les ultrasons (bas).

Comme le montraient déjà les profils sans ultrasons (Figure IV- 44), la distribution liquide avec les ultrasons est significativement affectée par la variation de son débit, et l'amplitude des variations est plus importante dans ce cas. Cependant, la tendance reste la même, plus le débit est important, plus la distribution semble homogène et inversement, moins le débit est fort, plus la distribution est déséquilibrée. L'exemple à 100 kg/h montre bien un déséquilibre complet de la distribution car c'est dans la première partie du distributeur que les canaux sont le plus alimentés, les derniers étant sous-alimentés. Cela ne veut pas pour autant dire que la distribution est plus mauvaise. Les ultrasons ont donc une influence très prononcée pour le

plus faible débit liquide. Ce cas est particulier, car c'est le seul où aucune zone noyée n'est présente dans le distributeur. Une image de la visualisation est faite sur la Figure IV- 64. De plus une comparaison entre les deux distributions liquides est faite sur la Figure IV- 66. Sur ces photos, le distributeur semble complètement dépourvu de son eau au niveau des derniers canaux avec les ultrasons, contrairement au cas sans. Les seules fontaines vraiment formées, le sont par les quatre premiers générateurs (Figure IV- 65). Ceux du milieu du distributeur forment un jet moins grand sur le bord du « puits » dans lequel ils sont insérés, et les derniers ne produisent pas de fontaine aussi développée car il n'y a quasiment pas d'eau dans ces cavités. L'alimentation en eau se concentre donc dans les cinq premiers canaux car les fontaines consomment pratiquement toute l'eau entrant dans la section d'essais.

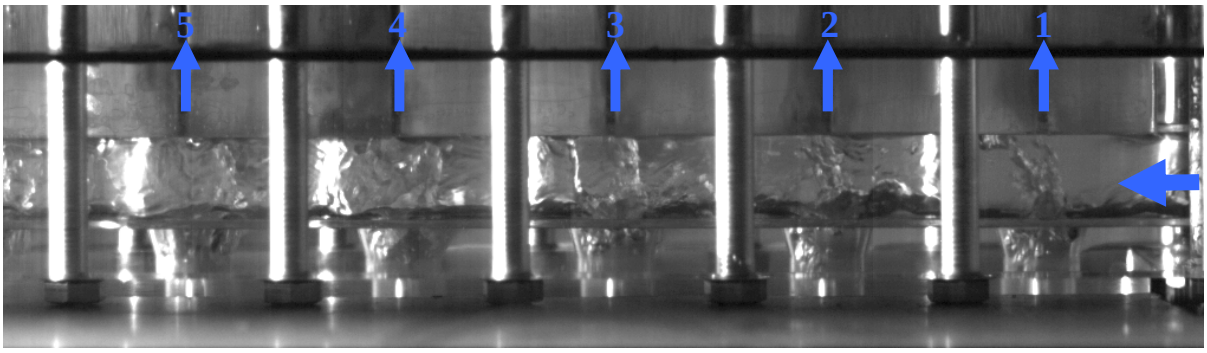


Figure IV- 65 : Photo du début du distributeur pour Qeau = 100 kg/h et Qair = 30 kg/h pour la configuration 2 avec les ultrasons.

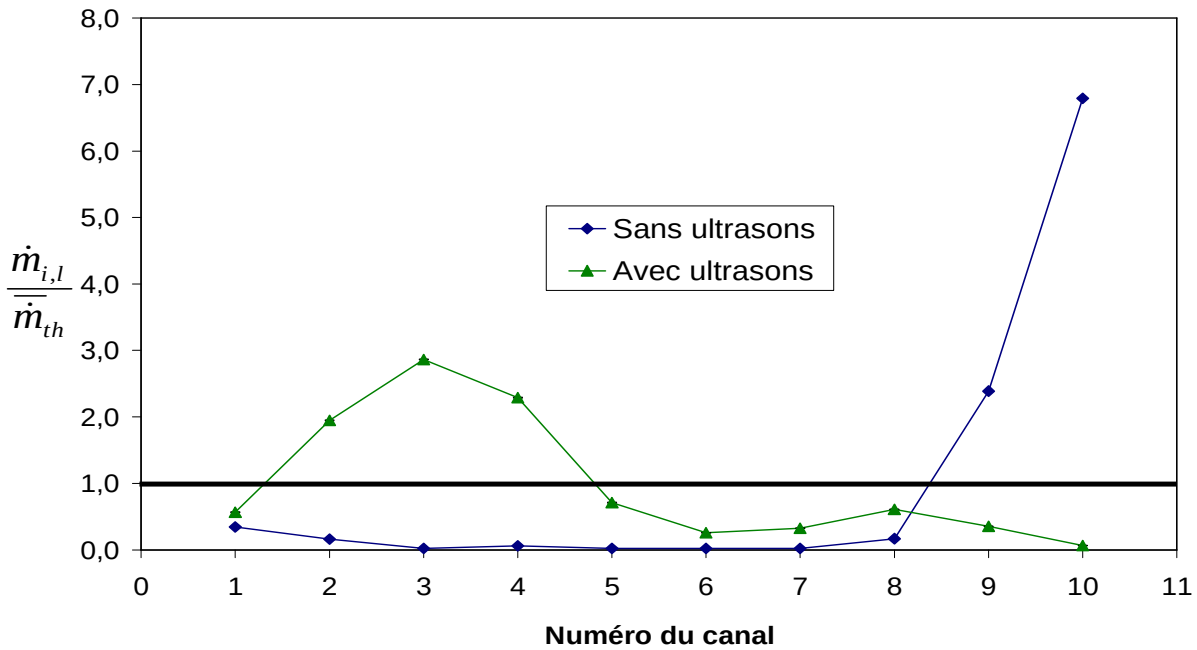


Figure IV- 66 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 30 kg/h pour la configuration 2.

Le graphique de la Figure IV- 66 comparant les essais avec et sans ultrasons montre également que le changement radical a lieu à partir du deuxième canal. Ceci est la conséquence du fort débit d'air qui, impactant les fontaines, emporte une partie des gouttes. Les plus petites sont dirigées vers les canaux tandis que les plus grosses sont projetées en aval du distributeur. Le schéma de la Figure IV- 67 explique ce phénomène.

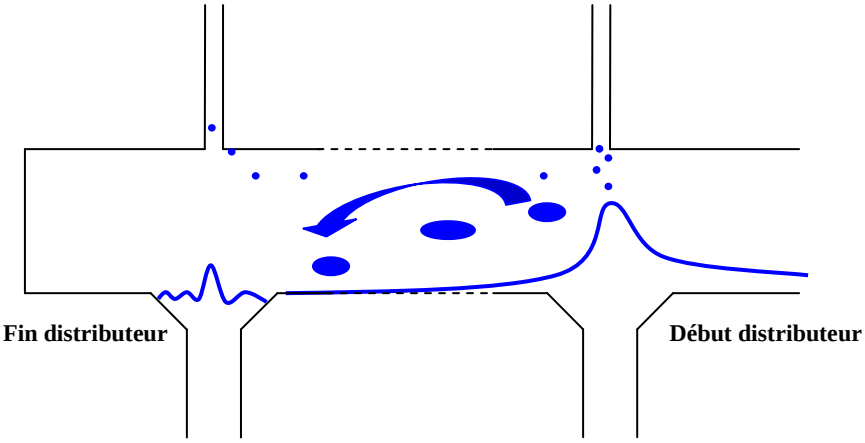


Figure IV- 67 : Schéma de la déstructuration des fontaines par le débit d'air.

Les fontaines en aval jouent également un rôle sur la distribution car un débit est observé dans les derniers canaux, sauf le dixième. Seulement, les premières fontaines permettent la meilleure projection de l'eau dans les canaux car l'eau remplit les puits en entier, ce qui n'est pas le cas de ceux situés en aval. Le débit en eau sert dans ce cas essentiellement à alimenter les puits du distributeur. Le distributeur se comporte donc comme un volume de stockage, dont l'écoulement de l'eau vers les canaux se fait à l'aide des fontaines.

Il faut également noter que ces essais sans zone noyée sont les seuls qui présentent un bilan massique sur l'eau qui ne se boucle pas correctement. Après plusieurs essais de reproductibilité, les essais présentent toujours un bilan à 86%. Cela signifie que 14% de l'eau en entrée du distributeur ne se retrouve pas dans la mesure du débit liquide global en sortie. La suppression de cette zone noyée en est la cause, car elle ne permet plus aux gouttes emmenées par l'air de se regrouper avec le reste du liquide. Une partie des gouttes en provenance des fontaines est sans doute emportée par l'air.

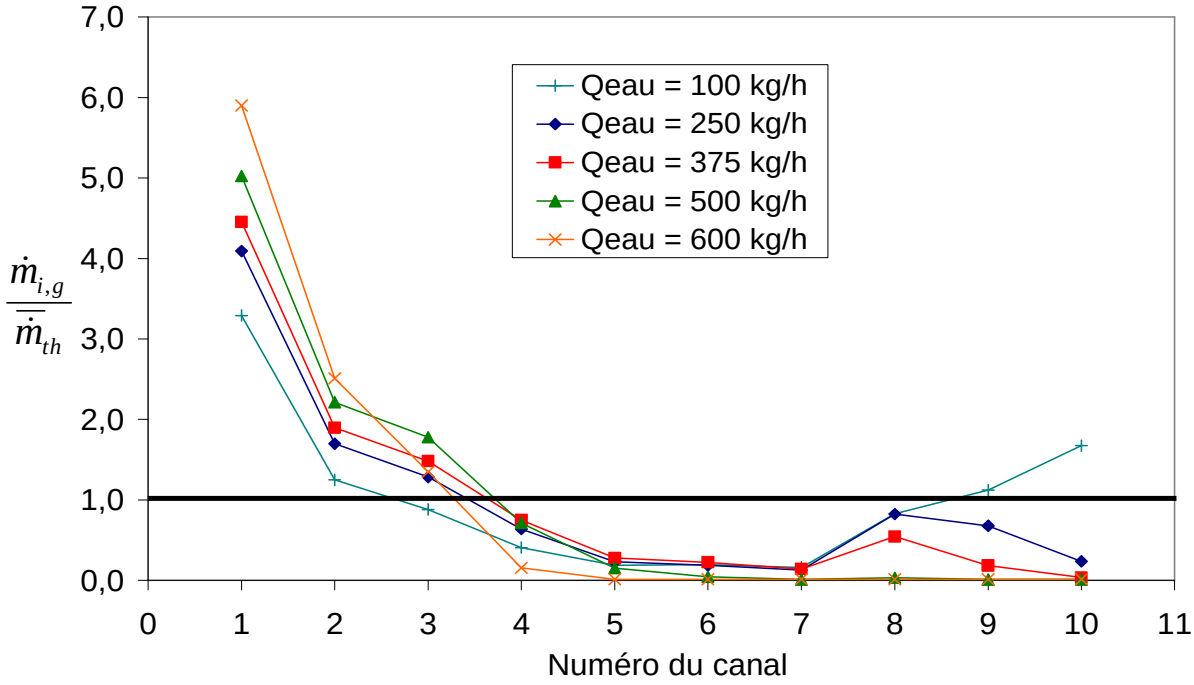


Figure IV- 68 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'eau pour la configuration 2 avec les ultrasons.

Concernant la phase gazeuse, sa distribution en fonction du débit liquide est présentée sur la Figure IV- 68. La distribution de l'air est beaucoup moins influencée par le débit d'eau et il est observé que le comportement du profil à 100 kg/h d'eau possède globalement les mêmes tendances que ceux obtenus pour les débits plus élevés. L'absence d'une zone noyée ne change pas considérablement le profil même si ce manque d'obstacle permet à l'air d'alimenter plus les derniers canaux. La distribution gazeuse étant liée à celle liquide, le profil reste alors sensiblement le même en fonction du débit liquide. Les tendances générales sont donc proches de celles observées sans les ultrasons, avec une amplitude sensiblement identique (Figure IV- 47).

Afin de pouvoir comparer plus clairement la distribution sans et avec ultrasons pour les autres cas que celui particulier à 100 kg/h en eau, les résultats obtenus pour la configuration 2 avec un débit d'eau de 375 kg/h sont présentés Figure IV- 69. Les performances des ultrasons avec ces conditions sont bien visibles sur l'ensemble des canaux. Il apparaît notamment que tous les canaux non alimentés en eau le deviennent grâce à l'action des générateurs ultrasonores. Par exemple les canaux 3 à 6 n'étaient pas du tout alimentés et avec l'aide des ultrasons, le ratio monte à une valeur proche de 0,3 - 0,4 ce qui correspond alors à un débit de l'ordre de 13 kg/h.

Cette amélioration de la distribution dans la première partie du distributeur se répercute alors sur ceux en aval, en effet, le huitième et neuvième canal sont moins alimentés. Cette observation va également dans le sens d'une amélioration de la distribution. Néanmoins, le dernier canal voit son débit augmenter avec l'activation des ultrasons. Ceci semble dû aux gouttes arrachées aux fontaines qui sont entraînées par l'air jusqu'au fond du distributeur, au niveau de la zone noyée qui est la source d'alimentation de ce dernier canal.

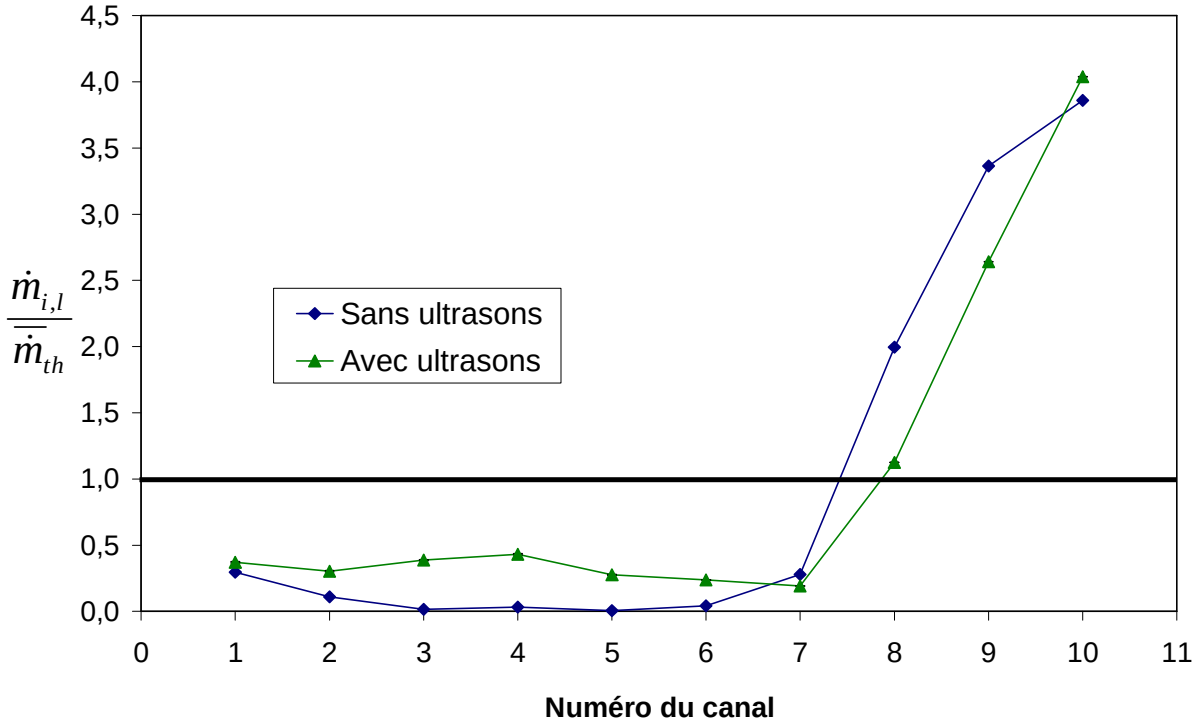


Figure IV- 69 : Distribution liquide avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 375 kg/h et Q_{air} = 30 kg/h pour la configuration 2.

L'effet des ultrasons sur la phase liquide est donc significatif pour ces conditions expérimentales mais il faut également regarder son influence sur la phase gazeuse. Les

résultats liés à l'air pour ces mêmes conditions sont présentés sur la Figure IV- 70. Les variations observées sont de l'ordre de celles observées pour l'eau. En effet, il n'y a aucun changement vraiment brutal mais tous les canaux sont affectés par l'action des générateurs d'ultrasons. Les changements de ratios du gaz dans les canaux sont intimement liés à ceux de la phase liquide. La présence de fontaines agit comme un obstacle, forçant un peu l'air à alimenter le premier canal. Ensuite, les canaux étant plus alimentés en eau, l'air passe moins dans ceux-ci ce qui peut être observé avec le point de « basculement » présent au niveau du canal 7 dans la comparaison de la phase gazeuse similaire à celui de la phase liquide. Les canaux 8 et 9 qui sont effectivement moins alimentés en liquide permettent un passage plus important de l'air. Ceci explique alors la remontée de la courbe des ratios de débit de gaz avec les ultrasons.

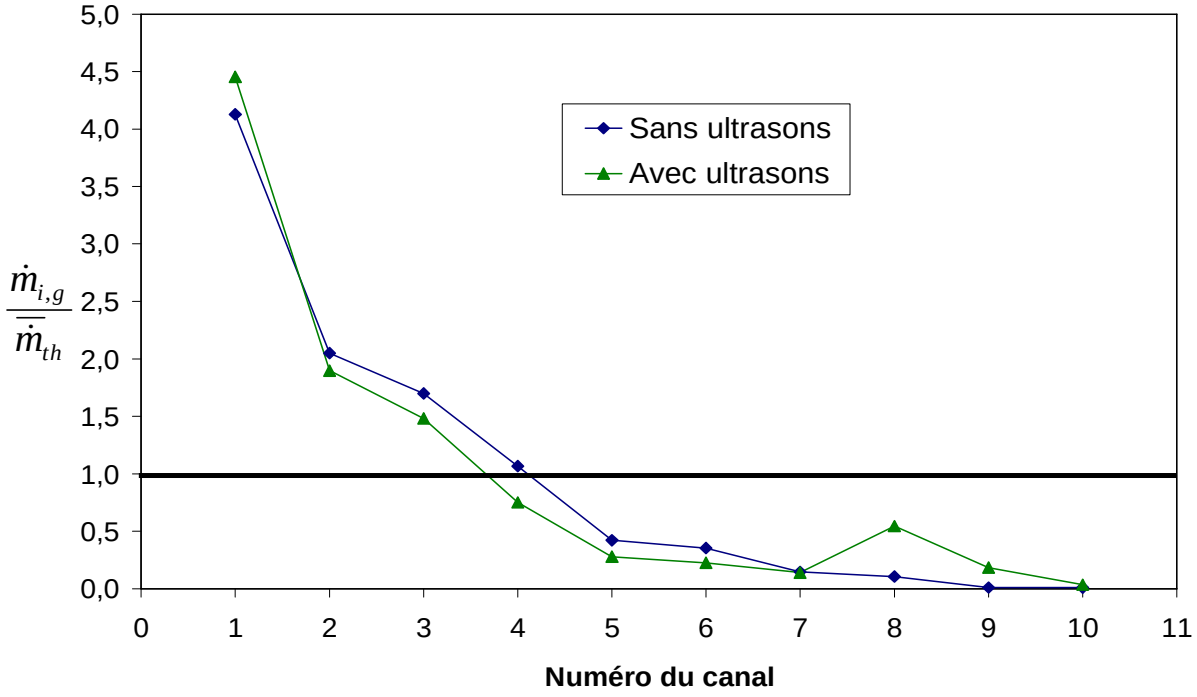


Figure IV- 70 : Distribution gazeuse avec et sans ultrasons pour Q_{eau} = 375 kg/h et Q_{air} = 30 kg/h pour la configuration 2.

2.2.2.3. Influence du débit d'air.

Les derniers profils de distribution avec ultrasons concernent les essais à débit d'eau constant (250kg/h) et un débit d'air variant de 7 à 30 kg/h. Les résultats des distributions liquides sont exposés sur la Figure IV- 71. Les quatre courbes de la répartition des débits liquides sont très peu influencées par la variation du débit d'air.

Ce comportement diffère fortement des cas sans ultrasons pour ces mêmes conditions (Figure IV- 48). Pour rappel, plus le débit gazeux augmentait, plus la distribution était détériorée, l'alimentation en liquide se décalant de plus en plus vers le fond du distributeur. Ceci peut être expliqué par le fait que le débit d'eau alimentant l'échangeur par le biais des fontaines ne varie pas. C'est uniquement le débit d'air qui varie, ce qui accentue la quantité de liquide emportée, sous forme de gouttes, par l'air vers le fond du distributeur. Cependant, l'évolution du débit parcourant le dernier canal n'est pas importante, même si elle existe. Néanmoins les essais avec la configuration 0 pour le même débit liquide montraient une tendance similaire vis-à-vis du débit gazeux pour la distribution liquide.

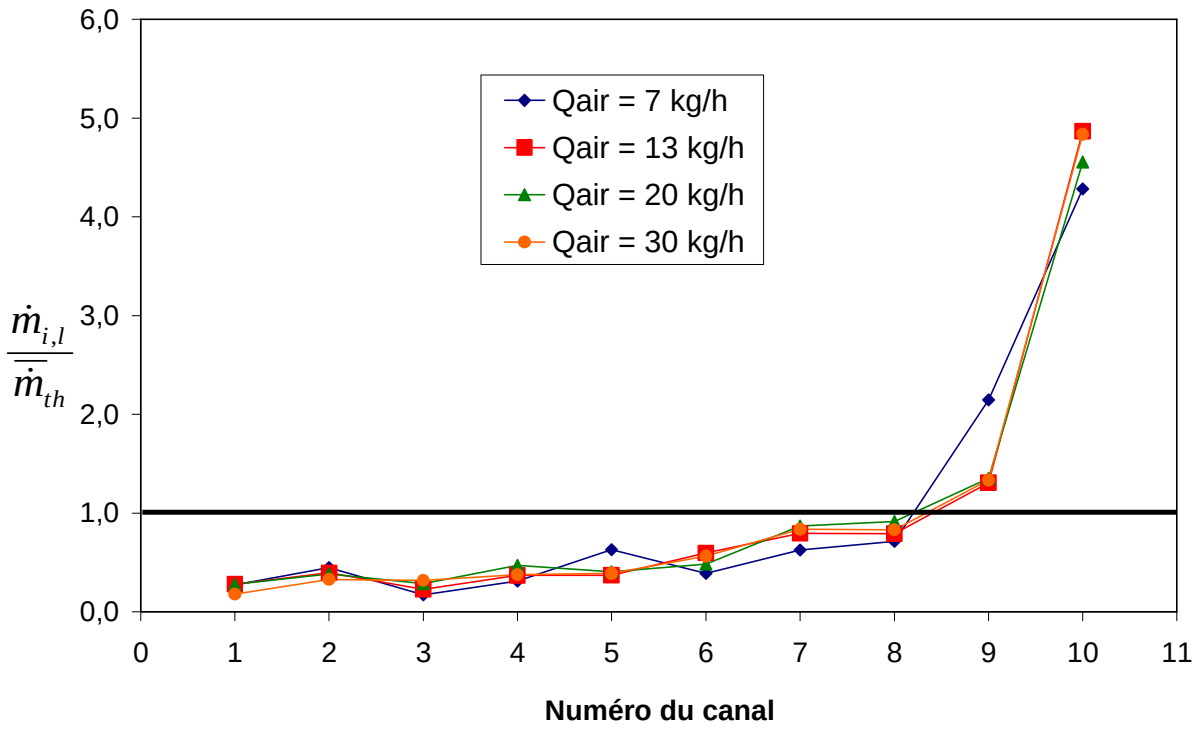


Figure IV- 71 : Distribution des débits massiques liquide selon le débit massique d'air pour la configuration 1 avec les ultrasons.

L'évolution de la phase gazeuse en fonction de son débit à l'entrée est quant à elle présentée sur la Figure IV- 72.

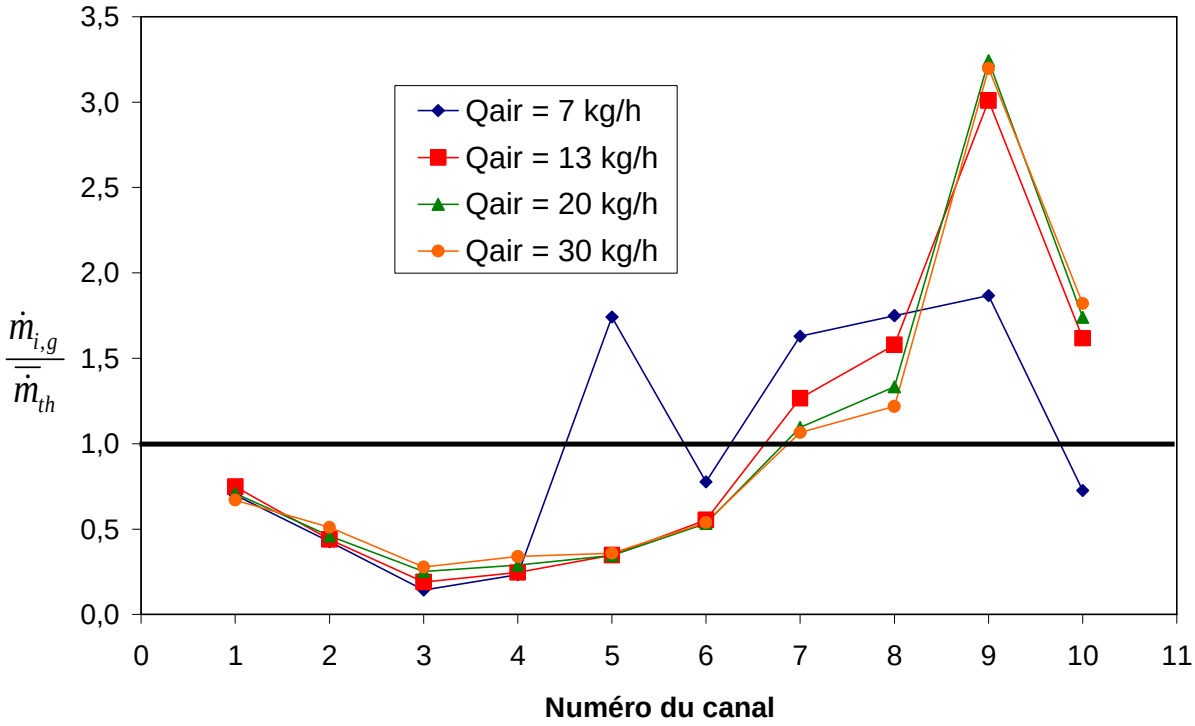


Figure IV- 72 : Distribution des débits massiques gazeux selon le débit massique d'air pour la configuration 1 avec les ultrasons.

Pour ces résultats, les distributions gazeuses avec un débit supérieur ou égal à 13 kg/h sont très similaires. Ceci concorde donc avec les observations faites pour la phase liquide. Les

essais avec un débit d'air de 7 kg/h présentent une différence qui se situe au niveau du cinquième canal. En effet, l'alimentation liquide du canal 9 étant plus importante que pour les essais avec un débit gazeux supérieur, l'air passe plus difficilement par cet avant-dernier canal, et en préfère alors un autre, ici le cinquième. Ce canal possède en effet une perte de pression moins importante, dû à une fermeture de vannes plus faible que celles adjacentes. Une fois que la valeur du débit liquide baisse dans le neuvième canal, la distribution de l'air trouve un maximum dans celui-ci car l'eau crée moins de pertes de pression. Néanmoins, l'ensemble des profils de distribution est plus homogène sous l'effet des ultrasons que sans (Figure IV- 49). Les ultrasons semblent donc limiter l'effet du débit d'air en entrée sur la distribution de la phase gazeuse.

2.2.2.4. Approche statistique de la distribution.

Tous ces profils de distributions analysés peuvent être regroupés grâce aux différents coefficients mathématiques présentés précédemment. Cette étude permet de voir si la qualité de la distribution possède des tendances similaires ou inverses avec et sans ultrasons. Dans un premier temps, le coefficient STD, analysant la dispersion des ratios, est considéré.

Le graphique de la Figure IV- 73 présente l'évolution du coefficient STD pour la phase liquide pour les deux configurations de vannes.

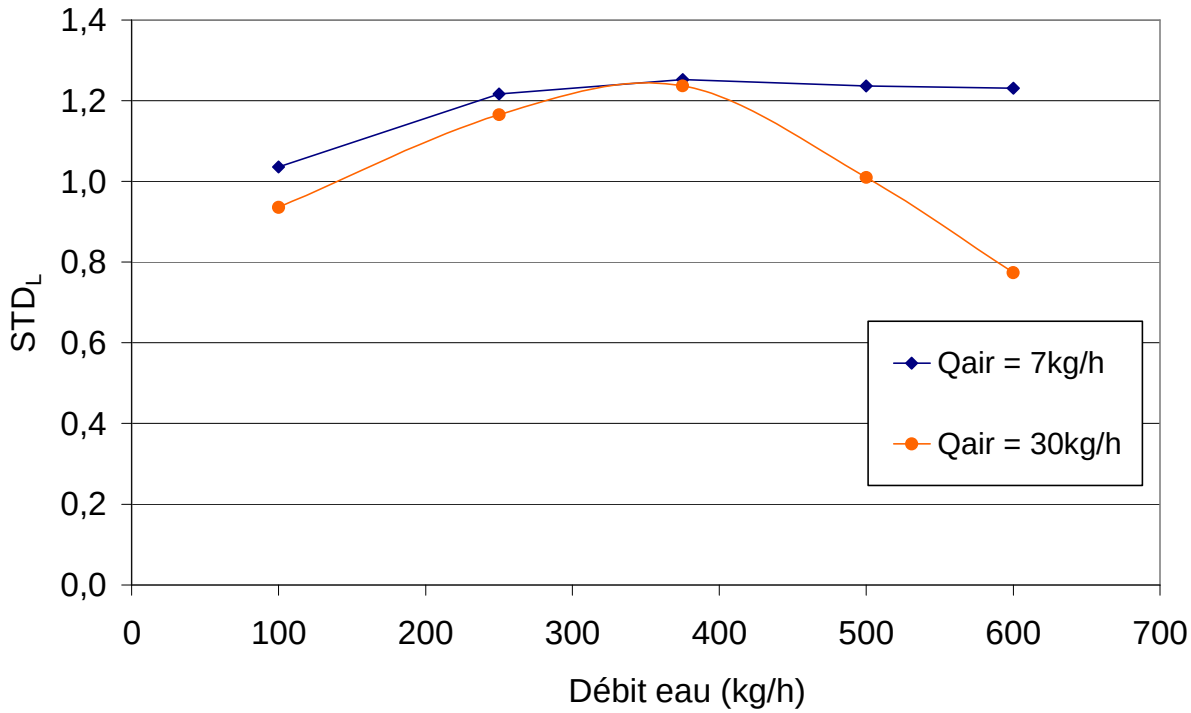


Figure IV- 73 : Évolution du STD_L en fonction du débit d'eau pour les configurations forcées avec ultrasons.

Les deux courbes sont relativement similaires pour les débits allant jusqu'à 375 kg/h, où elles sont croissantes en fonction du débit liquide entrant. Une fois cette valeur dépassée, deux tendances différentes apparaissent. Pour le faible débit en air, la valeur reste sensiblement la même, ce qui concorde avec les observations faites sur l'évolution des profils de distribution. Le coefficient STD_L ne varie cependant pas beaucoup à partir d'un débit de 250kg/h pour cette configuration. En effet, les profils de distribution étaient très semblables à partir de cette limite. Les variations sont plus importantes pour la configuration 2. Il peut être noté

également une augmentation du coefficient STD_L pour les débits inférieurs à 375 kg/h et une fois cette valeur dépassée, une décroissance se manifeste. Cette transition s'effectue au débit pour lequel la distribution a été réglée. De ce fait la distribution de base est la moins bonne, et quelle que soit la variation du débit, elle ne peut qu'être améliorée. Les bonnes valeurs pour le coefficient STD à fort débit en eau sont vraiment liées à l'action des ultrasons qui permettent de bien remplir les premiers canaux et de ce fait, baisser le débit passant dans les derniers. Ces courbes sont donc en accord avec les distributions liquides précédemment analysées, aussi bien en termes d'amplitude que de tendance.

Il faut néanmoins comparer ces résultats à ceux sans ultrasons (Figure IV- 50) pour mieux interpréter l'impact des ultrasons sur la distribution. Il peut être ainsi mieux quantifié qu'en observant uniquement les profils de distributions. Le graphique de la Figure IV- 74 présente la différence relative des essais avec et sans ultrasons. Les résultats obtenus sont, pour la phase liquide, tous négatifs, ce qui signifie que la distribution a, à chaque fois, été améliorée grâce aux ultrasons, avec une amélioration maximale de l'ordre de 50%, ce qui correspond à un coefficient diminué de moitié. Cette homogénéisation de la répartition des débits liquides descend jusqu'à un minimum de l'ordre de 7% dans le cas le moins favorable.

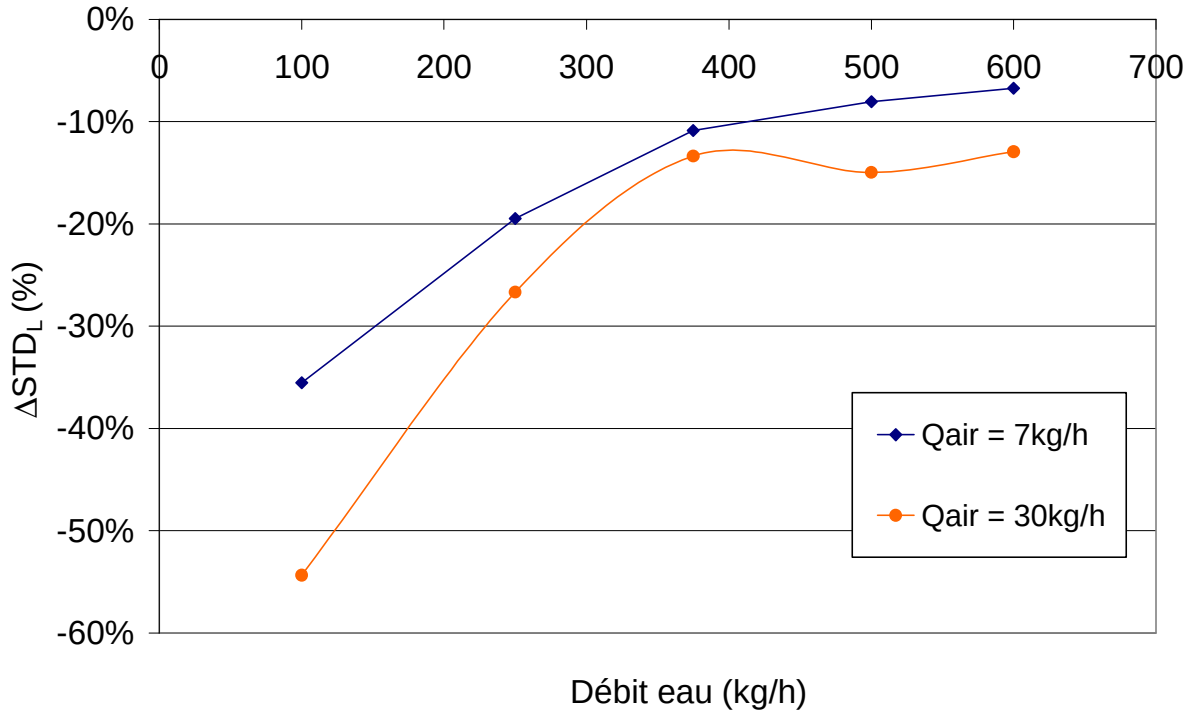


Figure IV- 74 : Écart relatif entre le STD_L obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide pour les configurations forcées.

Les deux courbes présentent les mêmes tendances, à savoir une diminution de l'amélioration lorsque le débit liquide augmente. Les fontaines semblent donc avoir moins d'influence sur la phase liquide pour des forts débits. De la même façon que pour les résultats précédents, l'amélioration est meilleure pour un faible débit. En effet, la distribution étant la plus mauvaise pour ces conditions, il y a alors plus de marge pour l'améliorer (Figure IV- 32). De plus la quantité de liquide perturbé par la création des fontaines est proportionnellement plus importante pour les faibles débits que pour les forts. En effet, la quantité présente dans les jets des fontaines est proportionnellement plus importante lorsque le débit liquide en entrée est faible. Cependant, la phase gazeuse semble, elle permettre une amélioration plus importante à fort débit (30 kg/h par rapport à 7 kg/h). Ces deux observations sont similaires à celles faites

pour la configuration 0. Néanmoins, ces dernières courbes sont plus monotones que les premières. L'effet du débit d'air sur les fontaines est illustré par les photos de la Figure IV-75.

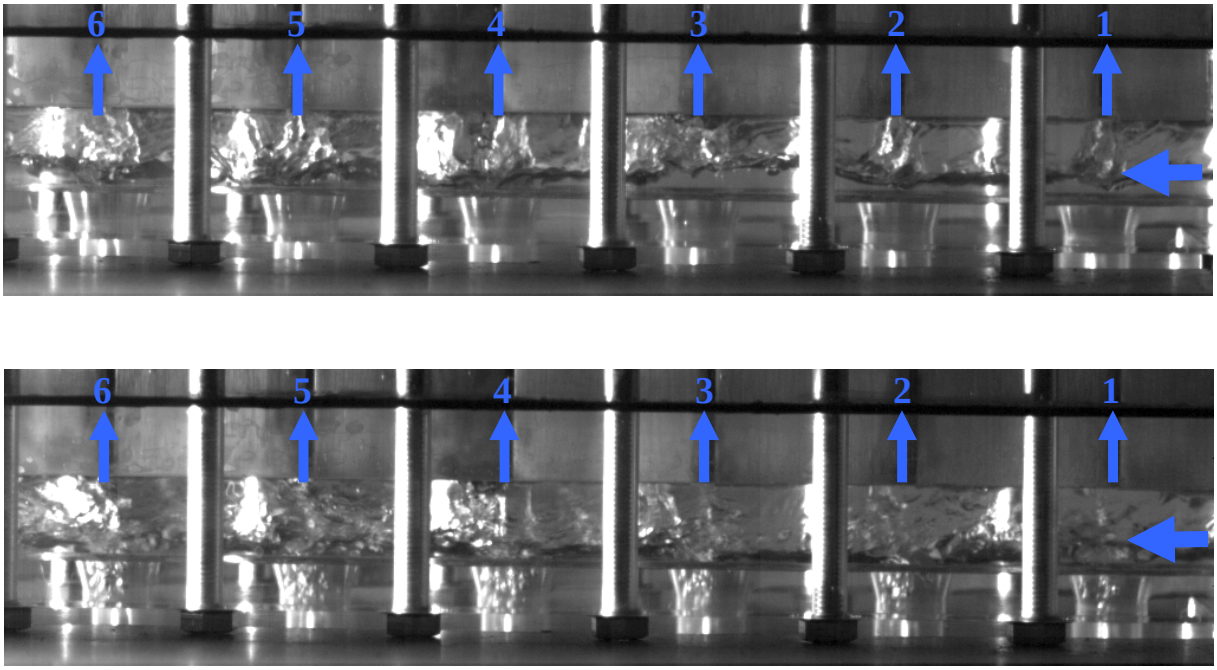


Figure IV- 75 : Photos des six premiers canaux du distributeur avec Q_{air} = 7 kg/h (haut) et Q_{air} = 30 kg/h (bas).

Les fontaines sont effectivement beaucoup plus perturbées lorsque le débit gazeux est important, ce qui explique qu'une partie des gouttes est entrainée par cette phase. Ceci amène à avoir un écoulement beaucoup plus dispersé, ce qui semble bénéfique pour l'amélioration de la distribution. Cette observation concorde avec les résultats à débit d'eau constant (250 kg/h), comme le montre la Figure IV- 76.

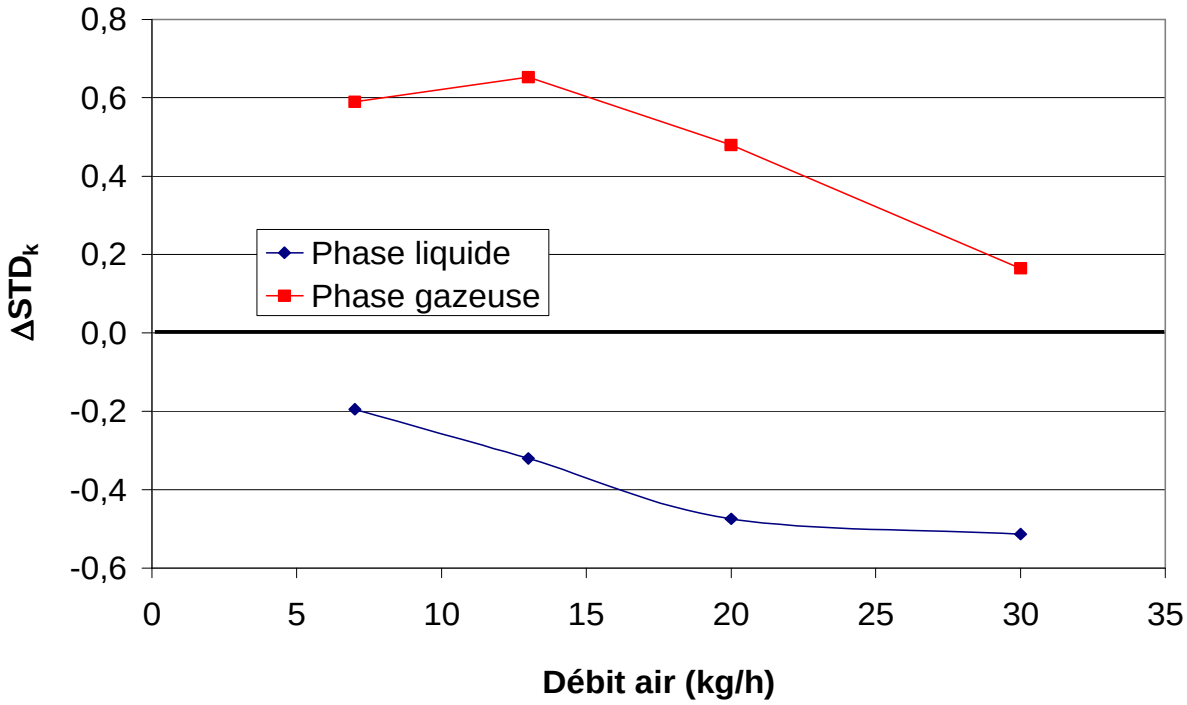


Figure IV- 76 : Écart entre les STD obtenus avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit gazeux pour la configuration 1 et un débit massique d'eau à Q_{eau} = 250 kg/h.

Sur ce graphique, il est clairement visible que les ultrasons sont plus efficaces à forts débits d'air, mais il est constaté une amélioration essentiellement sur la phase liquide. Cette tendance, qui est liée à un régime plus dispersé, a été présentée dans le paragraphe précédent. La distribution gazeuse est quant à elle détériorée pour toutes les conditions à débit liquide constant. Cette détérioration est cependant moindre à fort débit d'air. Cette tendance est la même que pour les essais sans usage des vannes. En effet, les ultrasons semblent rendre la distribution gazeuse moins sensible à son débit en entrée. Les profils de distribution deviennent alors homogènes entre eux (Figure IV- 72). Les obstacles créés par les fontaines sont, comme c'est visualisé sur les précédentes photos, beaucoup moins gênants pour un fort débit d'air car ils sont « pulvérisés ».

L'étude de la distribution de la phase gazeuse à débit gazeux contant est illustrée avec la Figure IV- 77 qui montre l'évolution du coefficient STD_G en fonction du débit d'eau pour les deux configurations de vannes testées. Les deux courbes présentent des tendances opposées. Pour les résultats avec la configuration 1 une diminution de la dispersion des ratios est observée avec l'augmentation du débit liquide. Cependant cette diminution est très faible pour les trois débits les plus importants. Les forts débits liquides présentent des résultats relativement corrects, mais pour les faibles débits, la distribution de l'air devient déséquilibrée, ce qui se traduit par une augmentation du coefficient STD_G. La distribution gazeuse à fort débit d'air est influencée avec la même amplitude mais pas dans le même sens. La répartition du gaz a en effet tendance à être moins homogène à fort débit liquide. Cet effet est dû à l'augmentation de la zone noyée au fond du distributeur, ce qui pousse l'air à ne se répartir que sur les premiers canaux de plus en plus. Ceci a donc pour conséquence de dégrader la distribution de cette phase.

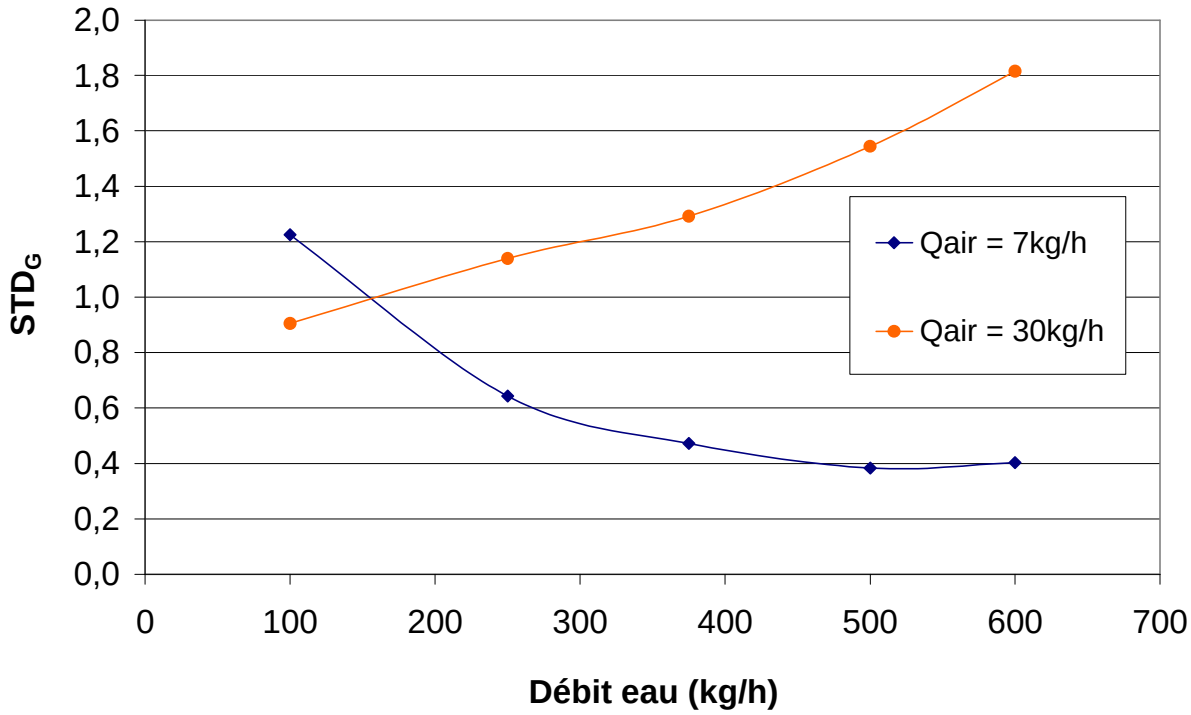


Figure IV- 77 : Évolution du STD_G en fonction du débit d'eau pour les configurations forcées avec ultrasons.

De la même façon que pour la phase liquide, la différence relative des essais avec ultrasons et de ceux sans ultrasons (Figure IV- 51) est exposée sur la Figure IV- 78. Ce graphique montre des résultats très différents de ceux vus jusqu'à présent. En effet, une forte dégradation de la distribution de la phase gazeuse est observée pour un débit de 250 kg/h et surtout de 100 kg/h pour un débit d'air de 7 kg/h en entrée.

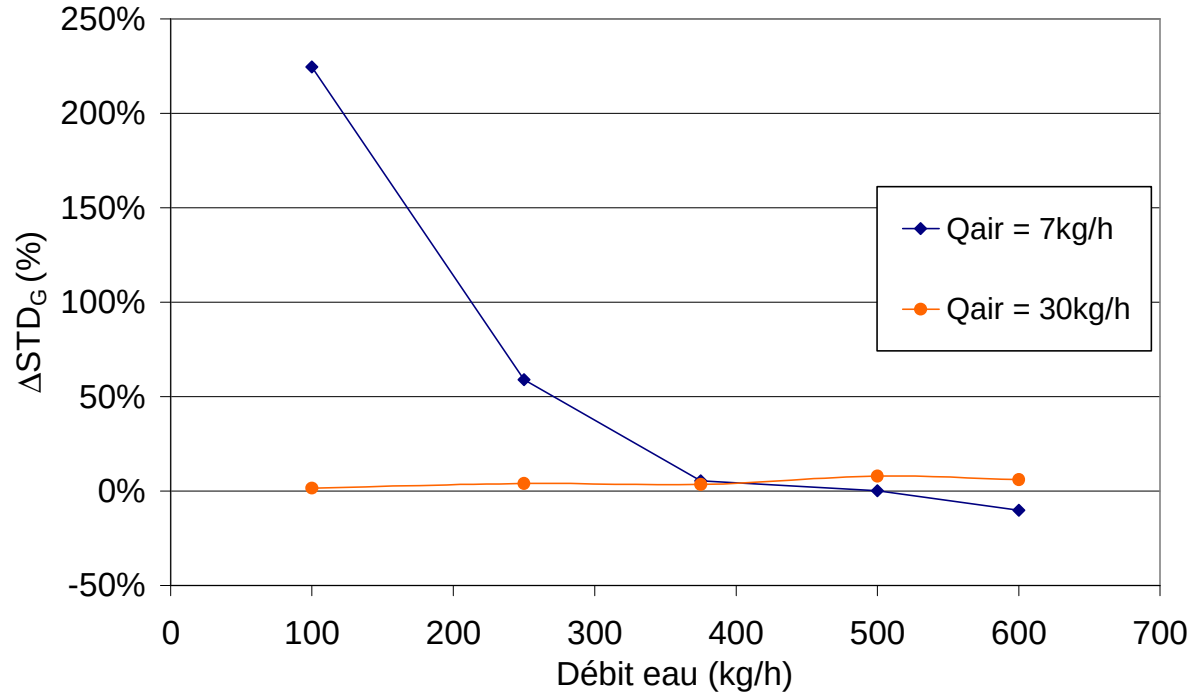


Figure IV- 78 : Écart relatif entre le STD_G obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide pour les configurations forcées.

Cette forte dégradation de la distribution est liée au changement radical de la distribution causée par les ultrasons. En effet, pour ces deux cas extrêmes, la distribution gazeuse est l'inverse de ce qui était initialement configuré : les derniers canaux sont fortement alimentés en air, alors que les premiers sont sous-alimentés. Cette forte opposition de répartition, causée par la fermeture moins importante pour les dernières vannes, cause donc cette différence. Une fois cette particularité passée des résultats pour un débit liquide de 100 et 250 kg/h pour la configuration 1, les deux courbes sont assez semblables car les variations ne sont pas très importantes (± 10%). Encore une fois, la phase gazeuse n'est pas vraiment influencée par les ultrasons lorsque son débit est important.

En complément de ce coefficient de dispersion, l'étude du coefficient d'asymétrie a également été faite. Les résultats calculés pour les essais à débit gazeux constant sont présentés sur la Figure IV- 79.
Ces courbes présentent sensiblement les mêmes tendances que sans ultrasons (Figure IV- 55), sauf sur un point qui correspond à un débit de 100 kg/h en eau et de 30 kg/h en air. Ce cas particulier a été vu en détail précédemment et la faible asymétrie s'explique par le fait que la distribution liquide est totalement changée, et il n'y a plus le maximum situé sur le dernier canal. Sinon, les tendances montrent une diminution du coefficient d'asymétrie de l'eau avec l'augmentation du débit liquide. La pente est encore plus importante dans le cas du plus fort débit d'air. La précédente étude des profils (Figure IV- 63 et Figure IV- 71) de distribution a montré que la distribution liquide était beaucoup plus sensible à son alimentation en entrée pour un débit d'air plus important.

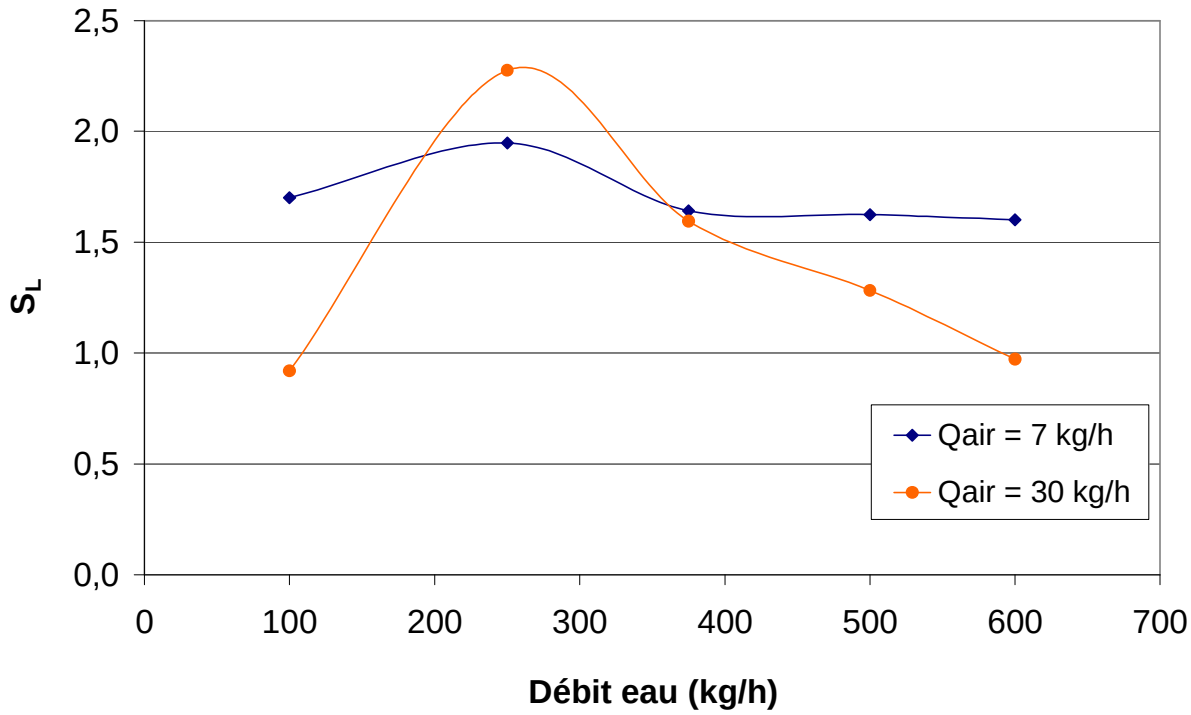


Figure IV- 79 : Évolution du coefficient S_k pour la phase liquide en fonction du débit de celle-ci pour les configurations forcées avec les ultrasons.

L'évolution de ce même coefficient pour l'air est présentée sur le graphique de la Figure IV-80. Celui-ci permet d'observer qu'aucune tendance ne se dégage sur cette phase. L'asymétrie de la phase gazeuse ne semble que peu influencée par le débit liquide. Les fluctuations sont

cependant moins importantes pour un débit gazeux de 30 kg/h que pour 7 kg/h. Ceci est encore en concordance avec les profils de distributions.

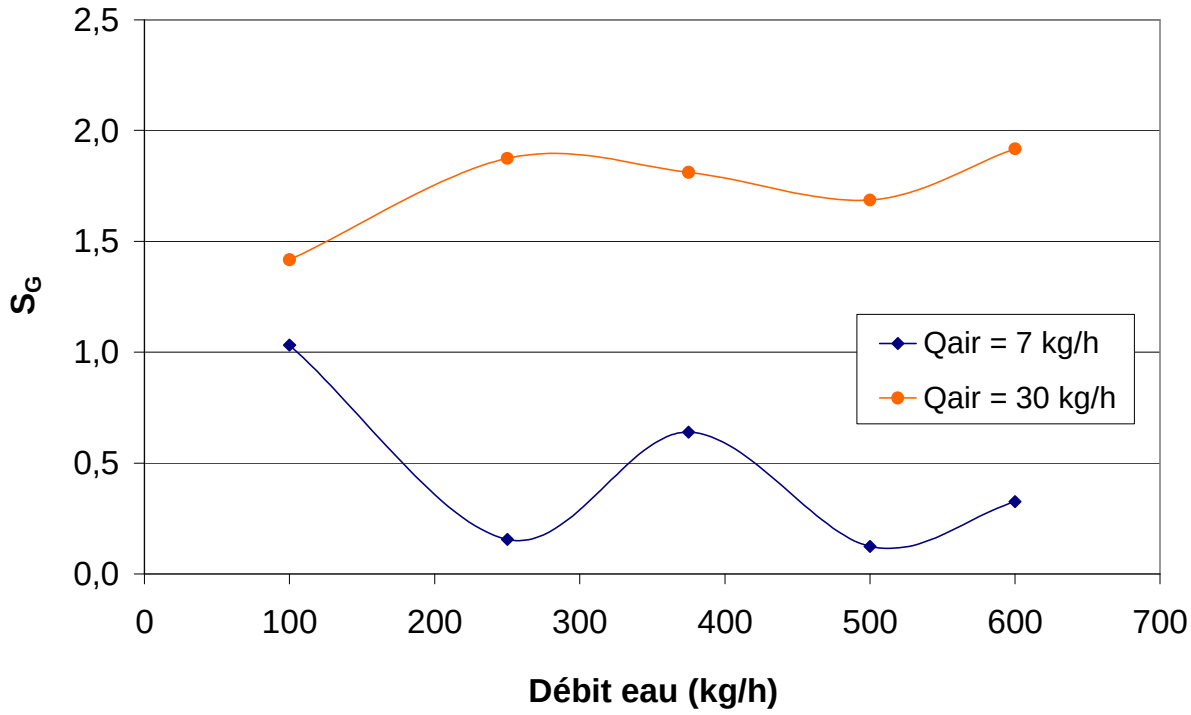


Figure IV- 80 : Évolution du coefficient S_k pour la phase gazeuse en fonction du débit d'eau pour les configurations forcées avec les ultrasons.

Enfin, les essais à débit liquide constant sont analysés sur la Figure IV- 81. Pour les deux phases, l'asymétrie est plus importante à fort débit d'air. Encore une fois, les mêmes tendances qu'observées sans les ultrasons sont obtenues (Figure IV- 57). Il faut cependant noter que si l'essai au plus faible débit gazeux n'est pas pris en compte, les trois autres essais présentent une asymétrie pratiquement de même valeur. Les ultrasons permettent dans ce cas de fixer une distribution type et de la garder, quel que soit le débit gazeux en entrée.

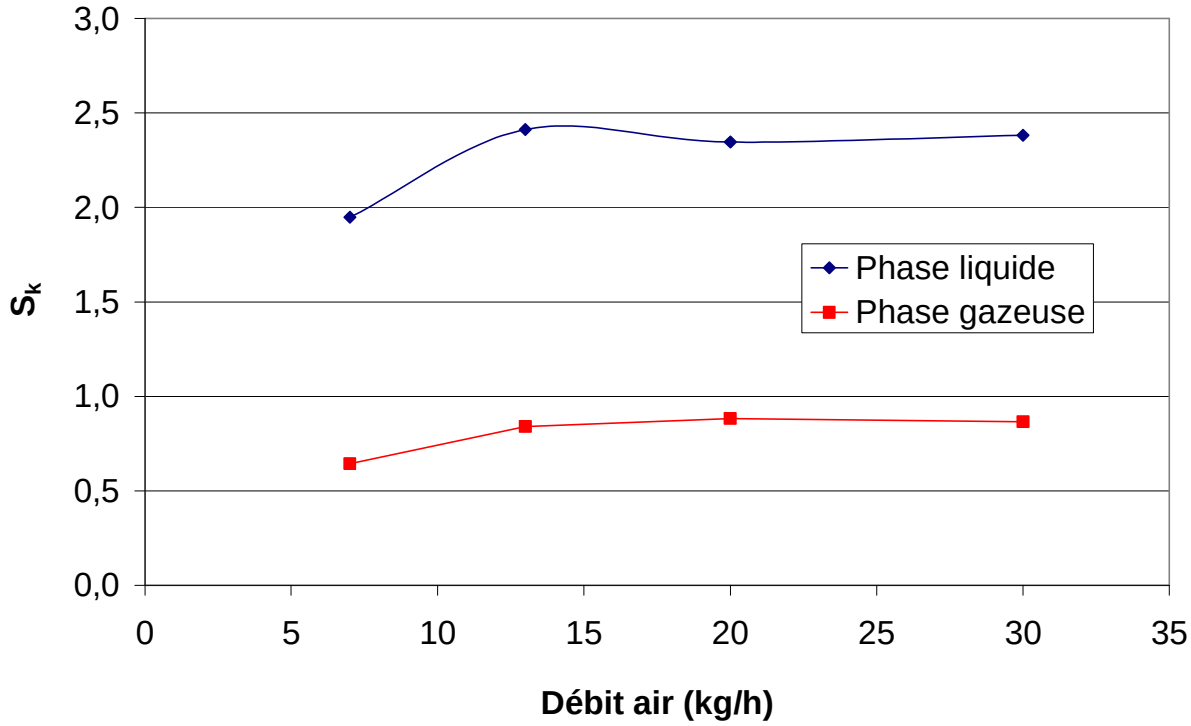


Figure IV- 81 : Évolution des coefficients S_k en fonction du débit d'air pour la configuration 1.

Afin de pouvoir correctement comparer les essais avec et sans ultrasons, la même analyse que pour le précédent coefficient est faite, à savoir la différence relative par rapport aux valeurs sans ultrasons. Les écarts calculés sont présentés sur la Figure IV- 82.

Les résultats peuvent paraître surprenants et cela montre encore une fois qu'il faut être prudent vis-à-vis de l'analyse de ces coefficients. En effet, à part pour le cas particulier étudié à 100 kg/h où l'asymétrie est moins prononcée avec les ultrasons car il y a un changement total de la distribution, tous les autres essais présentent une asymétrie plus importante avec les ultrasons. Cette observation doit être examinée à l'aide des profils de distribution. Les canaux non alimentés le sont devenus grâce aux ultrasons, permettant à la valeur du débit les parcourant de se rapprocher de celle correspondant à une distribution homogène. Les derniers canaux sont également affectés par ce prélèvement en aval, ce qui diminue alors la valeur du débit liquide les alimentant. Cependant, la formule mathématique est dépendante des écarts par rapport à la moyenne et également au coefficient STD. Lorsque le STD diminue, le coefficient d'asymétrie a alors de grande chance d'augmenter. De plus les écarts à la puissance 3 deviennent importants, et comme le canal suralimenté possède toujours l'écart le plus important par rapport à la moyenne, il influence toujours ce coefficient d'asymétrie. Un coefficient d'asymétrie plus grand ne veut pas forcément dire une plus mauvaise distribution et n'est donc pas en désaccord avec les résultats du coefficient STD.

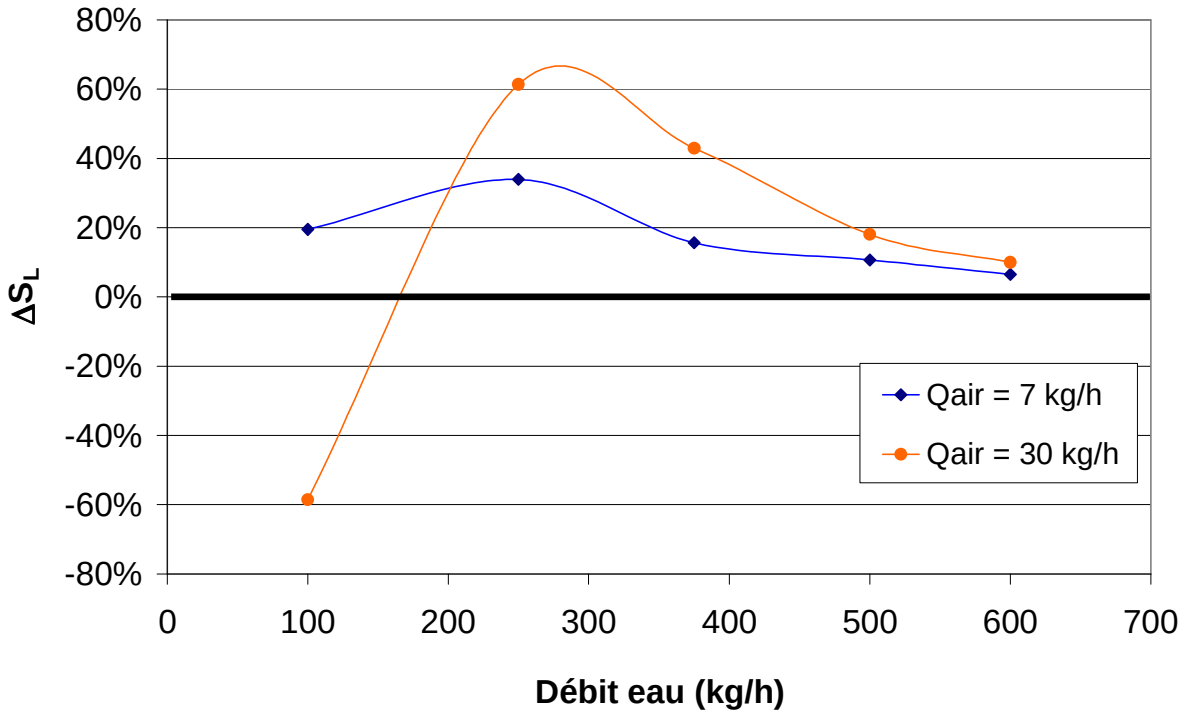


Figure IV- 82 : Écart relatif entre le S_L obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide pour les configurations forcées.

Pour montrer que la distribution liquide s'améliore, le dernier coefficient, celui d'aplatissement peut être exploité pour approfondir l'analyse. La Figure IV- 83 montre alors la différence relative par rapport aux essais sans ultrasons. A part le point particulier correspondant au débit de 100 kg/h d'eau et 30 kg/h en air, il est observé une augmentation de ce coefficient pour tous les autres essais. En rappelant que plus la valeur de l'aplatissement est élevée, plus les points sont concentrés autour de la moyenne, il peut donc être signalé que ces essais ont une meilleure concentration de points avec les ultrasons, ce qui va dans le sens de l'amélioration de la distribution. Ces résultats sont un bon exemple pour montrer qu'un seul coefficient ne permet pas de décrire les changements sur la distribution par les ultrasons. La complémentarité des trois est intéressante. De plus, l'analyse des profils de distribution est au préalable nécessaire.

Les résultats pour un débit d'eau constant (250 kg/h) montrent également les mêmes liens entre asymétrie et aplatissement : un coefficient d'aplatissement augmenté correspond à une asymétrie augmentée. La Figure IV- 84 illustre ces propos. La superposition des deux courbes sur le même graphique montre bien que les différences des deux coefficients suivent exactement les mêmes tendances mais avec une amplitude légèrement différente.

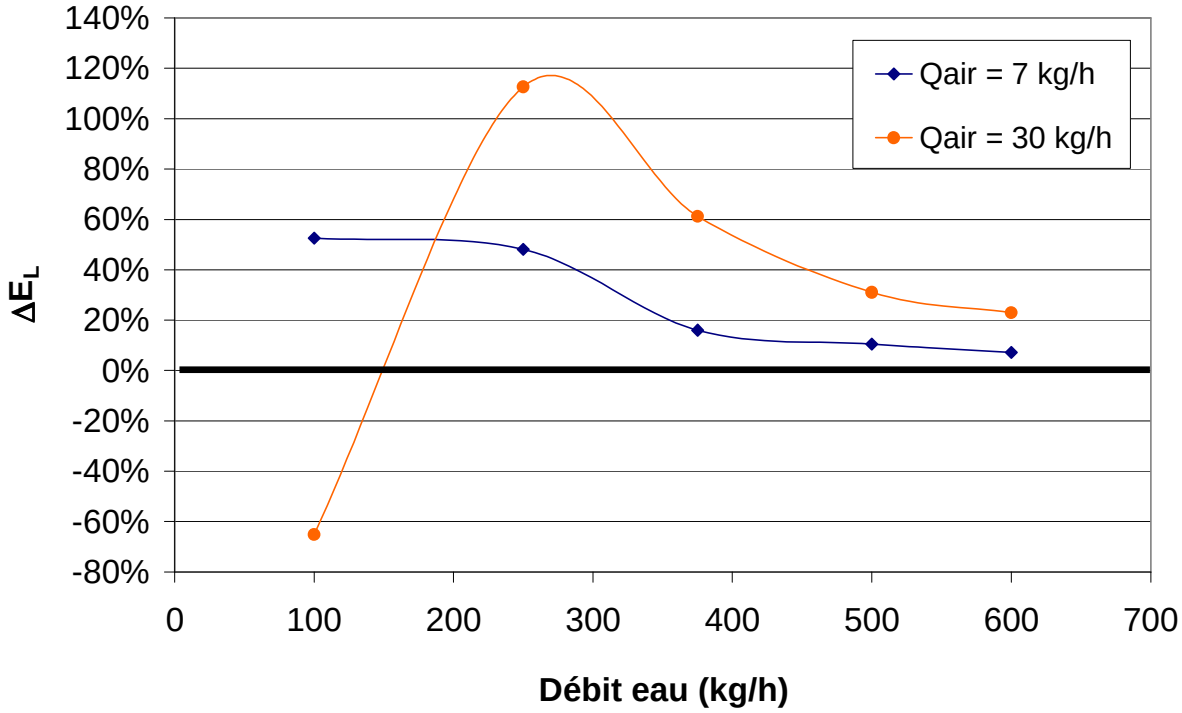


Figure IV- 83 : Écart relatif entre le E_L obtenu avec les ultrasons et celui sans les ultrasons en fonction du débit liquide pour les configurations forcées.

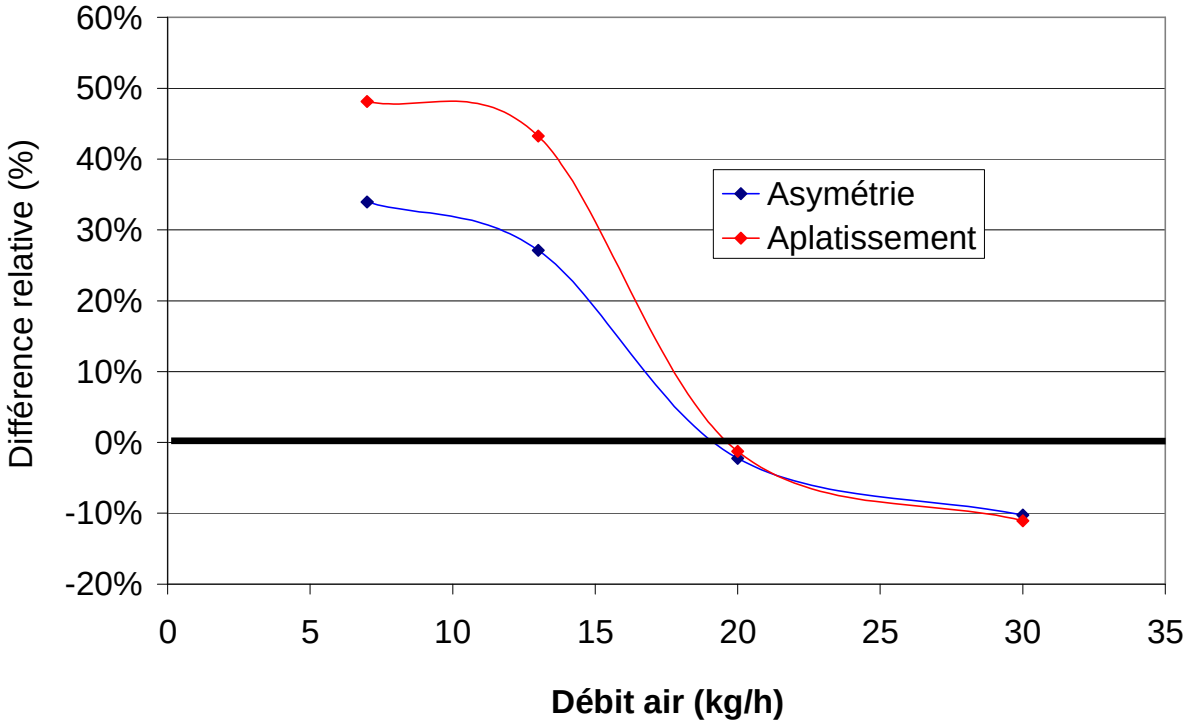


Figure IV- 84 : Écart relatif entre les S_L et E_L obtenus avec les ultrasons et ceux sans les ultrasons en fonction du débit liquide pour les configurations forcées.

Le dernier paramètre étudié concerne la distribution du titre dans les canaux. Les tendances générales en fonction du titre à l'entrée de l'échangeur sont présentées sur le graphique de la Figure IV- 85. Les courbes à débit d'air constant présentent le même comportement qu'en l'absence d'ultrasons (Figure IV- 58), à savoir une diminution de la dispersion du titre dans

les canaux lorsque le titre est plus élevé à l'entrée de la section d'essais. De plus, en ne prenant pas en compte le cas particulier à 100 kg/h en eau et 30 kg/h en air, les courbes possèdent une forte diminution de l'écart-type lorsque le titre massique augmente. Cependant pour les essais à débit d'eau constant, une faible tendance à la diminution est visible, mais les valeurs sont sensiblement les mêmes quel que soit le titre.

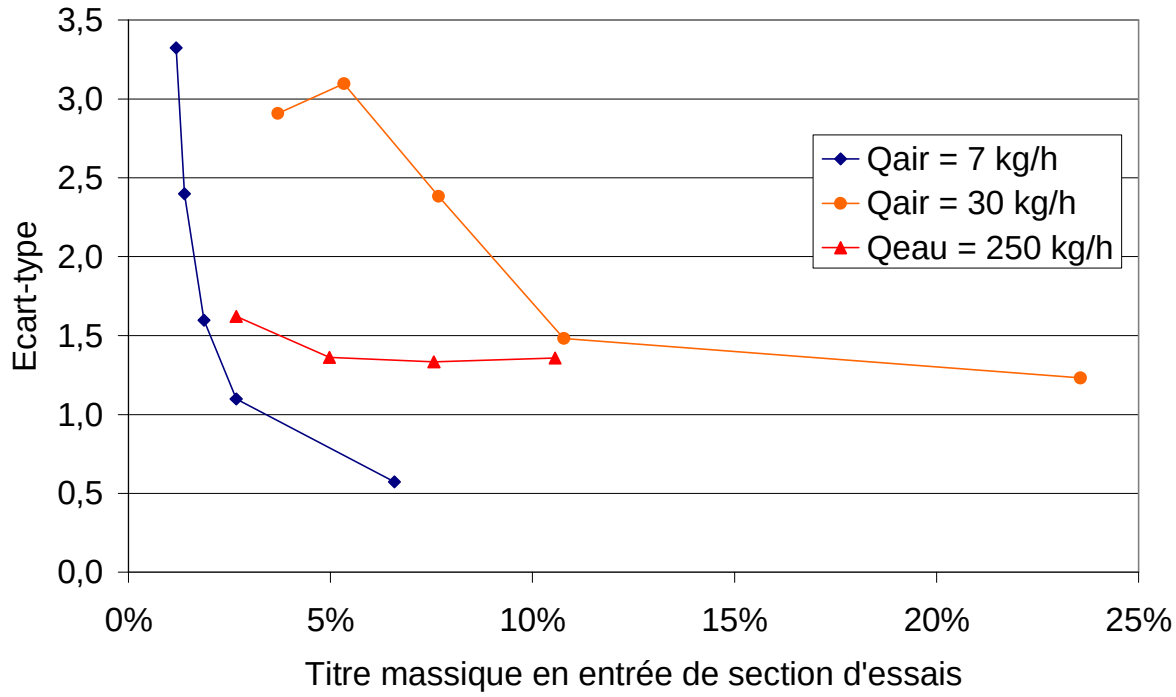


Figure IV- 85 : Évolution de l'écart-type de la distribution du titre dans les canaux en fonction du titre avec et sans ultrasons en entrée de distributeur pour les configurations forcées avec les ultrasons.

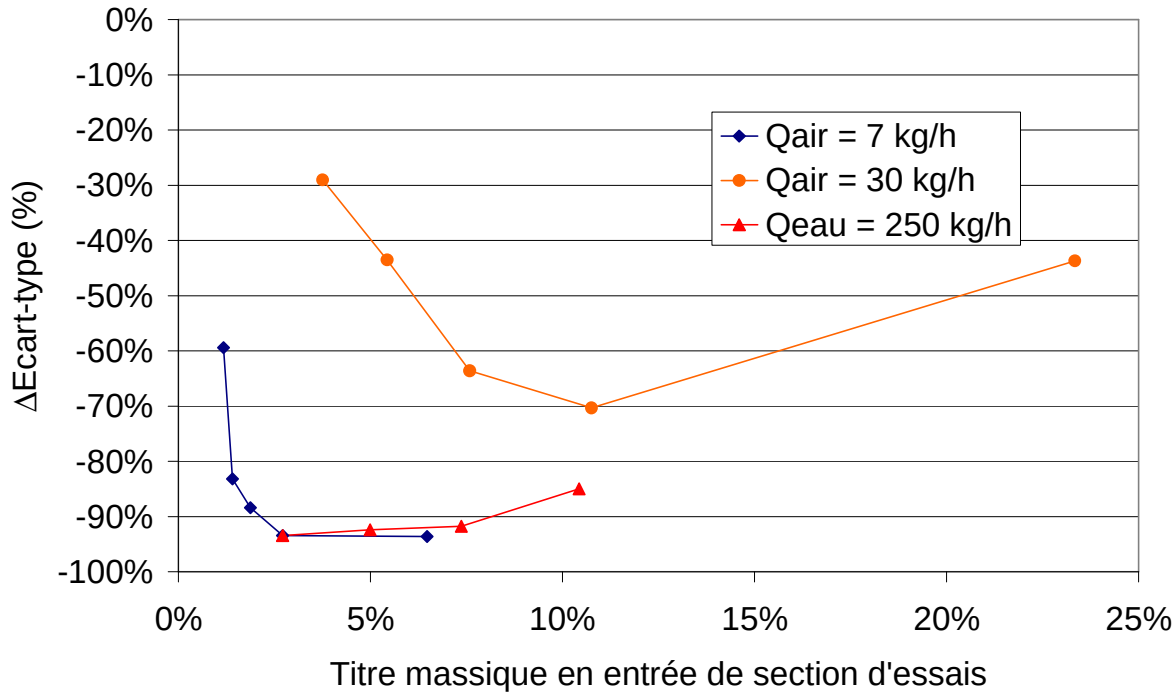


Figure IV- 86 : Évolution de la différence relative de l'écart-type de la distribution du titre dans les canaux en fonction du titre en entrée de distributeur pour les configurations forcées.

Afin de mieux préciser l'influence des ultrasons sur cette distribution, la Figure IV- 86 permet d'observer les différences relatives de la dispersion par rapport aux essais sans ultrasons (Figure IV- 58). Il est intéressant de noter que tous les essais présentent une amélioration de la distribution du titre, cette amélioration étant meilleure pour les plus faibles débits d'air. Une remarque particulière peut également être faite sur l'allure de ces courbes. L'augmentation du titre semble diminuer la dispersion de celui-ci dans les canaux. Cependant, à partir d'une certaine valeur dépendante de la configuration, l'amélioration devient moins importante (par exemple pour un titre de l'ordre de 10% à un débit d'air constant de 30 kg/h). Bien que la distribution gazeuse présente, dans une grande partie des essais, des dégradations avec les ultrasons, l'amélioration apportée sur la phase liquide permet de contrer cette dégradation. D'un point de vue thermique, la valeur du titre est importante, et ce graphique combinant l'analyse de la distribution des deux phases permet de montrer une bonne répartition de celui-ci et permettrait ainsi de mieux gérer les échanges de chaleur. Il faut bien entendu relativiser en prenant en compte le débit des deux phases, mais l'ensemble des résultats présentés par ces différents graphiques tend à montrer cependant que la distribution diphasique semble améliorée d'un point de vue thermique.

2.2.3. Conclusion partielle sur la distribution forcée.

Ces essais avec des profils de pertes de pression imposés (configurations 1 et 2) afin d'obtenir des profils de distribution similaires à ceux rencontrés dans la littérature, ont montré des résultats intéressants. Sans les ultrasons, les mêmes tendances sont retrouvées pour l'évolution de la distribution des deux phases en fonction des paramètres opératoires. Les profils sont cependant différents mais les phénomènes physiques restent les mêmes. Plus une phase possède un débit important à l'entrée du distributeur, plus celle-ci se distribue de façon équitable entre les canaux.
L'activation des générateurs d'ultrasons a permis de compléter l'analyse faite avec la configuration 0. La distribution liquide s'est vue améliorée pour chaque essai quelle que soit la configuration (1 ou 2) utilisée. Par le biais de visualisations, l'écoulement dans le distributeur a été analysé. Des changements majeurs ont été observés ; les fontaines créées par les générateurs d'ultrasons bouleversent l'écoulement. En effet, sans les ultrasons, un écoulement stratifié est présent dans le distributeur avec une zone complètement noyée en fond, qui correspond aux canaux suralimentés. Lorsque les ultrasons entrent en jeu, en plus de l'écoulement stratifié, un régime dispersé apparaît. Celui-ci est d'autant plus important que le débit gazeux est important, permettant de détacher une plus grande quantité de gouttes d'eau des fontaines. Ce régime dispersé permet de mieux homogénéiser la distribution. Un autre effet des ultrasons est la diminution de la zone noyée en fond de distributeur. L'eau alimente plus les premiers canaux grâce aux fontaines, ce qui diminue donc cette zone, réduisant l'alimentation des derniers canaux, à savoir les plus alimentés.
De la même façon que pour la configuration 0, les ultrasons apportent une amélioration plus importante lorsque le débit liquide est faible. Les turbulences apportées par les fontaines sont plus sensibles pour ces faibles débits. Lorsque l'écoulement devient plus turbulent, ces modifications de l'écoulement deviennent moins significatives. La phase gazeuse semble quant à elle, apporter une plus grande amélioration lorsque son débit est important.
Ces essais ont donc montré que la distribution liquide peut être améliorée avec les ultrasons et que même s'il y a dégradation de la distribution gazeuse, l'ensemble de la distribution est plus homogène avec l'ajout des ultrasons notamment vis-à-vis du titre massique. Cependant pour tous ces essais, tous les générateurs d'ultrasons étaient activés. Il a ensuite été étudié l'influence du nombre d'appareils en marche et de leur position. En effet, l'amélioration de la

répartition des débits de l'eau vient-elle des fontaines ou alors de la déstructuration de l'écoulement ? Comment les ultrasons au début du distributeur peuvent-ils affecter la partie aval ? Si les derniers générateurs d'ultrasons sont activés, les résultats sont-ils similaires pour cette partie des canaux ou alors est-ce qu'il y a besoin des générateurs d'ultrasons en amont ? Toutes ces questions peuvent se poser après l'analyse de ces résultats précédents.

2.3 Étude paramétrique des générateurs d'ultrasons.

Les différentes configurations d'activation des générateurs d'ultrasons ont été présentées précédemment dans le Tableau IV- 3. Le paramètre étudié dans cette partie est la position de ces appareils activés au sein du distributeur. Des tests ont été faits en activant différents générateurs. Les configurations étudiées ont été les suivantes : les cinq premiers, les cinq derniers, les cinq en face des canaux impairs et les cinq en face des canaux pairs. Le but de l'étude est de voir l'influence de la position des générateurs activés, tant au niveau de la déstructuration de l'écoulement et que de celui de l'alimentation des canaux en vis-à-vis. Les cinq premiers ont été activés pour déterminer si la perturbation amenée par les ultrasons en début de distributeur était suffisante pour améliorer l'ensemble de la distribution ou seulement les canaux concernés. Pour les derniers générateurs d'ultrasons activés, les tests ont permis de compléter ceux effectués avec les cinq premiers afin de voir si les changements obtenus étaient les mêmes qu'avec les dix générateurs d'ultrasons activés. Enfin les cas où les appareils faisant face soit aux canaux pairs soit aux canaux impairs étaient activés, permettent une étude de la distance inter fontaines.

2.3.1. Influence des cinq premiers générateurs d'ultrasons.

Les premiers tests ont été réalisés avec l'activation des cinq premiers appareils. La comparaison de la distribution avec celle où tous les générateurs d'ultrasons est faite sur la Figure IV- 87. Ces résultats sont obtenus pour un faible débit d'eau (250 kg/h) dans la configuration 1. Les deux courbes avec les ultrasons sont similaires pour les quatre premiers canaux. A partir du cinquième, une différence est observée : une alimentation plus importante des canaux est mesurée lorsque tous les générateurs sont activés. La distribution des six derniers canaux est alors moins bonne pour la configuration où les cinq premiers générateurs d'ultrasons activés. Ces essais permettent déjà de conclure que la déstructuration de l'écoulement provoquée par les fontaines ne se propage pas sur l'ensemble du distributeur. Cependant une influence est quand même observée sur le cinquième canal, en effet, celui-ci est plus alimenté dans le cas avec la moitié des appareils en marche que le cas sans ultrasons. Néanmoins, l'amélioration apportée en termes de débit sur ce canal n'est pas aussi bonne qu'avec tous les ultrasons. Ceci montre une influence de la présence des ultrasons en aval, ou du moins de la fontaine en aval du canal considéré. Au niveau du sixième canal, les mêmes conditions de débit sont retrouvées que cela soit avec les cinq premiers générateurs activés ou avec le cas où aucun appareil ne fonctionne. Les deux derniers canaux présentent un débit similaire car la zone noyée est sensiblement similaire.

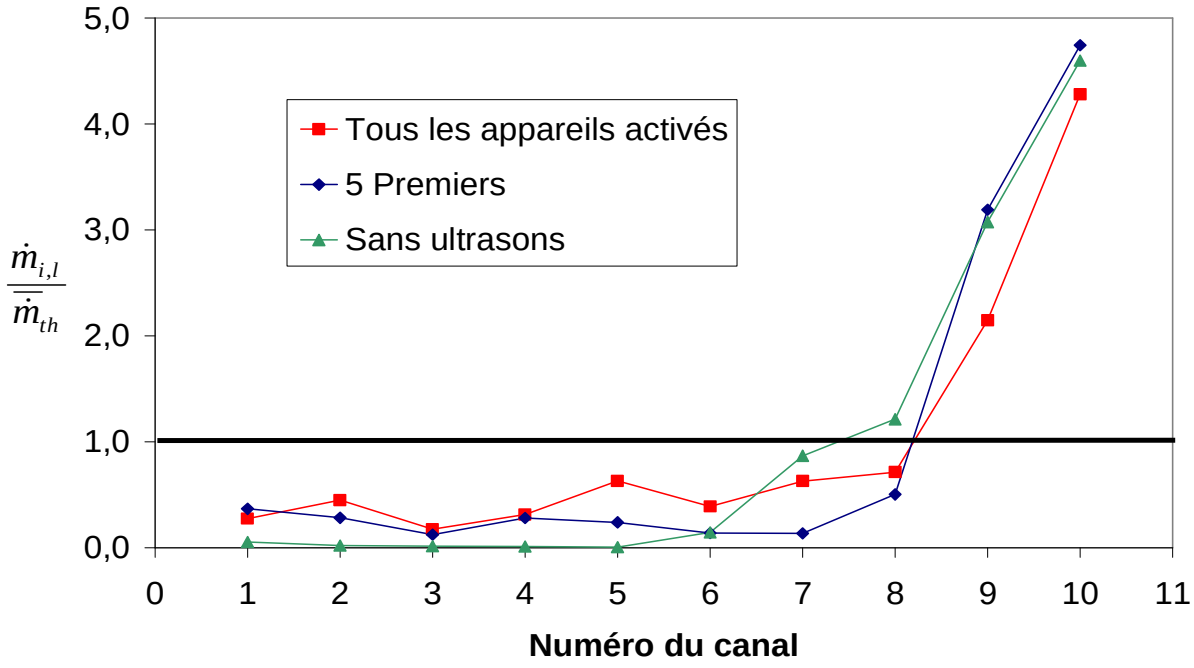


Figure IV- 87 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons et avec les cinq premiers activés pour Q_{eau} = 250 kg/h dans la configuration 1.

Après avoir analysé ces résultats, il faut aussi s'intéresser à l'influence que peut avoir le débit d'eau sur ces différences entre les deux configurations. Cette étude a est faite en comparant la figure précédente avec la Figure IV- 88 qui montre les résultats pour un débit d'eau plus important : 500 kg/h mais avec le même débit d'air.

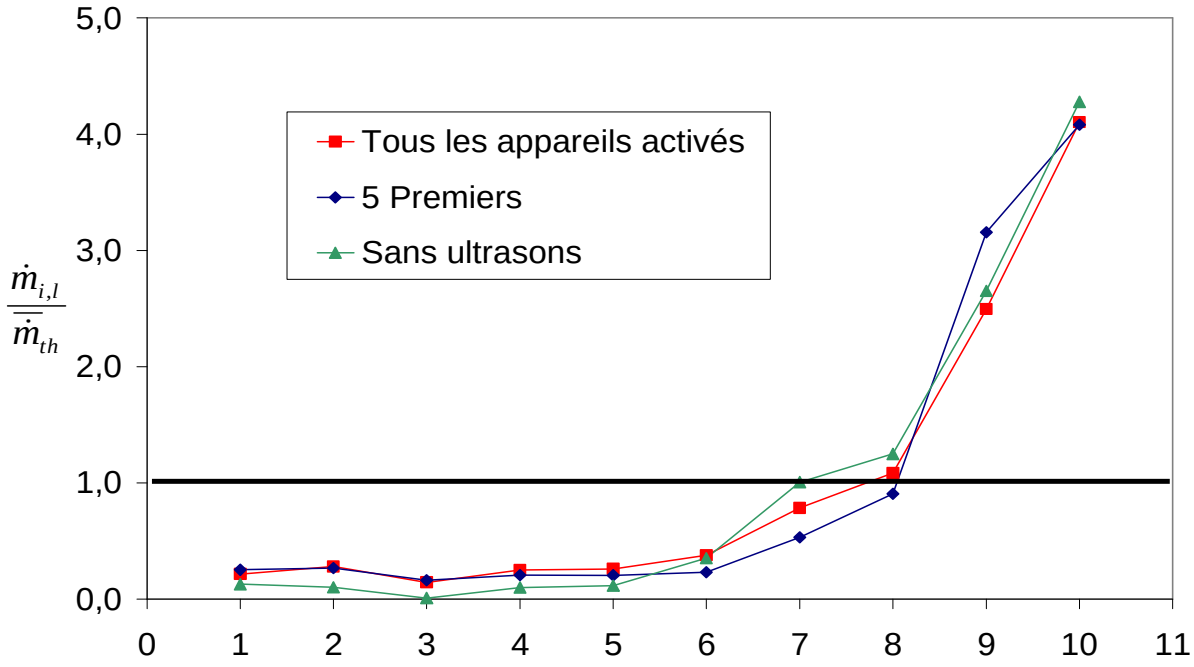


Figure IV- 88 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons à celle avec les cinq premiers activés pour Q_{eau} = 500 kg/h dans la configuration 1.

La différence de ce graphique avec celui de la Figure IV- 87 est au niveau du cinquième canal. Le débit parcourant ce canal est en effet presque le même avec tous les ultrasons et

avec uniquement les cinq premiers. L'augmentation du débit liquide semble donc permettre une alimentation de tous les canaux en face des fontaines. Ces fontaines sont en effet emportées et décalées par l'écoulement liquide d'une manière plus significative à fort débit liquide. Les tendances en fond du distributeur sont les mêmes à fort et à faible débit. Encore une fois, une amélioration est visible mais elle est moins importante que pour tous les appareils activés.
Ces résultats sont faits pour la première configuration des vannes et donc un débit d'air faible. Des essais complémentaires ont été faits pour la seconde configuration pour ainsi voir l'évolution des profils pour un débit d'air plus important. La distribution obtenue pour un débit liquide de 250 kg/h est présentée sur la Figure IV- 89.

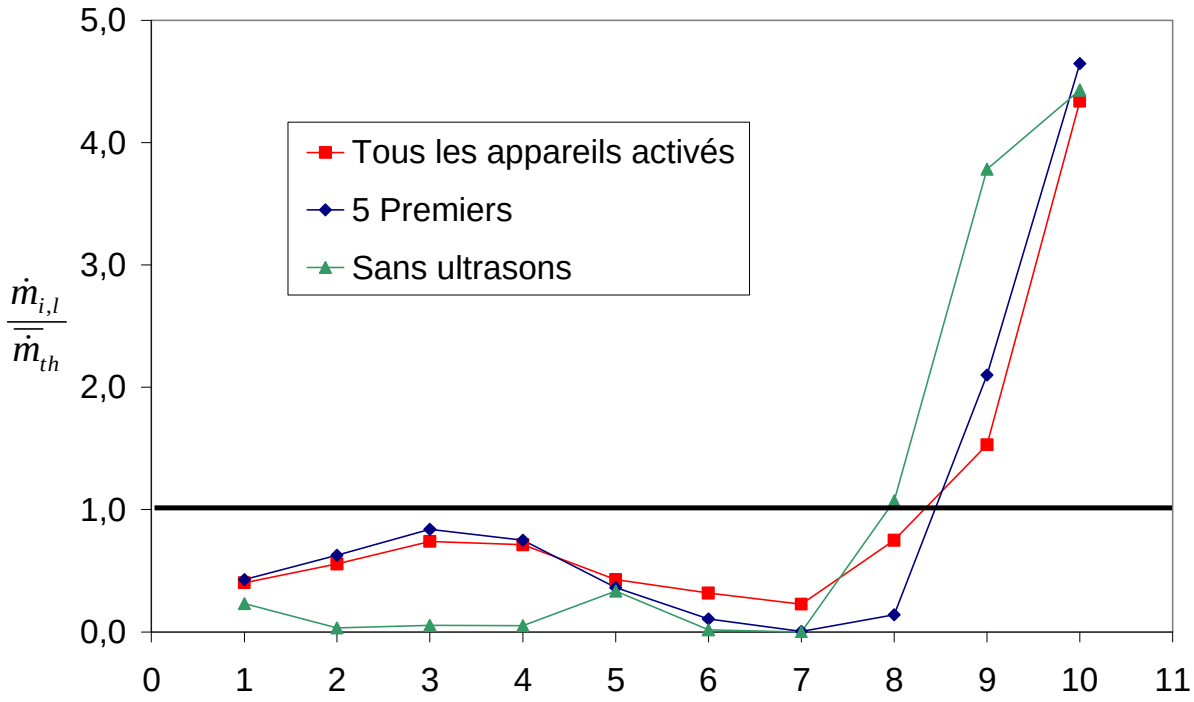


Figure IV- 89 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons à celle avec les cinq premiers activés pour Q_{eau} = 250 kg/h dans la configuration 2.

Les deux courbes sont sensiblement les mêmes jusqu'au cinquième canal ; à partir du sixième, une différence de ratio est observée. Cette nuance par rapport à la configuration 1 est liée au débit d'air plus important. En effet, cette augmentation du débit gazeux permet de détacher une plus grande quantité de gouttes des fontaines, ce qui entraîne plus de liquide vers les canaux en aval. Cet effet a notamment déjà été étudié précédemment, en montrant la différence du comportement des fontaines à faible et à fort débit gazeux. Des essais ont également été faits pour un débit liquide plus important, 500 kg/h, afin de voir pour ce cas là aussi, l'influence du débit liquide. Ces résultats sont exposés sur la Figure IV- 90.
Les tendances sont très intéressantes car elles montrent une distribution avec uniquement cinq générateurs d'ultrasons, pratiquement identique à celle où ils sont tous en marche. La combinaison d'un débit liquide important et d'un débit gazeux lui aussi important permet de minimiser le besoin en appareils. En effet, sur cet essai, les cinq derniers générateurs d'ultrasons sont pratiquement inutiles, ce qui permet donc d'économiser de l'énergie pour les faire fonctionner. Cette observation est très intéressante car elle permet de dire que le système peut être actif en actionnant par exemple telle ou telle fontaine en fonction des paramètres opératoires en entrée de l'échangeur. Cela montre également que les conditions opératoires sont importantes pour le dimensionnement du système avec ultrasons.

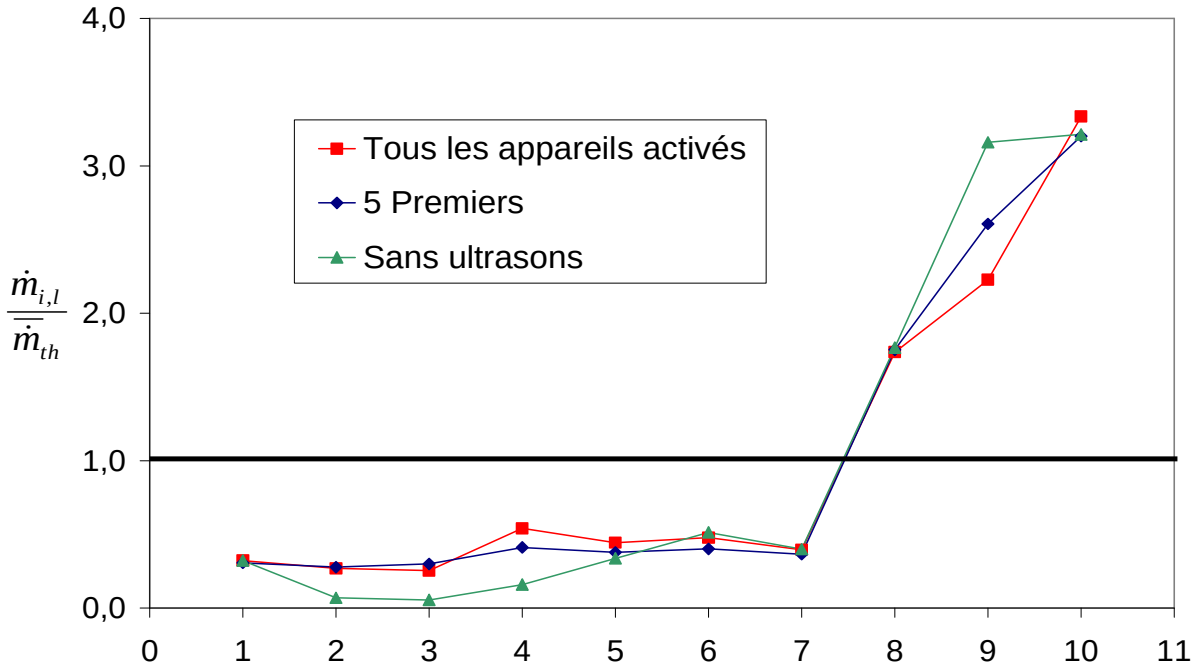


Figure IV- 90 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons avec celle où les cinq premiers sont activés pour Q_{eau} = 500 kg/h dans la configuration 1.

Afin de comparer l'ensemble des résultats liés à cette configuration des ultrasons, le coefficient STD est calculé pour chaque essai. Les valeurs de ce coefficient sont reportées sur le graphique de la Figure IV- 91. Les tendances observées sont en accord avec les analyses précédentes comparant les deux dispositions. Les courbes suivent la même tendance que cela soit avec la première moitié des générateurs d'ultrasons en marche soit avec la totalité. La courbe avec la nouvelle configuration étant bien sûr située à des valeurs plus importantes.

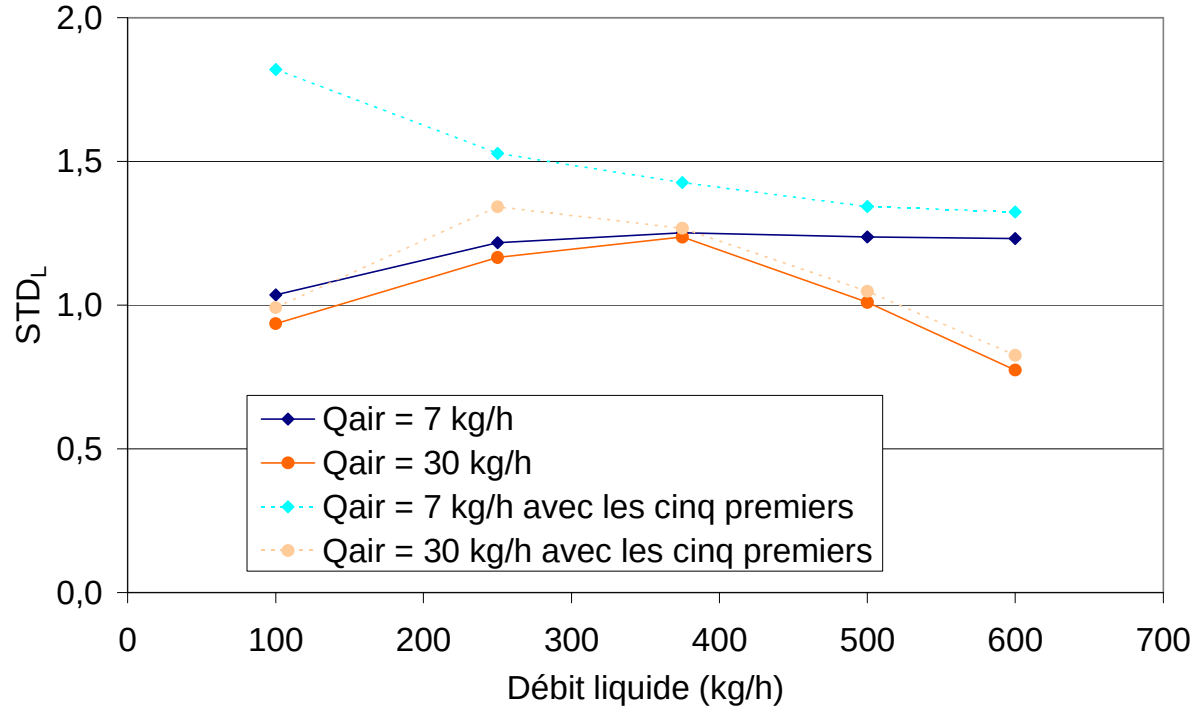


Figure IV- 91 : Évolution du coefficient STD_L en fonction du débit liquide pour les deux configurations forcées et pour les essais avec les cinq premiers générateurs d'ultrasons en marche.

Les tendances intéressantes apparaissent avec l'augmentation du débit liquide. L'écart entre les deux courbes diminue, ce qui montre encore une fois l'influence du débit liquide sur les fontaines. D'autre part, les différences entre les courbes pour la configuration 2 sont moins importantes que pour celles de la configuration 1. Même si les vannes ne sont pas fermées de la même manière, l'air joue clairement un rôle sur le comportement des fontaines dans le distributeur et donc sur la distribution de l'eau. L'augmentation du débit liquide est aussi synonyme d'une zone noyée plus grande et donc d'une zone plus importante où les générateurs d'ultrasons sont inutiles. Cela aboutit alors à réduire le nombre d'appareils nécessaires à cinq. Un graphique de ce type peut également servir pour une utilisation active du procédé des ultrasons dans le distributeur, afin de savoir quand activer ou désactiver les cinq derniers générateurs d'ultrasons.

2.3.2. Influence des cinq derniers générateurs d'ultrasons.

Ces précédentes expériences doivent ainsi être complétée en analysant l'impact de l'activation de seuls les cinq derniers générateurs dans le distributeur. Cette étude supplémentaire permet de voir si la mise en marche de seuls ces appareils permet d'obtenir les mêmes débits dans les canaux situés en face par rapport au cas avec tous les générateurs d'ultrasons activés. Les résultats pour un débit liquide de 250 kg/h dans la configuration 2 sont présentés sur la Figure IV- 92.

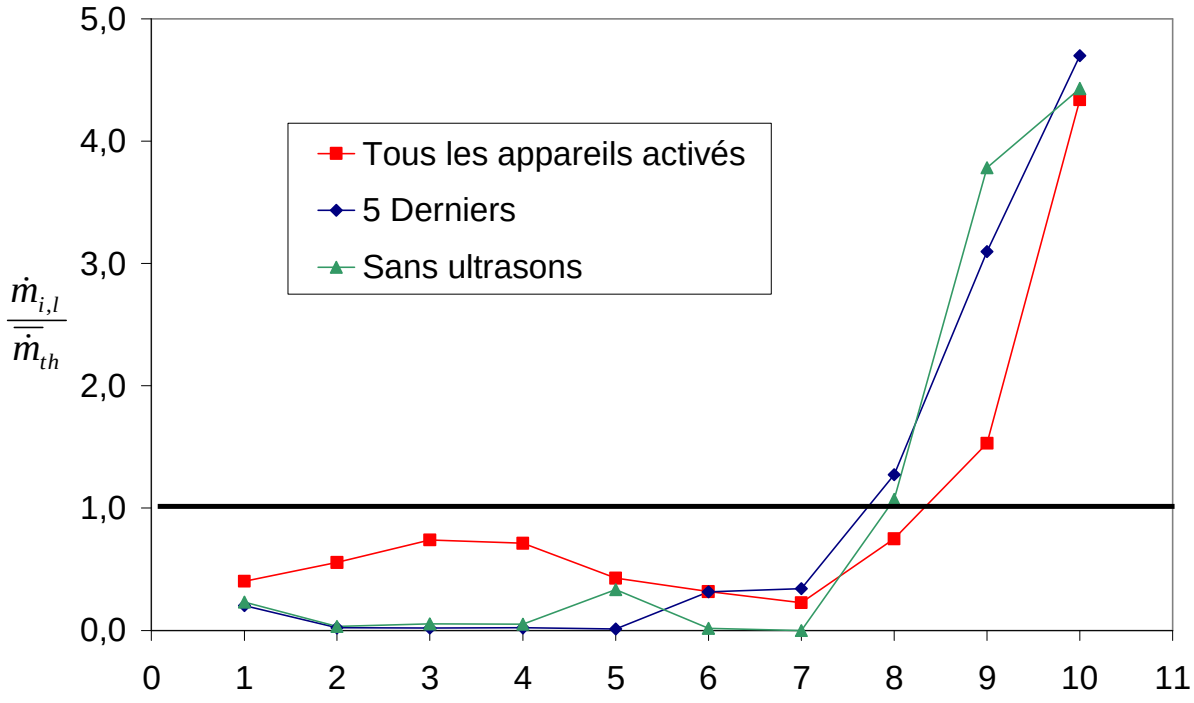


Figure IV- 92 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons avec celle où les cinq derniers sont activés pour Q_{eau} = 250 kg/h dans la configuration 1.

Ce graphique permet d'observer que dès le canal 6 où le premier appareil est activé, le débit parcourant le sixième est le même avec les cinq derniers et tous les générateurs ultrasons. Cette remarque signifie que les précédentes fontaines ne jouent donc pas un rôle sur le débit parcourant les canaux suivants. Cependant il faut relativiser cette observation car dans ce cas, une plus grande quantité de liquide arrive au niveau du sixième canal dans le distributeur que lorsque tous les générateurs d'ultrasons sont activés. La fontaine se comporte alors différemment. L'entrainement de la fontaine au niveau de la sixième fontaine est plus

important lorsque seuls les cinq derniers générateurs sont activés (cf. Partie 4.1). Cette différence de débit se voit notamment sur les canaux en aval qui sont moins alimentés en eau lorsque seuls les cinq derniers générateurs sont activés. Ces tendances ont été observées quel que soit le débit liquide. Les résultats permettent de compléter ceux obtenus avec les cinq premiers générateurs d'ultrasons.

2.3.3. Influence des générateurs d'ultrasons pairs et impairs.

Les deux dernières configurations testées sont similaires et intermédiaires entre le cas sans aucun générateur activé et celui avec tous. La première de ces deux configurations consiste à faire fonctionner tous les appareils en face des canaux pairs, et la seconde, en face de tous les canaux impairs.
Les résultats de la distribution liquide pour l'activation des générateurs présents en face des canaux impairs sont regroupés sur la Figure IV- 93 avec un débit d'eau de 500 kg/h dans la configuration 1.

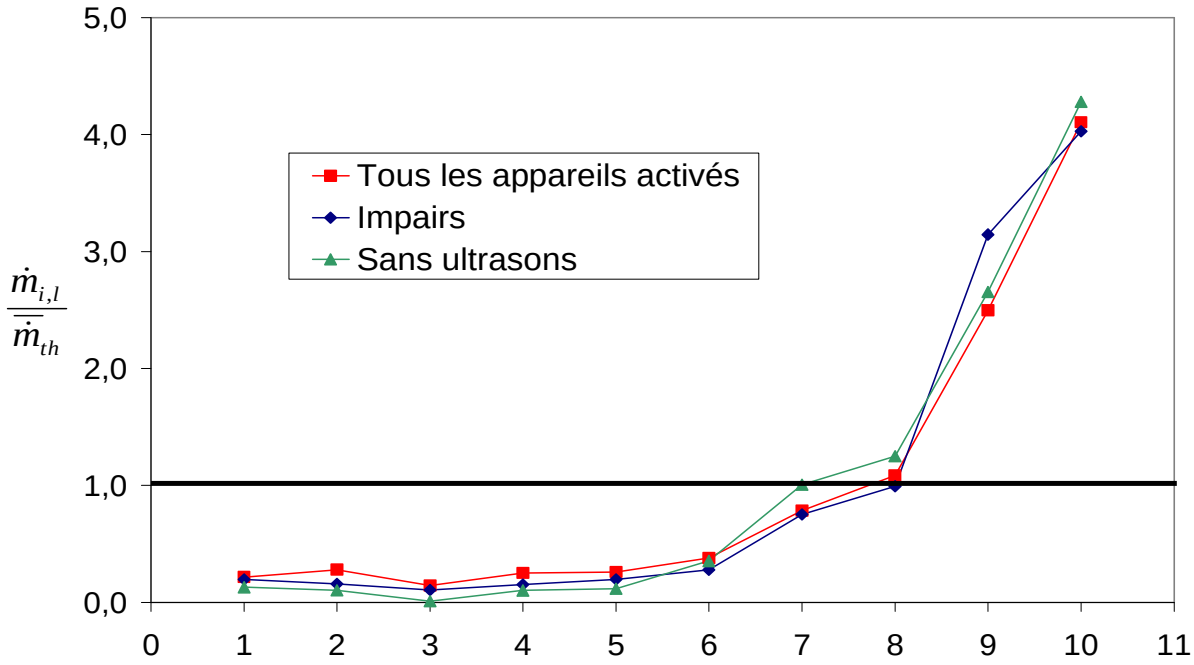


Figure IV- 93 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons et avec ceux en face des canaux impairs activés pour Q_{eau} = 500 kg/h dans la configuration 1.

Les ratios mesurés montrent bien une distribution située entre les deux extrêmes. Les ultrasons dans ce cas améliorent la distribution mais pas aussi bien que lorsque les dix générateurs sont activés. Cette remarque peut être faite quel que soit le débit liquide en entrée et peut également être faite sur la configuration avec les générateurs activés en face des canaux pairs présentée sur la Figure IV- 94.

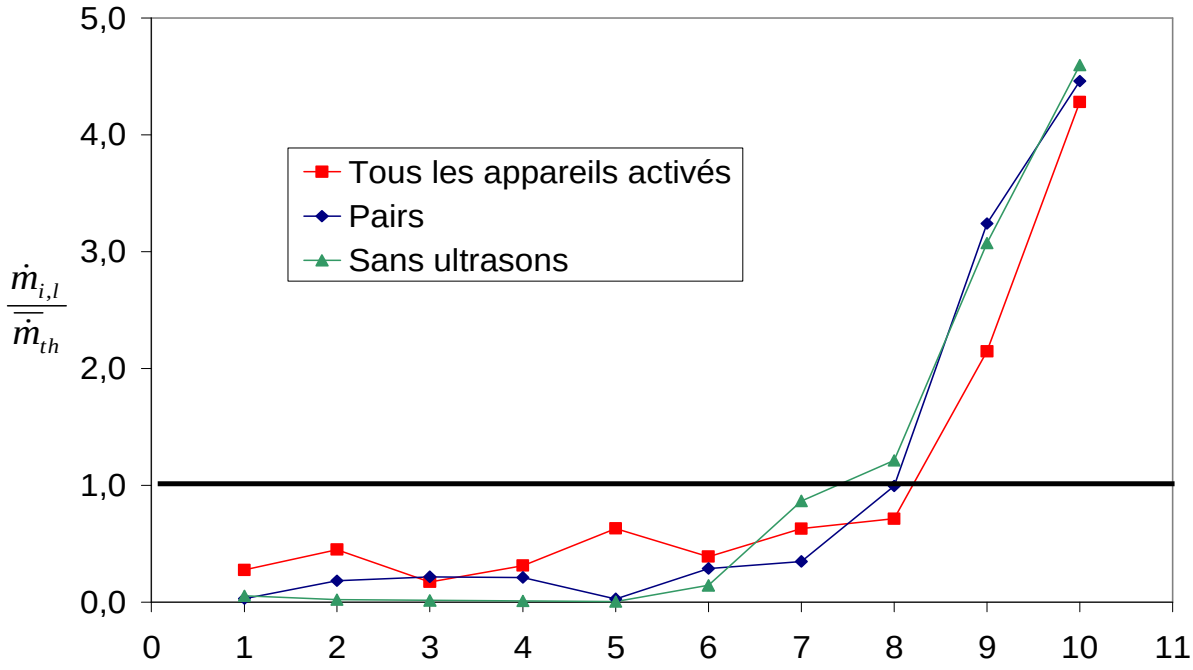


Figure IV- 94 : Comparaison de la distribution liquide avec tous les générateurs d'ultrasons et avec ceux en face des canaux pairs activés pour Q_{eau} = 250 kg/h dans la configuration 1.

Ces deux configurations particulières n'apportent pas d'amélioration supplémentaire car comme analysé précédemment, ce sont surtout les premiers générateurs d'ultrasons qui agissent sur l'ensemble de la distribution. Les résultats liés à ces essais n'ont pas révélé de comportement particulier des fontaines. Ils ont montré cependant que l'entraînement des fontaines n'est pas suffisant pour aller d'un canal à un autre au point de ne faire marcher que 50% des appareils.

2.3.4. Conclusion partielle.

Cette étude paramétrique du nombre et de la position des générateurs d'ultrasons a permis de montrer l'effet de chaque appareil sur la distribution. L'amélioration apportée par chaque générateur d'ultrasons semble avoir un effet localisé. Il a été observé à travers les différentes configurations de générateurs que, dans aucun des cas, les mêmes performances qu'avec les dix appareils étaient atteintes. Néanmoins en étudiant plus précisément les résultats il est apparu que lorsque seuls les cinq premiers étaient activés, le coefficient STD pouvait tendre vers la même valeur qu'avec tous les générateurs activés. Avec l'aide des visualisations il a été observé que cette tendance correspondait à l'augmentation de la zone noyée en fond de distributeur. D'après les essais avec les cinq derniers générateurs activés, il a été remarqué que les appareils de cette zone ne créent pas de modification d'alimentation pour les canaux en vis-à-vis. De ce fait, la tendance à présenter des résultats similaires est logique car seuls les premiers appareils peuvent créer une fontaine, qui est nécessaire pour la modification de la distribution.
Les essais effectués en activant un générateur sur deux ont également permis d'observer un point intéressant. Les débits parcourant les canaux en face de chaque fontaine étaient différents de ceux lorsque tous les appareils étaient activés. En effet, une combinaison d'une perturbation amont et d'une fontaine en vis-à-vis du canal semble nécessaire pour obtenir l'amélioration maximale pour le canal considéré. Une simulation de l'amont du distributeur

est effectuée dans la partie suivante, en fermant les premiers canaux en gardant la possibilité d'activer les générateurs d'ultrasons dans cette zone.

2.4 Influence du nombre de canaux dans le distributeur.

La fermeture de plusieurs canaux en début de distributeur permet d'étudier l'influence de deux paramètres. Le premier concerne la position des appareils à ultrasons en amont des canaux. En effet, en fermant les premiers canaux par le bais des vannes, le distributeur est alors réduit. Les appareils placés en face des premiers canaux fermés peuvent alors être considérés comme étant avant le distributeur. Le deuxième paramètre est la longueur du distributeur. Cette longueur correspond au nombre de canaux ouverts, sachant que les canaux fermés étaient à chaque fois les premiers. Chaque configuration a nécessité un réglage des vannes pour créer la distribution proche de celles observées dans la littérature. Trois configurations ont été testées : sept, cinq et trois canaux ouverts.

Pour ces analyses, deux conditions opératoires ont été choisies : soit un débit d'eau de 100 kg/h soit de 250 kg/h, le débit d'air ayant été gardé constant à 20 kg/h. Ce choix de garder le débit gazeux constant entre les deux essais est lié à la volonté de changer le moins possible la configuration des vannes entre les différents essais avec un nombre de canaux différent. Les deux débits utilisés sont les seuls qui étaient possibles dans ces conditions. En effet, un débit de 375 kg/h provoquait une pression trop importante dans la section d'essais.

Concernant l'étude des ultrasons pour ces configurations, quatre configurations avec les ultrasons ont été testées pour ces deux conditions expérimentales. En considérant que *n* canaux sont ouverts, les essais suivants ont été réalisés avec les ultrasons.

- Les *n* derniers appareils activés en face des *n* canaux ouverts
- Les *n*+1 derniers appareils activés
- Les 10-*n* premiers activés
- Tous les générateurs d'ultrasons en marche (10)

Pour mieux comprendre ces différentes configurations, le schéma de la Figure IV- 95 expose les quatre dispositions lorsque les sept derniers canaux sont ouverts.

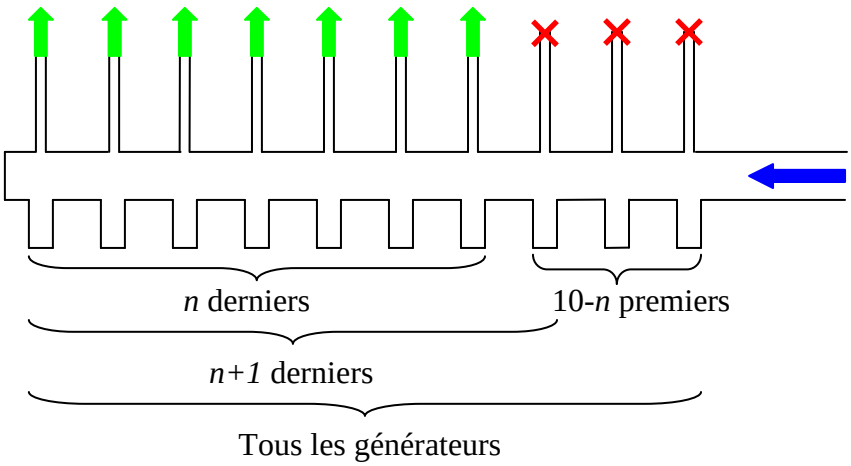


Figure IV- 95 : Schéma des différentes configurations des générateurs d'ultrasons.

Le premier cas permet de se mettre dans les mêmes conditions que les essais précédents, un appareil en face de chaque canal, aucun en amont. Le deuxième cas rajoute un générateur d'ultrasons en amont du distributeur et permet de voir son influence, notamment sur le débit parcourant le premier canal ouvert. Le troisième cas permet de voir l'effet des générateurs d'ultrasons uniquement en amont du distributeur. Ceci permet d'observer si cette modification peut dans certains cas, améliorer la distribution sur l'ensemble du distributeur. Ceci est fait dans l'optique de savoir si les ultrasons doivent forcément être générés dans le distributeur ou plutôt en amont. Le dernier cas permet de regrouper tous les cas précédents afin de voir si une économie du nombre de générateur d'ultrasons peut être réalisée.

Ces essais permettent d'étudier les possibles positions d'implémentation des appareils, ainsi que le nombre de générateurs d'ultrasons nécessaires pour différentes conditions opératoires et différentes configurations d'échangeur. Tous les axes des abscisses des graphiques de cette partie sont numérotés à partir de 1, qui correspond au premier canal ouvert.

2.4.1. Analyse des profils de distribution.

L'étude porte donc principalement sur l'influence du nombre de générateurs activés sur la qualité de la distribution plutôt que sur l'effet des conditions opératoires. L'analyse sera alors faite directement en comparant l'essai sans ultrasons avec ceux où ils sont activés. Le premier cas étudié est celui avec le plus grand nombre de canaux ouverts, c'est-à-dire sept. Les résultats de la distribution liquide en fonction de ces différentes configurations sont présentés sur la Figure IV- 96.

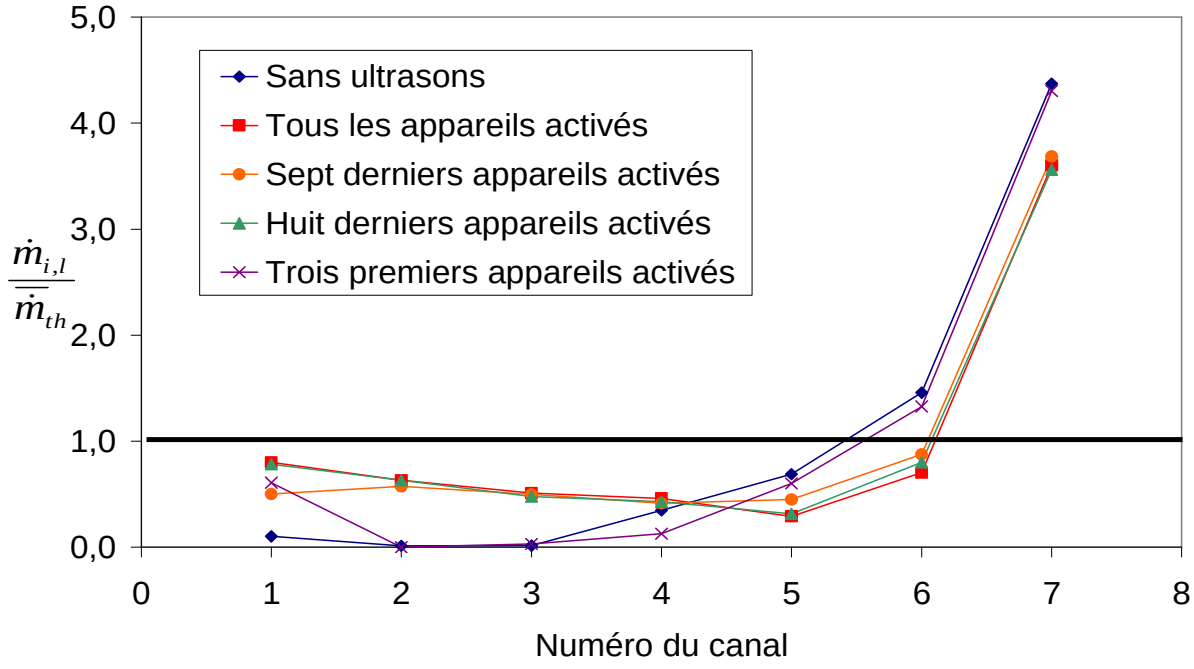


Figure IV- 96 : Profils des distributions liquide en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 250 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h.

La courbe de base, celle sans ultrasons, est représentée en bleu. La distribution observée est similaire à celles de la littérature où seuls les canaux de la seconde partie du distributeur sont alimentés. La deuxième courbe, en rouge, correspond au cas où les dix générateurs d'ultrasons sont actifs. Les résultats sont similaires à ceux où les dix canaux sont ouverts, à savoir que les premiers canaux deviennent alimentés grâce aux ultrasons. Toutefois, une

différence apparaît au niveau du premier canal ouvert, où l'on observe une augmentation significative du débit d'eau le parcourant. Une amélioration nette est donc observée dans ce cas, par comparaison à celui où les générateurs d'ultrasons n'étaient pas en amont du distributeur.
La troisième courbe, celle en orange, représente le cas où seuls les générateurs d'ultrasons en face des canaux ouverts sont en marche. Une amélioration de la distribution liquide est observée mais le premier canal est moins alimenté que lorsque tous les appareils fonctionnent.
De cette observation, découle un nouvel essai représenté par la quatrième courbe en vert, dans lequel le générateur d'ultrasons précédant le premier canal ouvert est également actionné. Ce changement permet alors de retrouver une distribution quasiment identique à celle trouvée avec les dix générateurs d'ultrasons. Cette remarque est très intéressante pour la gestion des appareils et leur implémentation dans de futurs échangeurs dans cette configuration. En effet, le fait de réduire le nombre d'appareils nécessaires pour arriver à l'amélioration maximale permet de réduire la puissance utilisée par cette technique. Le fait que des générateurs d'ultrasons en amont des canaux ouverts, et donc du distributeur, jouent un rôle sur la distribution est également pertinent car cela montre une possibilité d'implémentation supplémentaire des générateurs. Cependant, il faut noter que l'ajout d'appareils en amont diminue le débit passant en fond de distributeur conformément à l'objectif fixé.
Pour discriminer l'effet des générateurs placés en amont de celui de ceux situés dans le distributeur, un essai a été réalisé dans lequel seuls les appareils précédents les canaux sont en marche. Il peut être remarqué sur la figure 96 (courbe violette) que mis à part pour le premier canal il est retrouvé une distribution proche de celle obtenue sans ultrasons. Ceci montre la nécessité d'avoir à la fois des appareils en amont et dans le distributeur. La valeur du débit dans le premier canal est augmentée par rapport au cas où il n'y pas de générateurs en amont mais elle n'atteint pas le même niveau que dans les cas où huit ou dix générateurs d'ultrasons sont en marche. Cette observation met bien en évidence l'effet de l'appareil faisant face à un canal ainsi que l'effet de celui faisant face au canal précédent. En effet, la fontaine générée par le canal précédent est emportée par la phase gazeuse et peut alimenter le canal suivant. Dans cette expérience, la meilleure disposition des générateurs est celle où les huit derniers sont activés. Ce nombre peut même être diminué. En effet, des essais pour un débit liquide de 250 kg/h et un débit d'air de 20 kg/h ont montré que les derniers générateurs d'ultrasons pouvaient être désactivés. Lorsque les deux derniers appareils sont désactivés, la distribution reste inchangée. Un changement s'opère lorsque les trois derniers sont désactivés. Le coefficient STD_L passe d'une valeur de 0,67 pour le dernier ou les deux derniers éteints à 0,74 pour les trois derniers. En étudiant la photo du distributeur pour ces conditions d'entrée et lorsque tous les ultrasons sont activés, cette prédiction pouvait être faite, car la zone noyée se situe au niveau des deux derniers canaux.

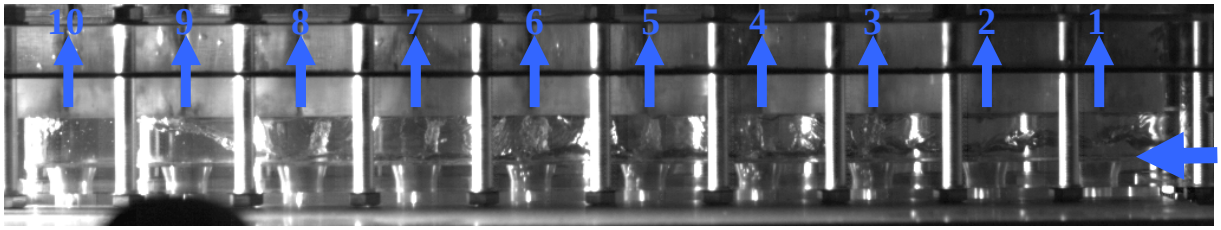


Figure IV- 97. : Photo du distributeur pour un essai avec les deux derniers appareils désactivés.

Cette modification montre une possible régulation des appareils en fonction de la nature de l'écoulement dans le distributeur et plus précisément de la zone « noyée ». Ceci permet de faire une économie en termes de puissance nécessaire pour améliorer la distribution mais

également sur la durée de vie de ces générateurs d'ultrasons. Cependant cette régulation demande de connaître le profil de l'écoulement au sein du distributeur.

La distribution de la phase gazeuse a aussi été mesurée et est exposée sur la Figure IV- 98. Les tendances constatées sur ces profils sont de faibles ampleurs. En effet, la répartition de l'air est sensiblement la même pour les différentes configurations. Néanmoins, celle pour laquelle seuls les générateurs d'ultrasons en amont sont activés se démarque légèrement des autres, l'écoulement étant moins bien distribué. Ceci est notamment lié à l'alimentation liquide plus importante à ce niveau du distributeur. Pour les autres essais une faible augmentation de l'alimentation du premier canal est remarquée, au détriment de ceux du milieu du distributeur. Ceci est bien sûr la conséquence du changement de la distribution de la phase liquide qui est plus importante pour ces canaux, ce qui force la phase gazeuse à passer dans ce premier canal.

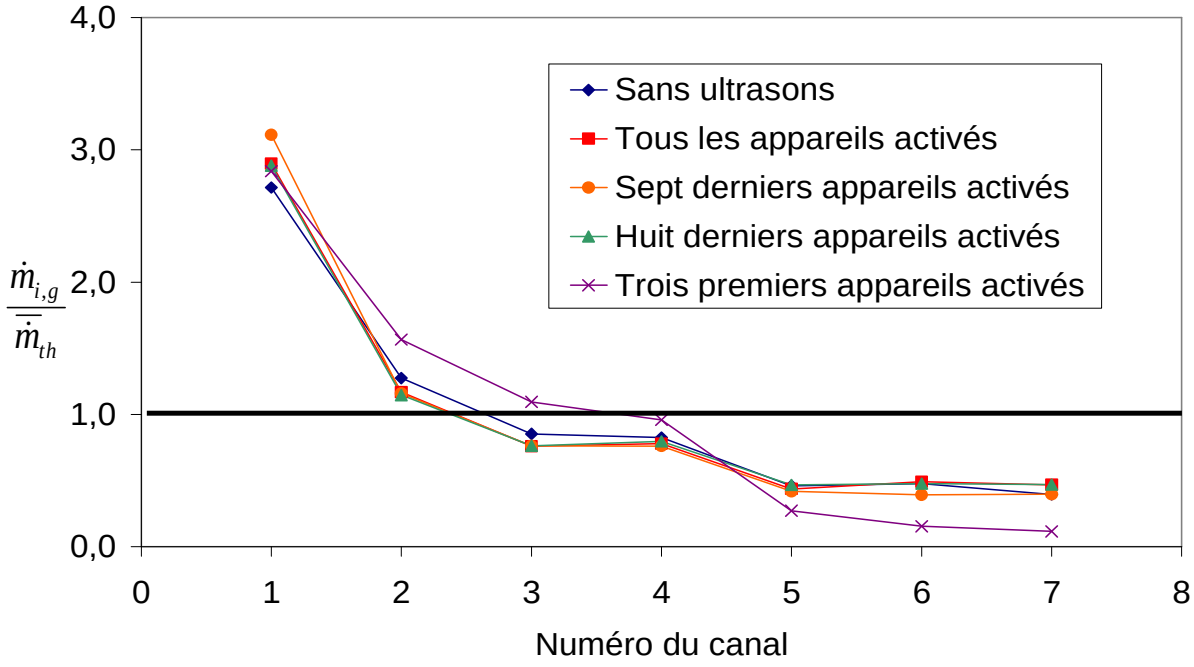


Figure IV- 98 : Profils des distributions gazeuses en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 250 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h.

Comme décrit précédemment, des essais ont également été réalisés pour un débit d'eau plus faible : 100 kg/h et un débit gazeux identique de 20 kg/h. Les résultats correspondant à ces conditions expérimentales sont exposés sur le graphique de la Figure IV- 99.

Pour ce débit liquide moins important, le même profil de distribution sans les générateurs d'ultrasons est retrouvé lorsque seuls ceux en amont sont activés. Seuls les deux derniers canaux sont alimentés, ainsi que le premier. Une différence notable est cependant observable lorsque les ultrasons sont activés. En effet, l'activation des ultrasons change totalement la distribution. La première observation concerne les canaux sous-alimentés, qui deviennent même suralimentés pour les premiers, mais dans l'ensemble la répartition des débits semble meilleure. La deuxième remarque concerne la symétrie de la distribution qui s'est inversée, en suralimentant les premiers et alimentant beaucoup moins les derniers canaux. Une alimentation décroissante des canaux est alors visible. Pour ce cas particulier, le comportement de l'écoulement dans le distributeur est similaire à celui obtenu pour les mêmes conditions en entrée lorsque la configuration était forcée à 30 kg/h (Figure IV- 66). En

effet, la zone noyée à la fin du distributeur disparaît, ce qui laisse place à une phase liquide ne remplissant que la partie inférieure du distributeur. L'écoulement dans les canaux est alors principalement géré par les fontaines. Le débit liquide est plus important à l'entrée du distributeur qu'au niveau des derniers générateurs d'ultrasons, de ce fait, les fontaines sont alors mieux générées pour les premiers canaux. L'alimentation est donc meilleure en début de distributeur et le débit liquide étant moins important de canal en canal, l'efficacité des fontaines diminue alors petit à petit.

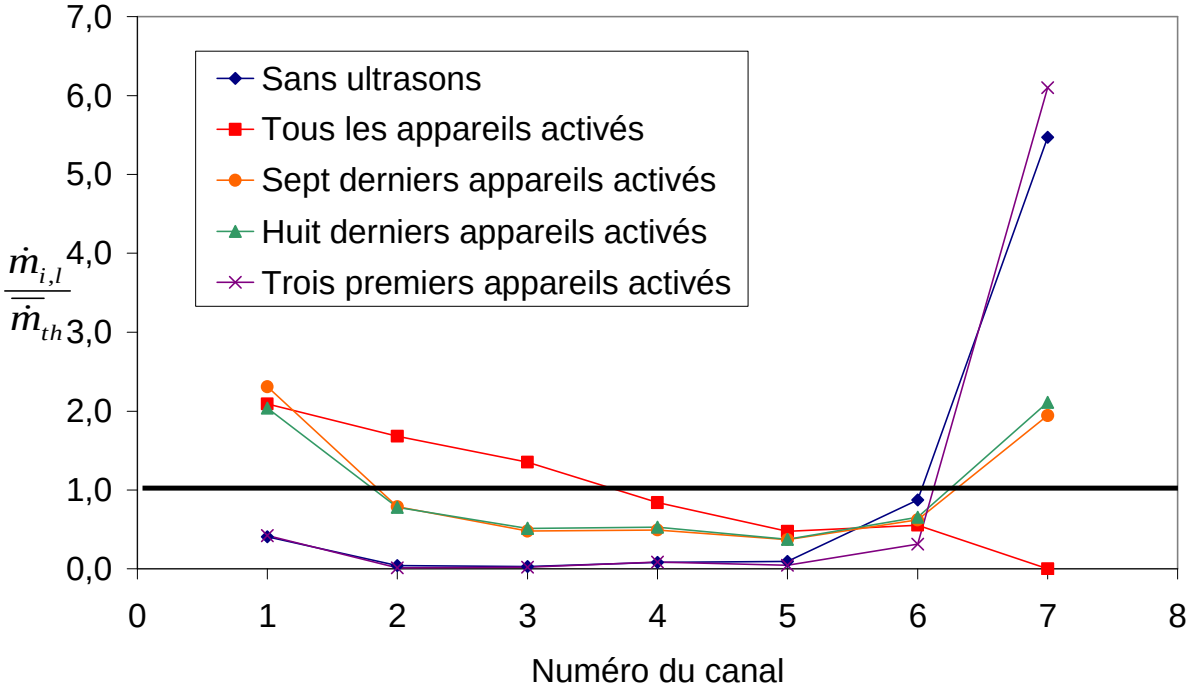


Figure IV- 99 : Profils des distributions liquide en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h.

Les expériences précédentes montrent que sept ou huit générateurs d'ultrasons sont insuffisants pour enlever la zone noyée au fond du distributeur. Cependant, ils permettent d'en réduire fortement son volume, au point de réduire de pratiquement trois fois le débit passant dans le dernier canal par rapport à l'essai sans ultrasons. La présence de cette zone en fond de distributeur explique également la différence d'alimentation des canaux intermédiaires. En effet, l'écoulement dans les canaux n'est pas uniquement guidé par les fontaines. De ce fait, la différence entre les canaux intermédiaires est équivalente à la différence de débit passant dans le dernier canal. Enfin, la dernière configuration, utilisant uniquement les trois premiers générateurs donne encore une distribution liquide dégradée. La phase gazeuse entraînant encore les gouttes vers le fond du distributeur et sa zone noyée, alimente donc plus le dernier canal que dans l'essai sans ultrasons.

L'étude complémentaire de ces conditions opératoires avec la phase gazeuse est résumée par le biais de la Figure IV- 100. Les courbes présentes sur ce graphique peuvent être groupées en deux catégories. La première correspond à une distribution qui est décroissante tout au long du distributeur et la seconde montre une alimentation forte du dernier canal. La première catégorie s'applique à l'essai sans ultrasons et à celui où seuls les générateurs d'ultrasons en amont sont activés. La différence observée avec la seconde catégorie concorde avec les différences remarquées pour la phase liquide, à savoir une alimentation des canaux en eau décroissante le long du distributeur ; de ce fait, l'air peut passer dans les derniers canaux

dépourvus en eau. Au regard de ces profils il est difficile de déterminer dans quelles conditions est obtenue la meilleure distribution de l'air.

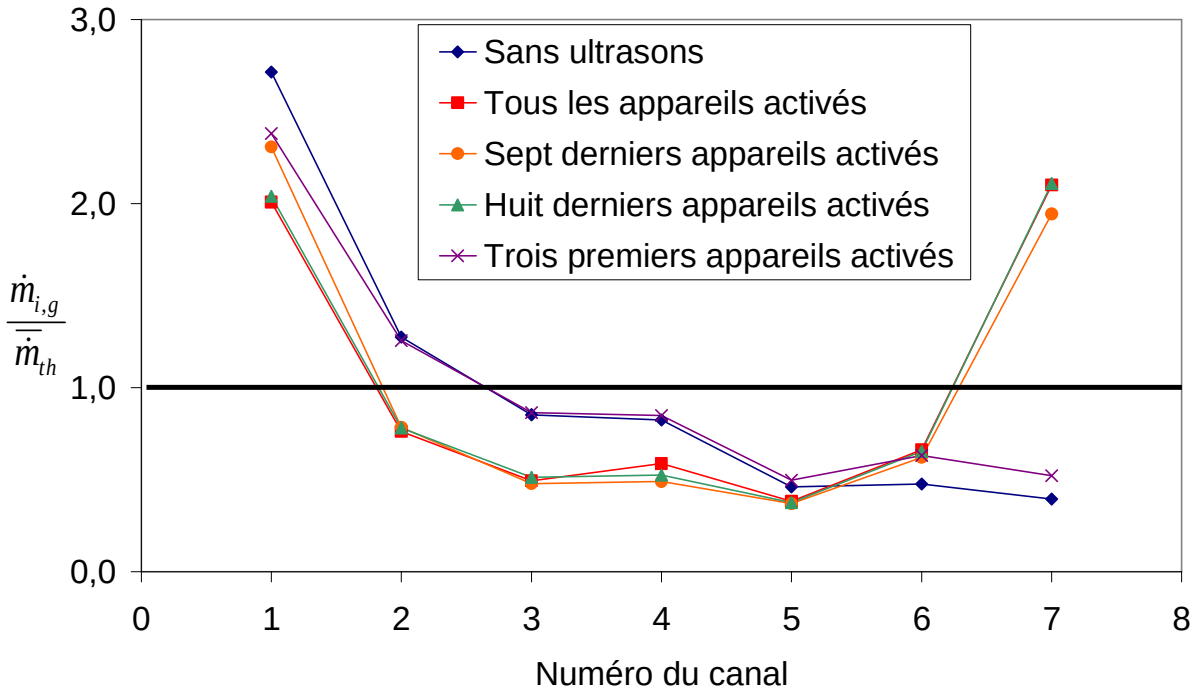


Figure IV- 100 : Profils des distributions gazeuses en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h.

2.4.2. Approche statistique de la distribution.

Les différentes configurations des générateurs d'ultrasons ont provoqué les mêmes effets sur la distribution, quel que soit le nombre de canaux ouverts. La présence d'un appareil en amont d'un canal permet d'augmenter le débit passant dans celui-ci. L'utilisation des générateurs d'ultrasons en amont du distributeur mélange une partie de la phase liquide à la phase gazeuse, diminuant le volume de la zone noyée dans le fond du distributeur. Les différents profils de distribution liquide ou gazeuse pour un moins grand nombre de canaux ouverts ne sont donc pas présentés dans cette partie du chapitre. Néanmoins, leur étude est faite à l'aide des coefficients statistiques déjà utilisés précédemment. En effet, ces différents coefficients sont calculés pour chaque essai. Certes, l'écart-type sur une distribution pour trois canaux est moins pertinent que sur dix mais, c'est un moyen simple de comparaison des différentes distributions entre elles sans avoir à présenter les profils un par un.

Les résultats du coefficient STD pour la phase liquide sont présentés sur l'histogramme de la Figure IV- 101. Les trois études avec un nombre de canaux ouverts différent sont regroupées dans cette figure.

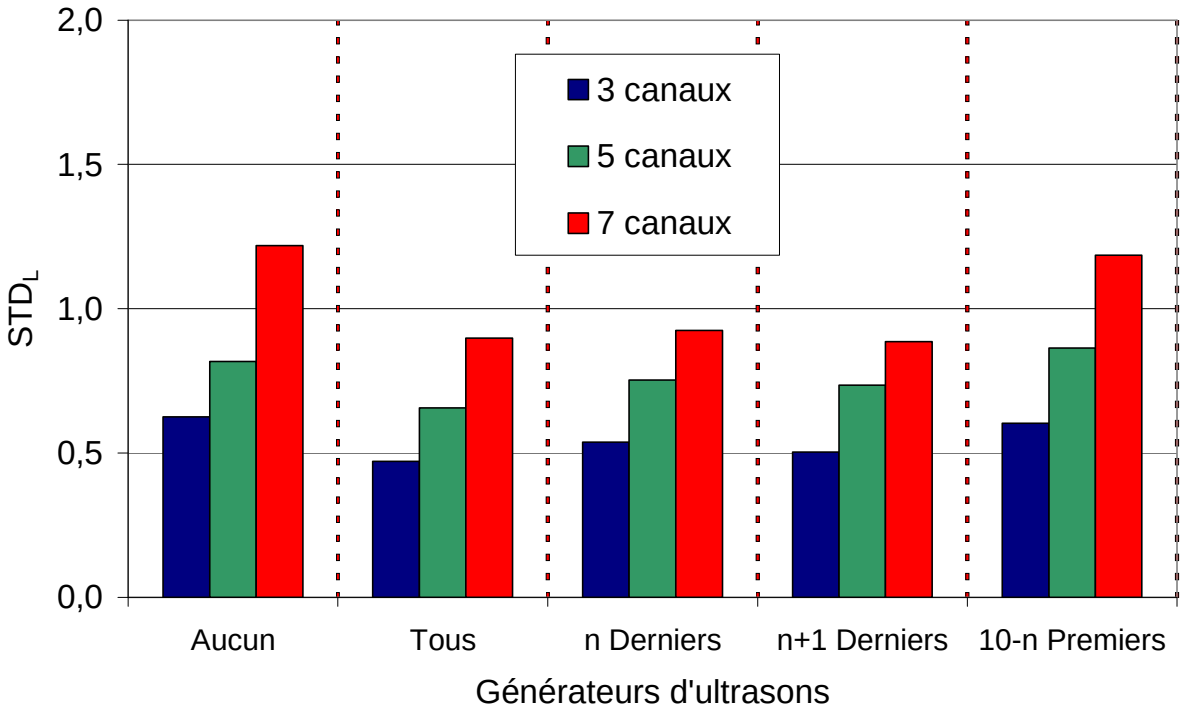


Figure IV- 101 : Coefficient STD_L en fonction des différentes configurations des générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 250 kg/h.

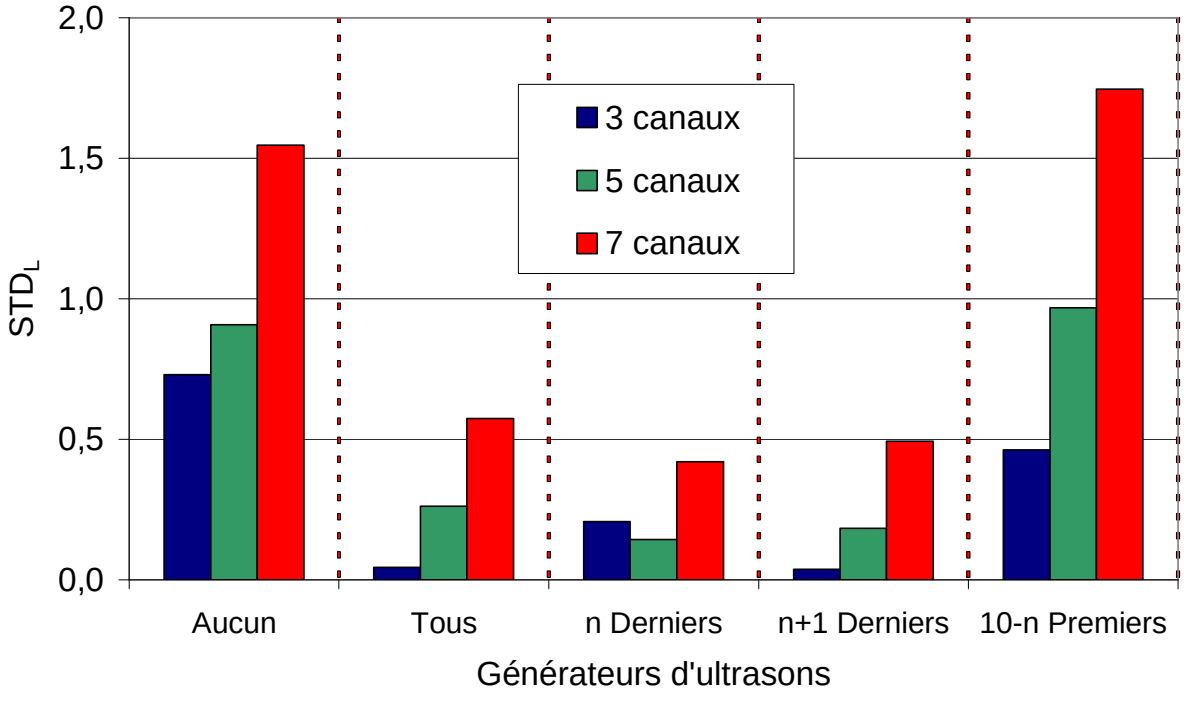


Figure IV- 102 : Coefficient STDL en fonction des différentes configurations des générateurs d'ultrasons pour Qeau = 100 kg/h.

Une hiérarchie entre les trois configurations est observée pour tous les essais. Ceci peut sembler logique car le coefficient STD calculé pour moins de canaux sur une distribution similaire sera mathématiquement moins grand. En effet, le ratio moyen est toujours de un

mais le débit correspondant à ce ratio est plus élevé pour un nombre de canaux moins important. Ceci a donc pour conséquence de réduire la valeur maximale du ratio possible et donc l'écart par rapport à la moyenne. Ainsi, l'écart-type calculé sera plus petit pour trois canaux ouverts plutôt que cinq ou encore sept. Conformément aux profils étudiés dans les précédents graphiques, les conditions avec lesquelles le coefficient de dispersion est le maximal sont lorsqu'il n'y a aucun ultrason et également lorsque seuls les générateurs d'ultrasons amont sont en marche. Cette tendance se confirme quel que soit le nombre de canaux ouverts. La différence entre les trois autres essais (tous les ultrasons, les n derniers et les n+1 derniers) n'est pas nette. Ces conditions présentent des valeurs du coefficient sensiblement proches les unes des autres.

Les essais réalisés pour un débit liquide plus faible (100 kg/h) de la

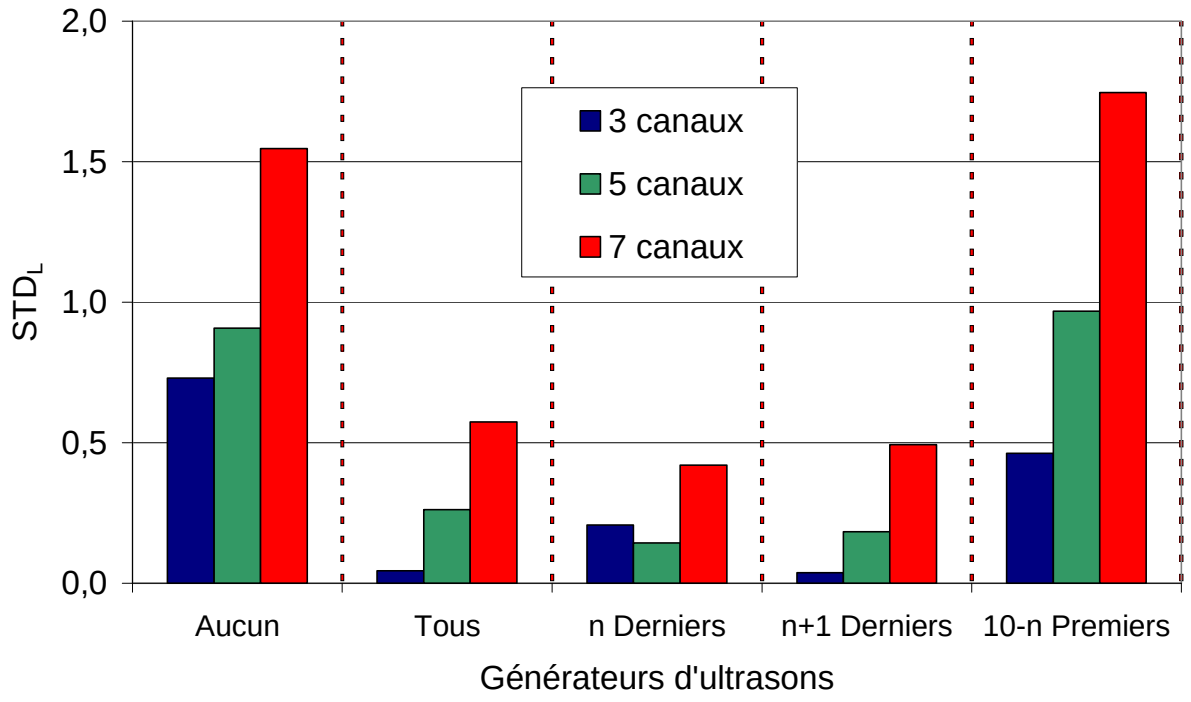


Figure IV- 102 montrent également les mêmes tendances, aussi bien au niveau des conditions donnant des résultats proches, que la hiérarchie entre les différents nombres de canaux ouverts. L'écart des valeurs du coefficient STD, entre les essais avec des générateurs activés en face des canaux et les autres essais, est cependant plus important. Ces observations permettent de voir la hiérarchie entre les essais avec un nombre de canaux disponibles différent pour l'écoulement du fluide diphasique ne semble pas être affectée.

Cette conclusion n'est plus tout à fait la même lorsque la phase gazeuse est étudié (Figure IV-103 et Figure IV- 104). Cette phase a en commun la hiérarchie des configurations. Les valeurs de STD_G les plus faibles sont pour les essais avec seulement trois canaux ouverts et les plus importantes pour sept canaux ouverts. Cependant, l'essai avec les générateurs d'ultrasons amont actionnés ne montre pas le même comportement que pour le liquide. En effet, pour la phase gazeuse, l'essai avec ces appareils activés avant les canaux semble proche de la valeur du coefficient des autres essais avec les ultrasons. L'activation des ultrasons permet donc d'impacter la phase liquide, quelque soit la configuration utilisée. Ces deux remarques sont valables pour les deux débits testés. Pour le faible débit, la configuration avec les générateurs d'ultrasons amont présentent même les valeurs les plus faibles des essais sauf lorsque seuls trois canaux sont ouverts.

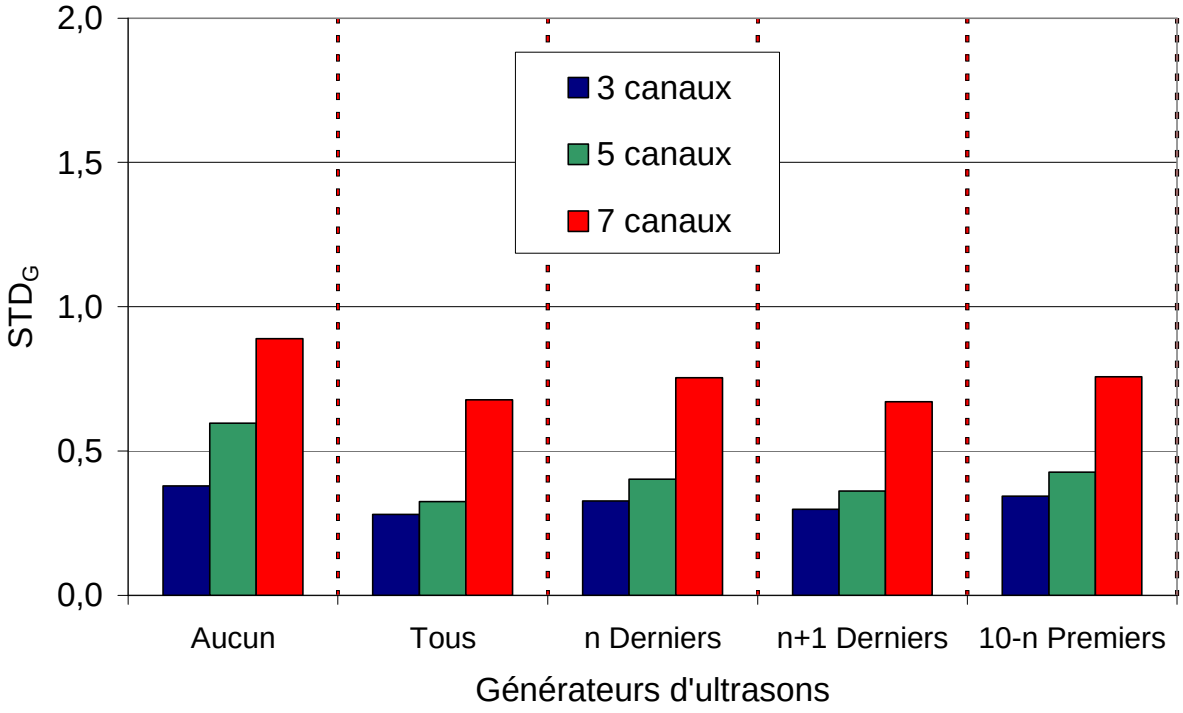


Figure IV- 103: Coefficient STD_G en fonction des différentes configurations des générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 250 kg/h.

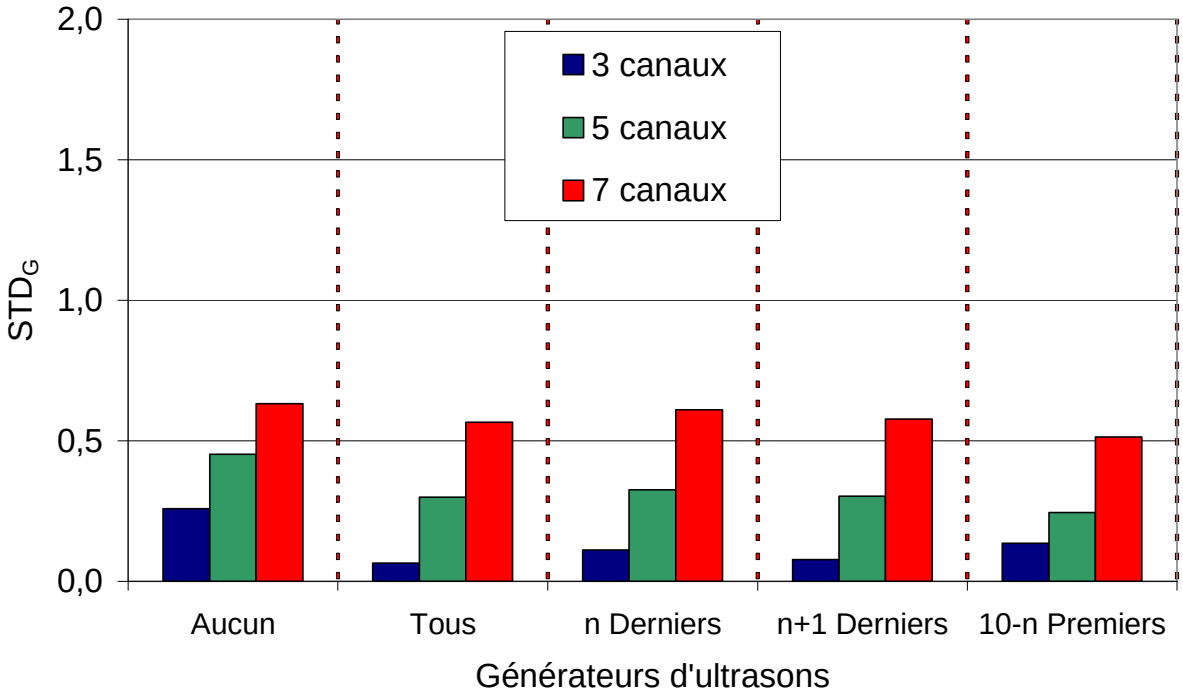


Figure IV- 104 : Coefficient STD_G en fonction des différentes configurations des générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} =100kg/h.

Le comportement de la distribution diphasique n'est donc pas influencé par le nombre de canaux ouverts, aussi bien pour la phase gazeuse que pour la phase liquide. L'effet des ultrasons est lui analysé au travers des graphiques suivants. Le premier graphique de la Figure IV- 105 correspond à la différence relative entre le STD_L sans ultrasons et celui obtenu lors des différentes configurations d'activation des générateurs d'ultrasons.

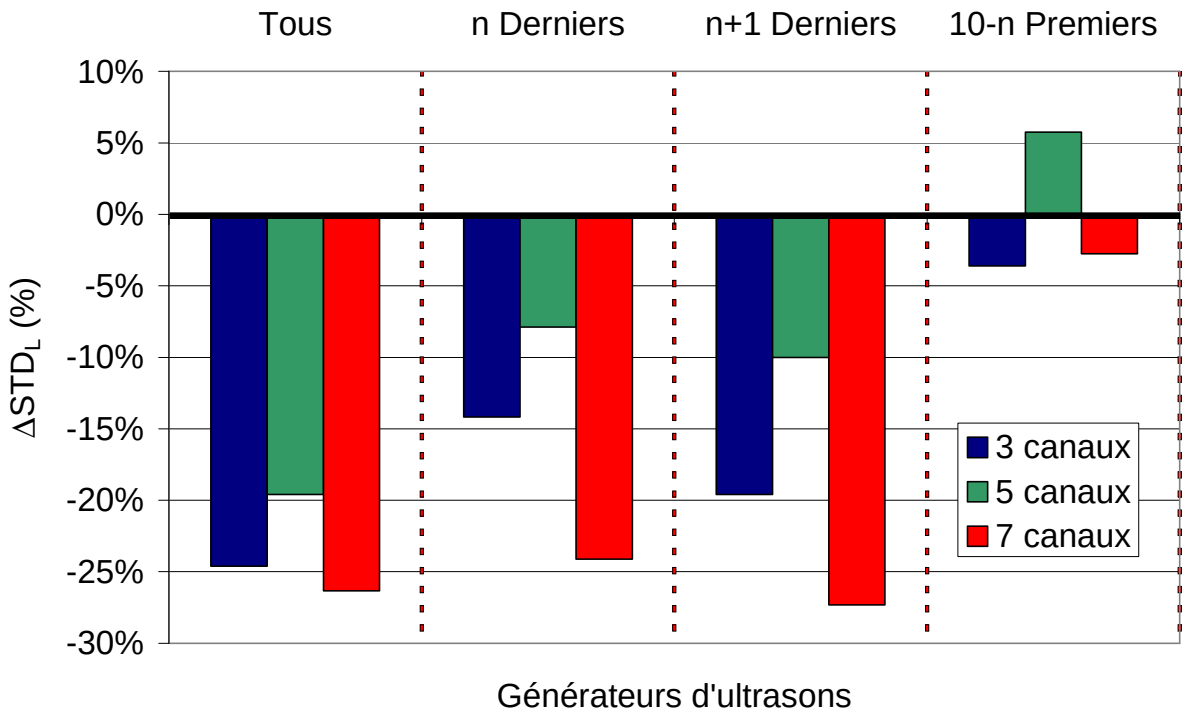


Figure IV- 105 : Différence relative du STD_L par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 250 kg/h.

Cet histogramme confirme les observations faites pour les valeurs absolues de ce même coefficient. En effet, une amélioration nette est remarquée pour les essais ayant des appareils faisant face aux canaux. Le test avec les générateurs d'ultrasons en amont présente une faible amélioration, voir une dégradation de la distribution liquide lorsque seulement cinq canaux sont ouverts. Entre les trois configurations de canaux, l'ordre n'est plus le même. En effet, les deux extrêmes proposent une amélioration supérieure aux tests avec cinq canaux. Néanmoins, cette observation ne se retrouve pas pour un débit d'eau inférieur, comme le montre la Figure IV- 106. Le nombre de canaux ouverts ne semble donc pas jouer sur l'amélioration apportée par les ultrasons sur la distribution liquide.

Le cas donnant la meilleure amélioration n'est pas le même pour tous les essais. Ceci montre donc bien qu'une régulation du nombre d'appareils en marche est intéressante. Elle serait dépendante de plusieurs paramètres, par exemple le nombre de canaux, ce qui se situe au niveau du design de l'échangeur, mais également du débit, ce qui correspond à une régulation active de la technologie. En effet pour un débit de 250 kg/h, pour la configuration avec 7 canaux ouverts la meilleure disposition est pour les huit derniers générateurs d'ultrasons activés. Pour les deux autres configurations de canaux, l'ensemble des appareils est nécessaire pour obtenir la meilleure amélioration. Lorsque le débit est plus faible, la meilleure disposition ne change pas pour les trois canaux ouverts bien que le cas avec les quatre derniers générateurs d'ultrasons soit équivalent à l'essai avec tous les générateurs activés, ce

qui permettrait d'économiser le fonctionnement de 6 appareils. Pour un nombre de canaux ouverts plus importants, la meilleure configuration est lorsque seuls les générateurs d'ultrasons faisant face aux canaux sont activés.
Ces diversités peuvent s'expliquer par la différence de comportement à des débits liquide variés. En effet, à plus fort débit, la fontaine sera mieux construite et proposera alors une fontaine plus importante dans le distributeur. De plus la quantité de gouttes emportées par l'air sera proportionnellement moins importante à débit d'eau plus grand. Ces explications montrent donc bien l'importance du débit liquide en entrée pour déterminer la meilleure configuration des générateurs d'ultrasons.

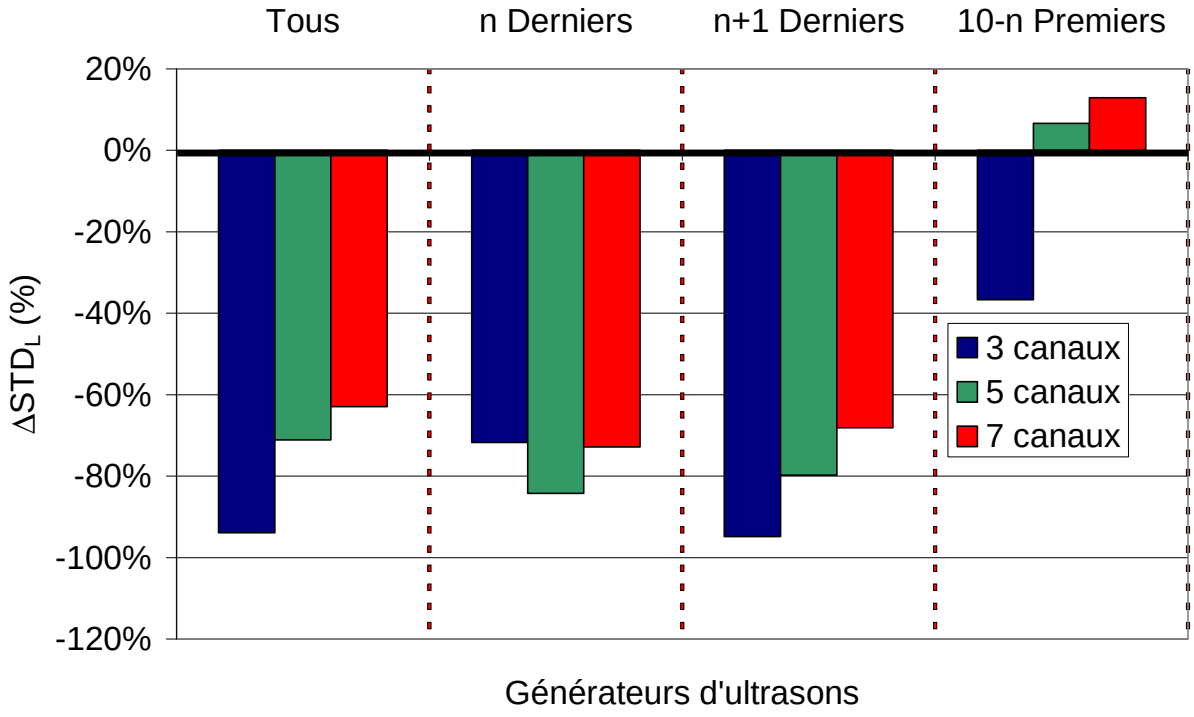


Figure IV- 106 : Différence relative du STD_L par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 100 kg/h.

La même étude a été faite pour la seconde phase et est exposé sur les deux figures suivantes (Figure IV- 107 et Figure IV- 108). Pour tous les essais réalisés, une amélioration du coefficient STD pour la phase liquide a été observée.

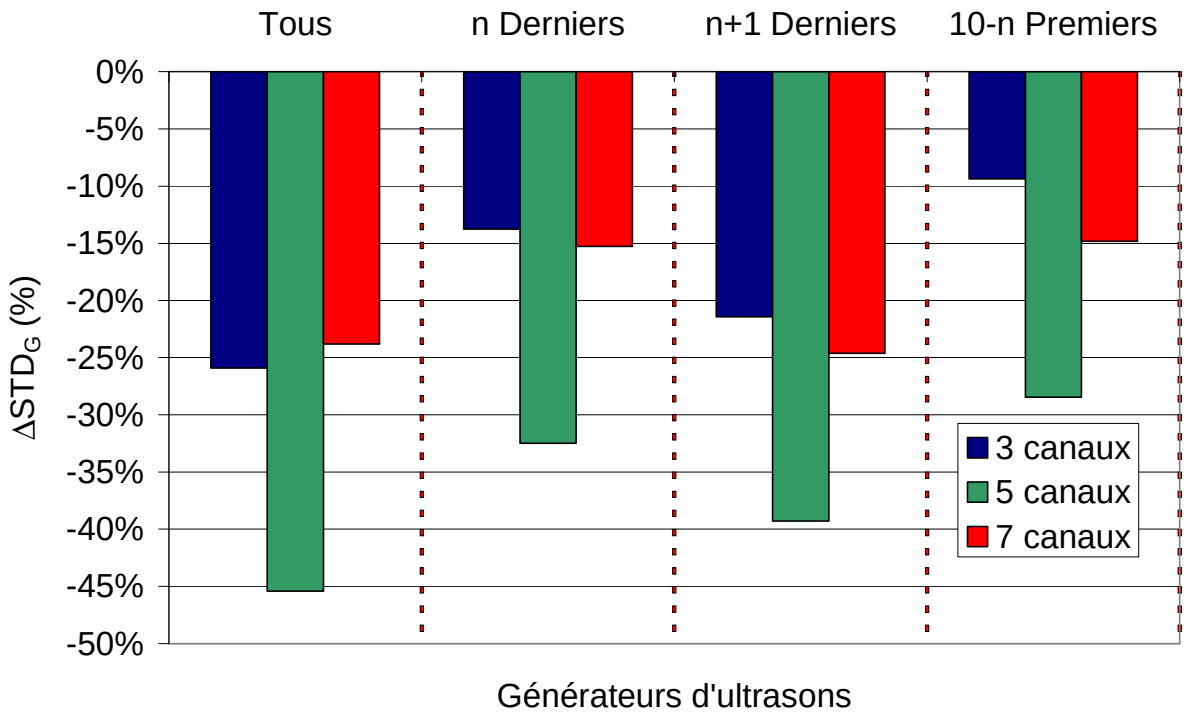


Figure IV- 107 : Différence relative du STD_G par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 250 kg/h.

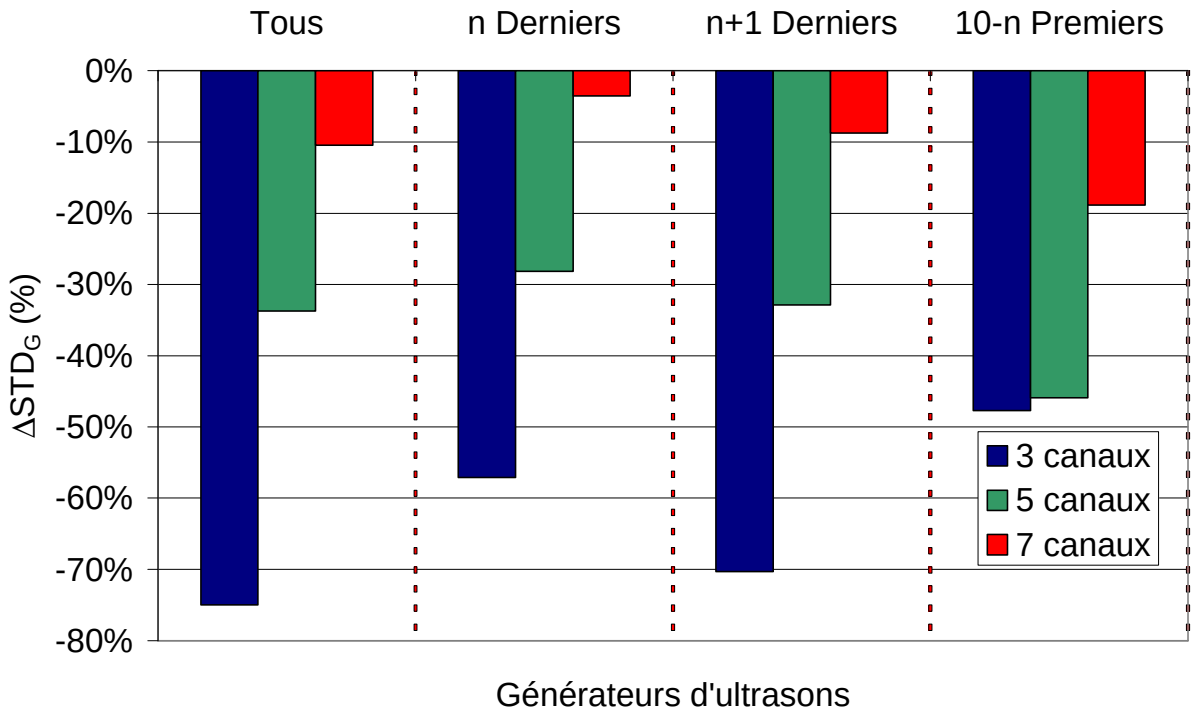


Figure IV- 108 : Différence relative du STD_G par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 100 kg/h.

En analysant les deux figures, une configuration différente, selon le débit, présente à chaque fois les meilleures améliorations. Pour l'essai au plus faible débit liquide, la répartition de l'air est plus améliorée pour le cas avec le plus petit nombre de canaux ouverts. Lorsque le débit augmente à 250 kg/h, c'est le cas avec cinq canaux ouverts qui propose les meilleures améliorations. L'amélioration maximale possible semble donc liée au nombre de canaux ainsi

qu’au débit liquide entrant dans l’échangeur. Une certaine hiérarchie se construit donc entre les trois configurations d’échangeurs et reste quasiment la même quelle que soit la disposition des générateurs d’ultrasons. Néanmoins cette hiérarchie n’est pas la même pour les deux débits liquide testés. Les configurations présentant les meilleures homogénéisations de la distribution sont également différentes selon les conditions expérimentales. Pour un débit d’eau de 250 kg/h, les mêmes dispositions permettant une meilleure amélioration liquide se retrouve, à savoir tous les ultrasons pour trois ou cinq canaux d’ouverts et les huit derniers activés lorsque sept canaux sont disponibles.
Pour un débit plus faible, les deux configurations avec cinq et sept canaux ouverts présentent un résultat complètement différent par rapport à un débit d’eau de 250 kg/h. En effet, la distribution gazeuse est le plus améliorée lorsque seuls les générateurs d’ultrasons en amont sont activés pour un nombre de canaux ouverts plus important. Cette tendance pouvait être observée dans l’étude des profils de distribution de l’air, car pour ces conditions, les premiers canaux étaient moins alimentés alors qu’ils sont suralimentés sans les ultrasons et, pour les derniers canaux, c’est le comportement inverse qui était remarqué. Une homogénéisation de la distribution s’effectuait alors. La différence avec les autres dispositions des ultrasons est qu’elles offraient un débit important qui suralimentait le dernier canal. L’amélioration apportée sur les premiers canaux ne suffisait donc pas. C’est aussi ce qui peut expliquer pourquoi l’essai à trois canaux n’est pas le plus amélioré pour ces mêmes conditions. Le nombre de canaux est trop faible et de ce fait, le changement apporté lorsque les générateurs d’ultrasons faisant face aux canaux sont activés est mieux que les générateurs d’ultrasons amont. Cette fois encore, aucune situation n’est viable pour tous les cas, une régulation des générateurs d’ultrasons en marche serait donc intéressante en fonction de différents paramètres comme le débit massique liquide ou le titre massique.

Une amélioration de l’homogénéisation des deux phases est observée, cependant, il faut étudier les conséquences que cela a sur la distribution du titre massique. Les différences relatives par rapport aux essais sans ultrasons sont exposées sur la Figure IV- 109 et la Figure IV- 110.

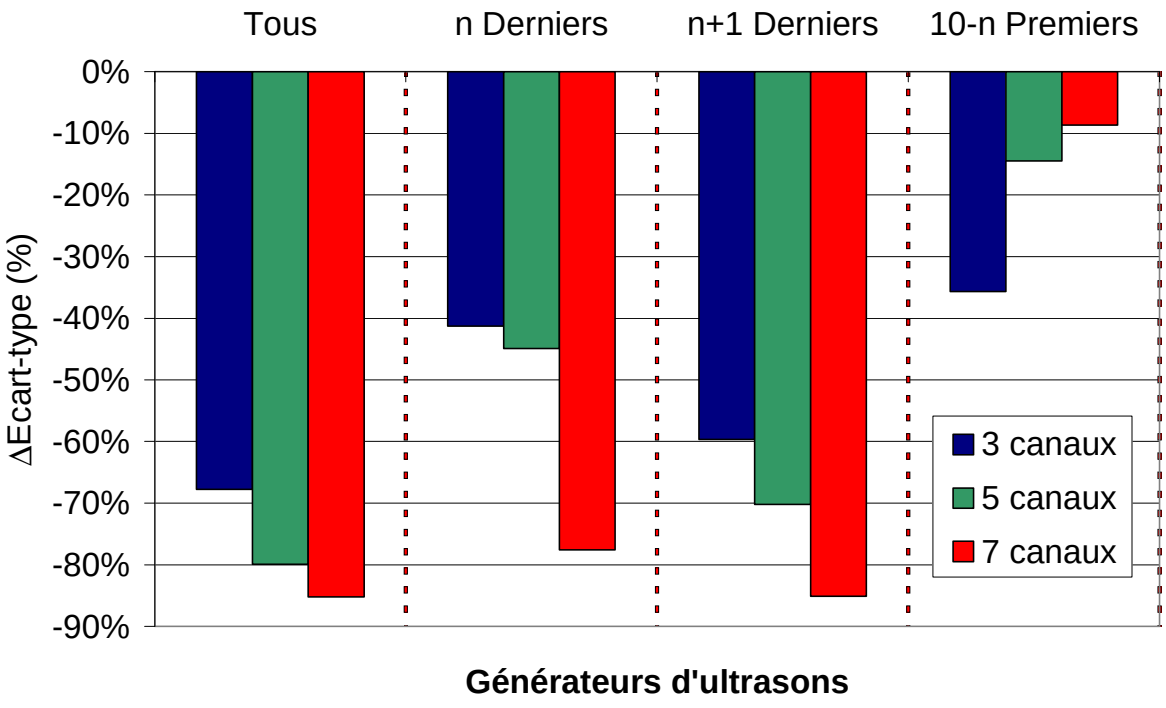


Figure IV- 109 : Différence relative de l'écart-type du titre massique par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 250 kg/h.

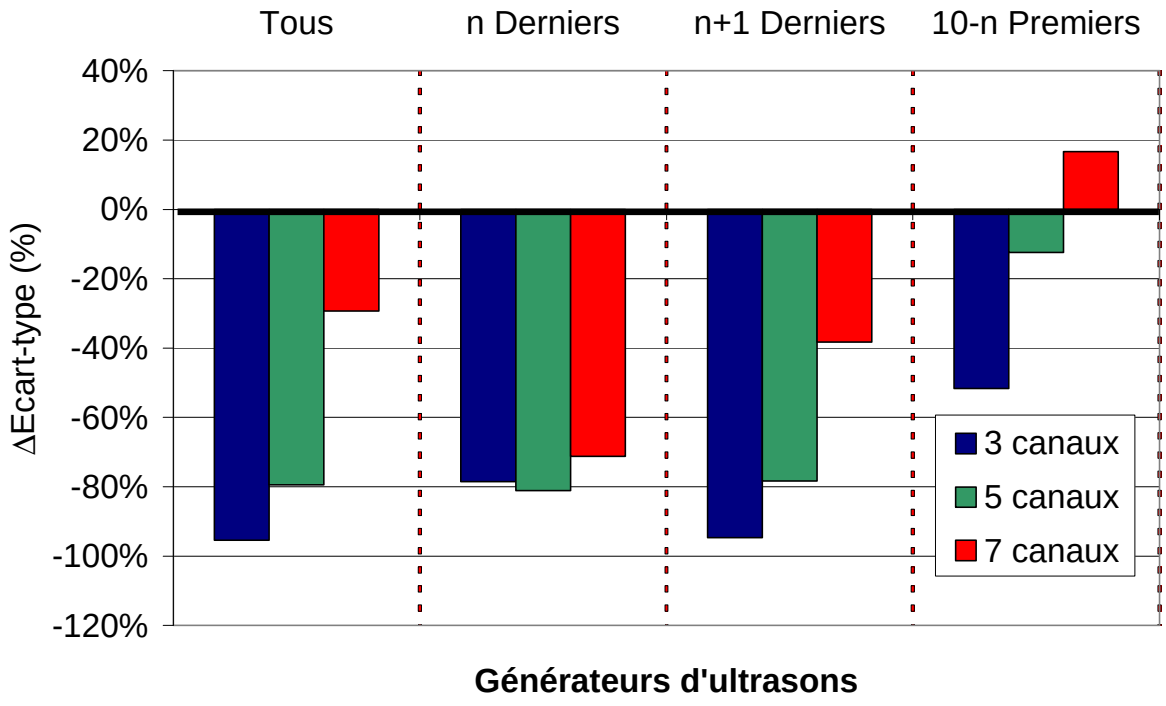


Figure IV- 110 : Différence relative de l'écart-type du titre massique par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour Q_{eau} = 100 kg/h.

Comme attendu, la quasi-totalité des résultats présente une amélioration de la répartition du titre massique dans les canaux. Un seul essai présente une dégradation. En effet, la dégradation de la distribution liquide n'est pas compensée par l'amélioration de la distribution gazeuse. En ce qui concerne les meilleures conditions pour avoir la meilleure homogénéisation, pour un débit de 250 kg/h, les trois configurations se rejoignent sur

l'utilisation de tous les ultrasons présents dans l'échangeur. Cela représente bien sur la meilleure combinaison de l'amélioration liquide et celle gazeuse. Les essais avec sept canaux ouverts sont néanmoins très bons lorsque seulement les huit derniers générateurs d'ultrasons fonctionnent. Lorsque le débit est moins important, la meilleure configuration reste la même pour le plus petit nombre de canaux ouverts, avec toutefois une performance très proche avec uniquement quatre appareils actifs. Pour le cas avec cinq canaux ouverts, les différentes expériences avec des générateurs d'ultrasons en marche en face des canaux sont très similaires, cependant, le cas avec seulement les cinq derniers appareils fonctionnant présente des résultats légèrement meilleurs. Enfin pour l'essai avec le plus grand nombre de canaux disponibles, il montre lui aussi la meilleure amélioration pour les sept derniers appareils en marche. L'écart avec les autres dispositions des générateurs d'ultrasons est cependant plus important que pour les autres configurations.

2.4.3. Conclusion partielle.

Ces essais en fermant certains canaux ont permis de pousser un peu plus loin l'analyse du placement des générateurs d'ultrasons. L'ajout d'un générateur en amont du distributeur est positif pour l'alimentation du premier canal. Un seul appareil semble être suffisant, car le fait d'en mettre plusieurs ne change rien à l'alimentation des canaux sous-alimentés suivant. La déstructuration de l'écoulement ne se propage pas dans l'ensemble du distributeur. Le fait de désactiver les derniers générateurs qui se situent dans la zone noyée est également possible car cela ne change en rien les modifications apportées par les ultrasons mais cela réduit l'énergie demandée afin de faire fonctionner le système.
La configuration donnant les meilleurs résultats est dépendante du débit liquide à l'entrée de l'échangeur mais également du nombre de canaux qui le compose. A faible débit, la déstructuration amont semble donc être moins influente qu'à un débit liquide plus important.
Le nombre de canaux semble donc avoir une influence non négligeable sur la distribution diphasique ou encore l'effet des ultrasons sur celle-ci. Cependant le placement des appareils permet une optimisation du nombre de générateurs d'ultrasons pour obtenir la meilleure amélioration. Plusieurs paramètres entrent en compte, comme par exemple le débit et le nombre de canaux disponibles.

2.5 Modification de l'espacement des canaux.

La dernière étude faite sur la distribution s'intéresse à la distance entre les canaux pour savoir si la déstructuration faite par une fontaine possède un impact sur la partie aval du distributeur, et si celui-ci se propage de la même façon quelle que soit la distance mais également le débit liquide. Les deux mêmes couples de conditions opératoires utilisées pour les expériences précédentes ont été prises. Pour pouvoir étudier la distance entre les canaux, un canal sur deux a été fermé, afin de faire une distance de 100 mm entre deux canaux, au lieu de 50 mm pour toutes les autres expériences (Figure IV- 111). Les canaux impairs ont été fermés afin de pouvoir avoir un générateur d'ultrasons disponible juste avant le premier canal ouvert. Pour étudier les ultrasons, quatre cas ont été testés :

- Sans aucun ultrason,
- Avec les dix appareils activés,
- Avec les appareils faisant face aux canaux pairs,
- Avec les appareils faisant face aux canaux impairs.

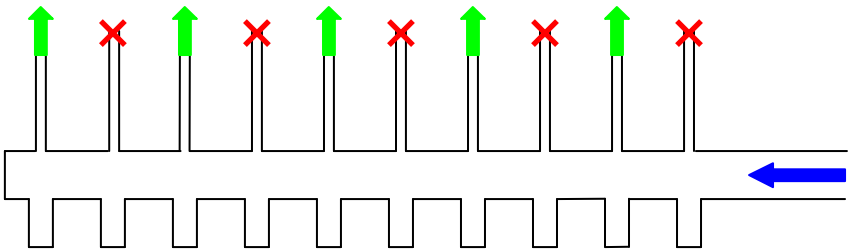


Figure IV- 111 : Schéma de principe pour le cas où les canaux pairs sont ouverts.

Les deux premières configurations permettent de poser les bases. La troisième permettra donc de se mettre dans les mêmes conditions que précédemment, à savoir les appareils fonctionnant en face des canaux ouverts. Et enfin, la dernière configuration permet de voir l'intérêt des générateurs d'ultrasons entre les canaux.

2.5.1. Analyse des profils de distribution.

Les résultats obtenus pour la phase liquide sont présentés sur la Figure IV- 112. En abscisse, le canal numéro 1 représente en réalité le deuxième canal. En effet, de la même façon que les graphiques précédents, les numéros des canaux en abscisse correspondent au canal ouvert, considérant que le distributeur n'est relié qu'à cinq canaux dans ce cas.

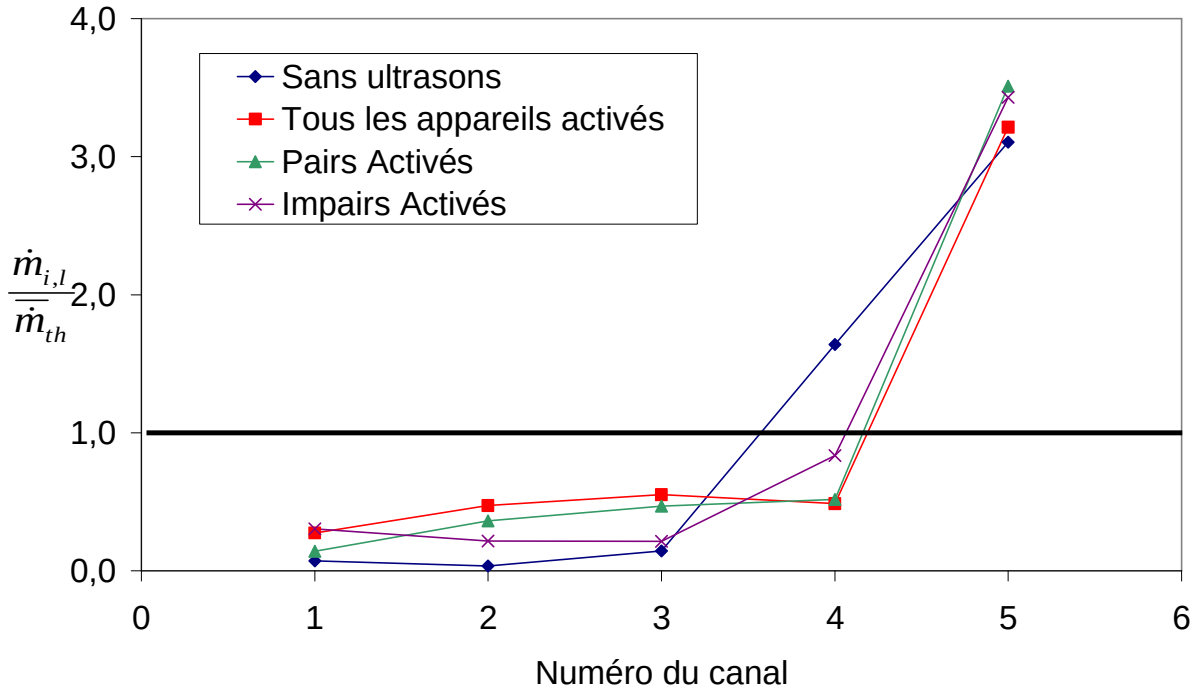


Figure IV- 112 : Profils des distributions liquide en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 250 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h pour les canaux pairs ouverts.

L'ajout de tous les ultrasons permet encore une fois d'alimenter les premiers canaux qui sont normalement sous-alimentés voir pas du tout. Une amélioration est donc visible, ce qui prouve une nouvelle fois l'utilité des ultrasons dans différentes configurations. L'essai avec uniquement les canaux faisant face aux canaux ouverts présente lui aussi une amélioration mais moindre. Ceci se répercute alors sur le dernier canal qui reçoit alors plus d'eau. La zone noyée se concentrant sur ce dernier canal lorsque les ultrasons sont activés. La quatrième disposition présente elle-aussi une amélioration par rapport à l'essai sans ultrasons au niveau des premiers canaux. Le point intéressant se situe notamment au niveau du premier canal. En

effet, celui-ci est plus alimenté lorsque les canaux impairs sont actifs que lorsque les pairs le sont. La valeur atteinte est même identique au cas avec tous les ultrasons. Ceci montre bien la nécessité d'avoir une perturbation en amont du distributeur. Par la suite, l'essai avec les appareils pairs permet de voir des fontaines plus effectives que pour les impairs. La fontaine est donc bien la principale source de ce changement de débit dans les canaux. Toutefois, une perturbation au tout début est nécessaire pour améliorer le débit dans le premier canal ouvert. De la même façon, les canaux suivants bénéficient de cette perturbation aval (au canal précédent fermé). Le fait d'avoir des appareils fonctionnant entre les canaux permet de créer un régime dispersé dans le distributeur avec les gouttes d'eau emportées par l'air, en plus du stratifié. Cependant, les fontaines en face des canaux sont primordiales pour diriger le fluide vers eux. Sans ces fontaines, une partie des gouttes est emportée vers le fond du distributeur, alimentant encore plus le dernier canal.

Concernant la phase gazeuse, elle complète les tendances observées pour la phase liquide, comme le montre la Figure IV- 113.

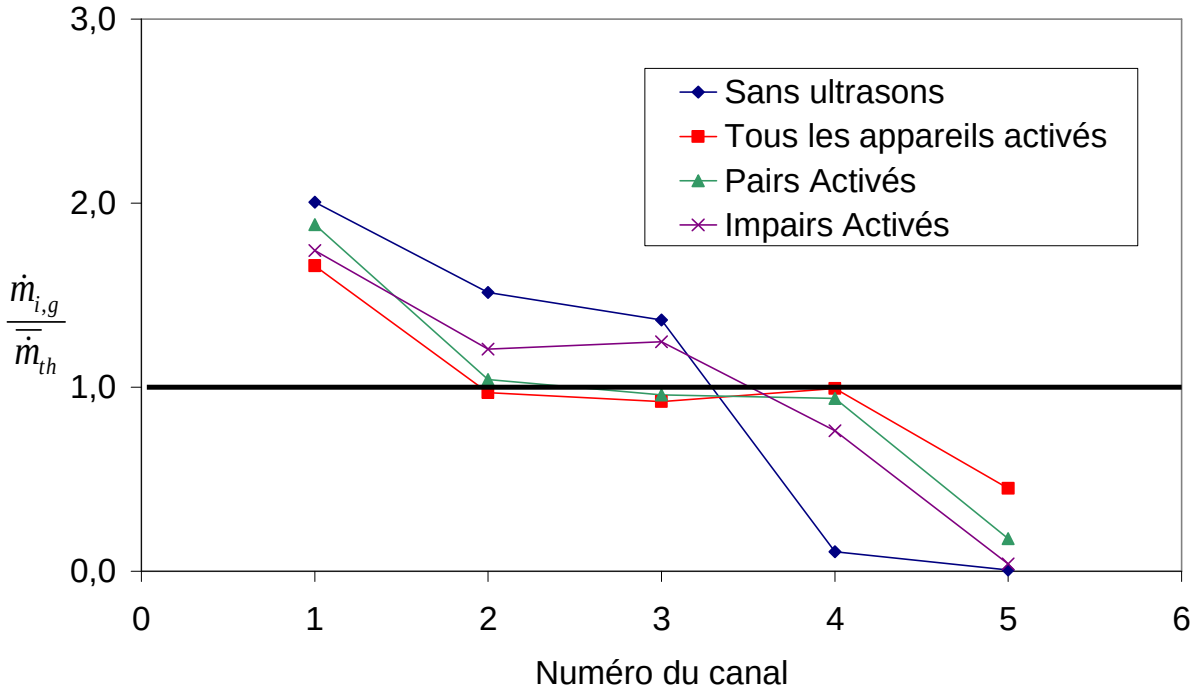


Figure IV- 113 : Profils des distributions gazeuse en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 250 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h pour les canaux pairs ouverts.

La distribution gazeuse semble alors améliorée dans tous les cas. Les tendances constatées sont l'inverse de la phase liquide. Lorsque les canaux pairs sont activés, le premier canal est plus alimenté qu'avec tous les ultrasons mais également par rapport au cas où les impairs sont en marche. Les canaux du milieu sont plus alimentés en air lorsque les générateurs d'ultrasons entre les canaux sont en fonctionnement.

Pour compléter l'analyse, des essais à plus faible débit (100 kg/h) ont été réalisés afin de voir l'influence que pourrait avoir le débit d'eau sur les changements de la distribution diphasique. L'évolution de la phase liquide est présentée sur la Figure IV- 114 et celle de la phase gazeuse sur la Figure IV- 115. Les mêmes effets des configurations des ultrasons précédemment observés se retrouvent sur ces graphiques pour la phase liquide et également pour la phase gazeuse. Néanmoins, l'amplitude des différences entre les distributions est plus importante.

Les canaux non alimentés le deviennent lorsque les ultrasons sont activés. Cela montre une fois de plus la nécessité d'une perturbation amont. Une différence apparait cependant au niveau du dernier canal. En effet, celui-ci devient beaucoup moins alimenté lorsque tous les ultrasons ou seulement les pairs sont actifs. L'eau passant dans les canaux précédents permet en effet de réduire fortement la zone noyée en fond de distributeur. Ceci n'est donc pas visible pour l'essai avec les générateurs d'ultrasons impairs car le prélèvement est moindre pour l'alimentation des canaux amont pour réduire de la même amplitude cette zone noyée en fond de distributeur. Cette différence provoque donc également un changement sur l'alimentation en air du dernier canal par rapport à l'essai à 250 kg/h. Celui-ci devient plus alimenté, voir même suralimenté lorsque les ultrasons sont actifs en face des canaux ouverts.

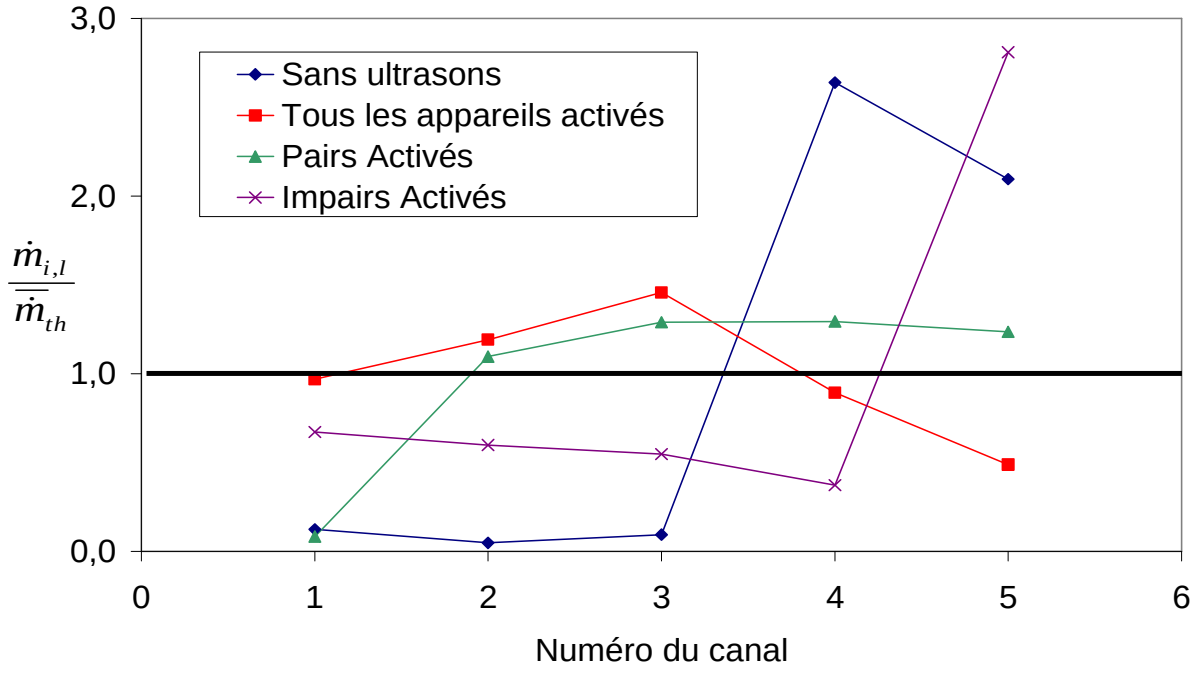


Figure IV- 114 : Profils des distributions liquide en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h pour les canaux pairs ouverts.

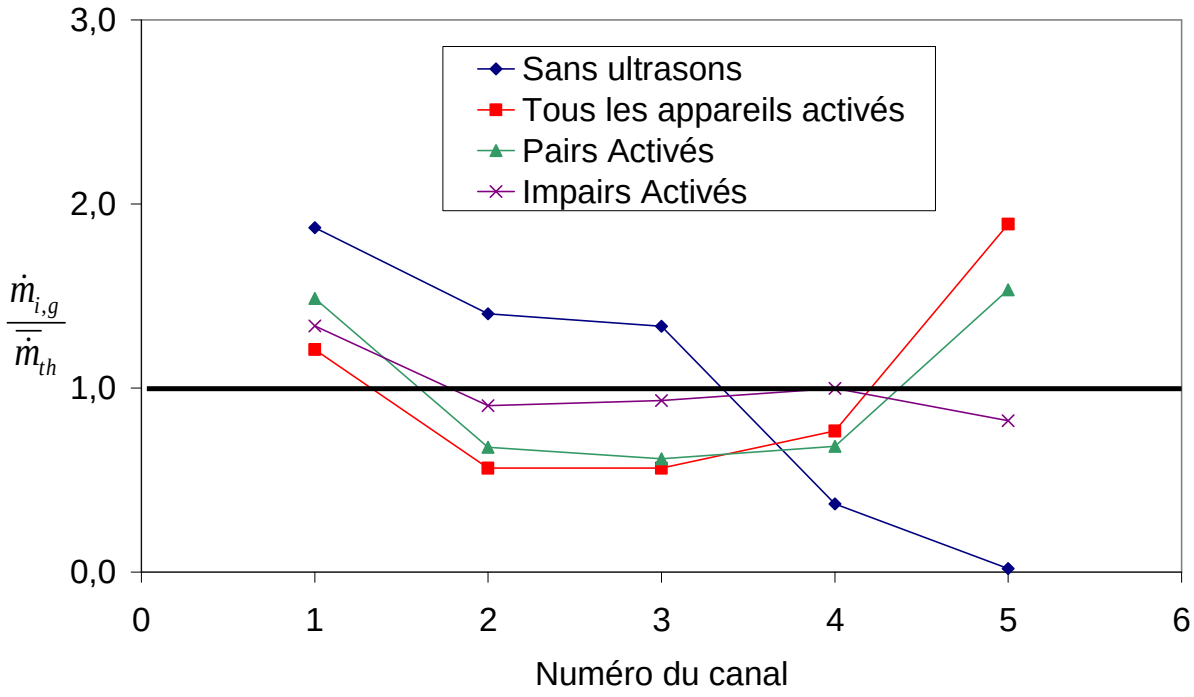


Figure IV- 115 : Profils des distributions gazeuses en fonction des différentes configurations de générateurs d'ultrasons pour Q_{eau} = 100 kg/h et Q_{air} = 20 kg/h pour les canaux pairs ouverts.

2.5.2. Approche statistique de la distribution.

Afin de pouvoir qualifier l'amélioration ou la dégradation provoquée par les ultrasons, les coefficients STD pour les deux phases sont calculés. La différence relative de ces coefficients lorsque les ultrasons sont activés est ensuite déterminée par rapport à l'essai sans ultrasons. La Figure IV- 116 présente les résultats pour la phase liquide.

Une nette différence est observée entre les essais à 100 kg/h et ceux à 250 kg/h. Ceux à faibles débits présentent toujours un meilleur résultat. Pour les deux débits d'eau, la meilleure configuration avec tous les générateurs d'ultrasons en marche. Pour 250 kg/h c'est même le seul cas qui présente une amélioration de la distribution liquide. Ces dégradations sont notamment dues à l'augmentation du débit dans le dernier canal. Il faut donc relativiser la dégradation observée avec le coefficient STD par les profils. Il est cependant certain que la meilleure amélioration est obtenue lorsque tous les ultrasons sont activés. En effet, les fontaines sont présentes en face des canaux pour diriger le fluide et elles sont présentes entre eux pour permettre une perturbation amont.
La hiérarchie observée entre les deux débits liquide pour la phase gazeuse n'est pas la même que pour la phase liquide. Cette analyse est faite à l'aide de la Figure IV- 117. Selon le débit liquide considéré, la configuration optimale à 100 kg/h, est obtenue lorsque seuls les générateurs d'ultrasons étant entre les canaux sont actifs. Pour cette configuration un régime d'écoulement dispersé apparait dans le distributeur, ce qui homogénéise mieux le liquide dans les premiers, ce qui force la distribution de l'air à changer, en alimentant moins ces premiers canaux et plus les derniers. De plus, le dernier canal ne devient pas suralimenté, contrairement aux deux autres essais avec les ultrasons. Ceci permet donc à l'air de bien se répartir entre les cinq canaux. Pour le débit liquide de 250 kg/h, la meilleure configuration est celle où tous les ultrasons sont activés. Les conséquences sur le profil sont les mêmes qu'à 100 kg/h.

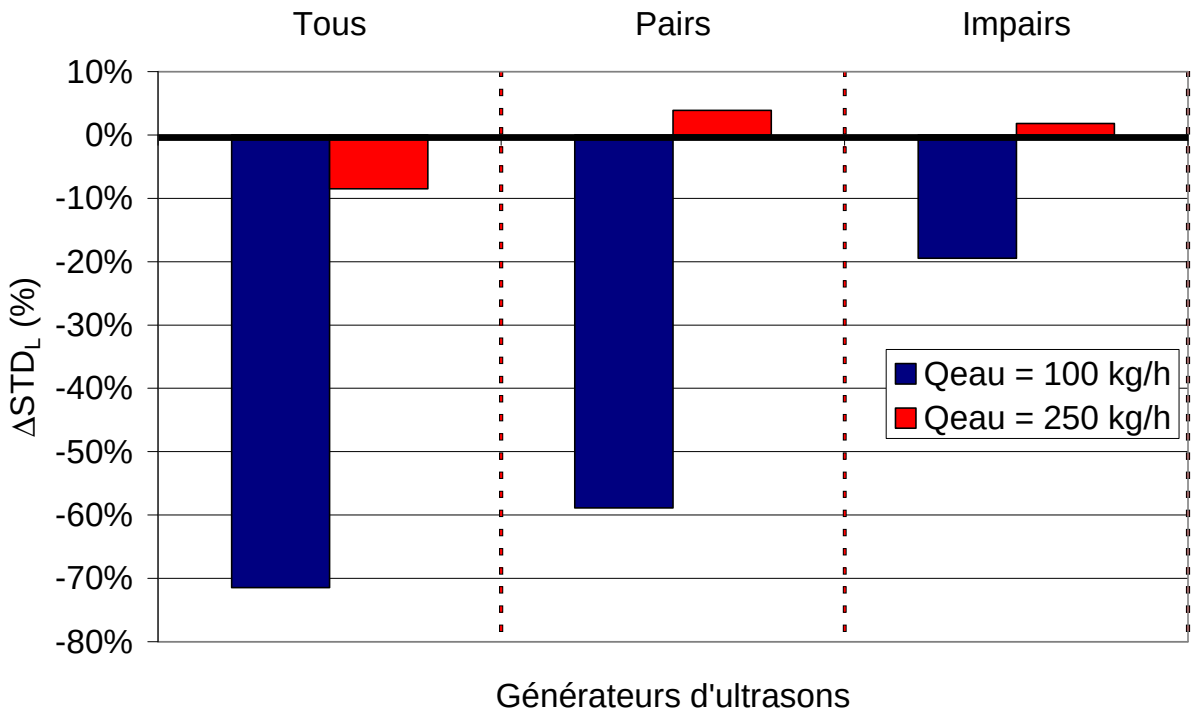


Figure IV- 116 : Différence relative du STD_L par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour les canaux pairs ouverts.

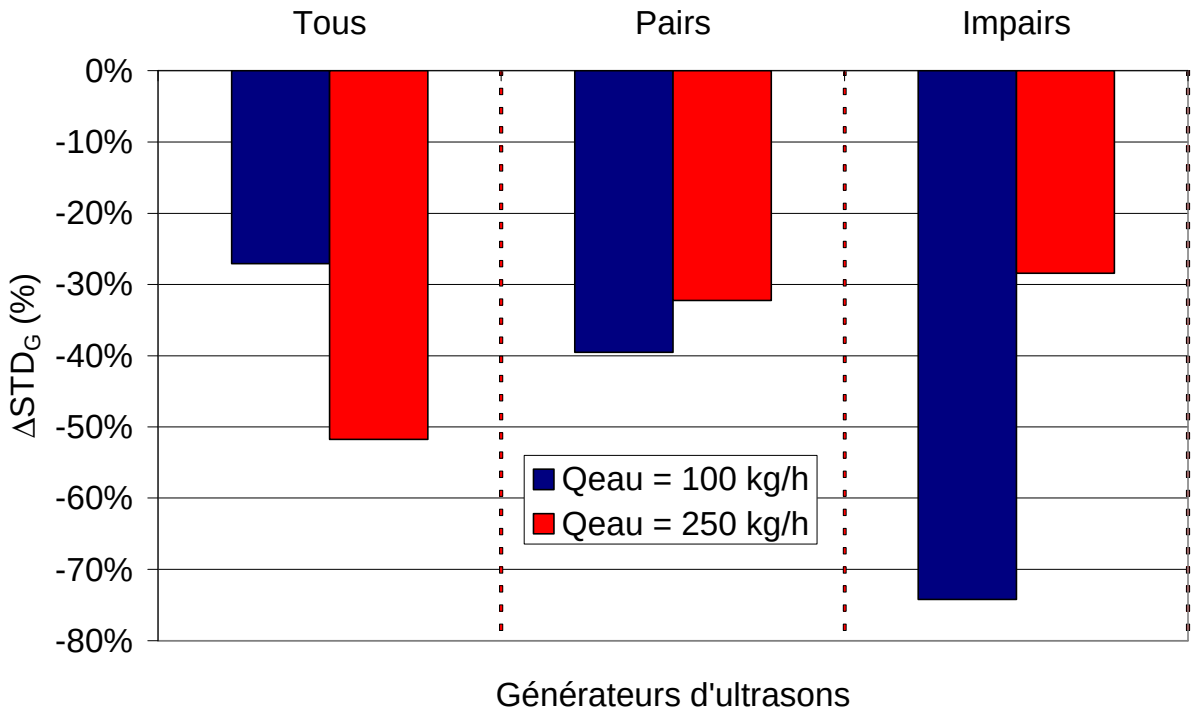


Figure IV- 117 : Différence relative du STD_G par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour les canaux pairs ouverts.

Toujours dans le but de compléter cette analyse, la distribution du titre est étudiée. La Figure IV- 118 présente alors la différence relative entre l'écart-type avec ultrasons et sans. Ce graphique permet de voir que toutes les expériences permettent d'améliorer la distribution du titre massique dans les canaux.

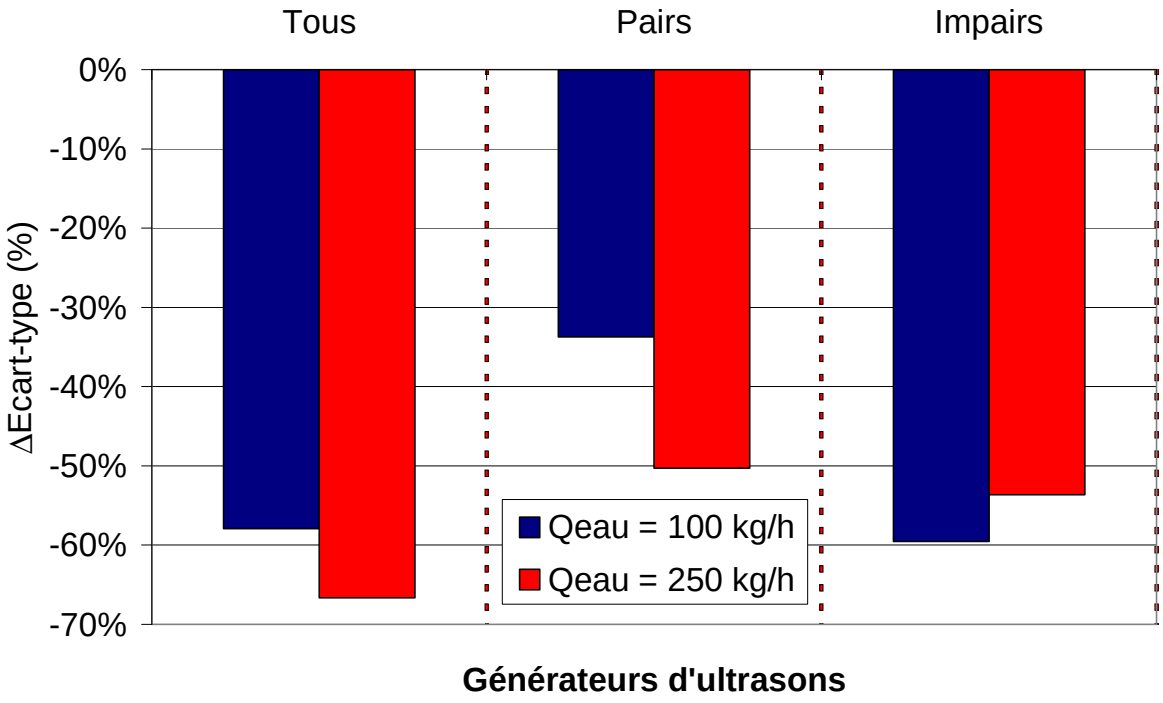


Figure IV- 118 : Différence relative de l'écart-type du titre massique par rapport à l'essai sans ultrasons en fonction des différentes configurations pour les canaux pairs ouverts.

Le cas le plus favorable pour 100 kg/h en débit liquide est le cas avec les générateurs d'ultrasons impairs seuls en marche. Ceci est fortement influencé par l'amélioration de la distribution gazeuse qui est très bonne dans ces conditions. En effet, pour la phase liquide, ces conditions représentent la moins bonne amélioration de toutes les configurations testées. Pour un débit plus important, la configuration donnant la meilleure amélioration ne change pas. Le cas avec tous les ultrasons présente alors la meilleure distribution du titre massique.

2.5.3. Conclusion partielle.

Ces essais avec une distance plus importante entre les canaux ont permis de voir qu'avec une trop grande distance entre les canaux, l'usage des ultrasons uniquement en vis-à-vis des canaux peut dégrader la distribution diphasique initiale. L'insertion d'appareils entre les canaux est alors utile et nécessaire. Ces ajouts peuvent même se révéler très intéressants puisque pour des faibles débits, eux seuls peuvent être actionnés pour mieux répartir le titre massique sur l'ensemble des canaux. Une perturbation amont de chaque canal est utile pour mieux répartir la distribution diphasique.

2.6 Conclusion.

L'étude de la distribution diphasique et de l'effet des ultrasons sur celle-ci a été réalisée à travers différentes configurations et conditions expérimentales. Les divers réglages des vannes ont permis de simuler des « géométries » d'échangeur distinctes.
La première configuration a présenté la distribution diphasique pour la section d'essais, ainsi que l'effet des paramètres opératoires, à savoir les débits d'eau et d'air. Les grandes tendances pour la répartition et l'évolution de la distribution de chaque phase ont été observées. Il est apparu qu'une phase est mieux répartie lorsque son débit à l'entrée de l'échangeur augmente.

L’ajout des ultrasons dans le distributeur a mis en avant des changements d’une ampleur dépendante des conditions expérimentales. Les fontaines créées dans le distributeur permettent de changer la distribution des deux phases en alimentant plus les premiers canaux en liquide. La phase gazeuse est alors impactée et sa distribution change également. Ces essais ont montré que l’augmentation du titre massique en entrée de section d’essais tend à améliorer la distribution du titre massique dans les canaux.
Deux autres configurations ont été testées grâce à différents réglages au niveau des vannes positionnées en sortie des canaux. Celles-ci ont permis de retrouver une distribution des deux phases similaires à celles observées dans la littérature en imposant un profil de pertes de pression. Avec l’aide de coefficients statistiques tels que le STD, le coefficient d’asymétrie et le coefficient d’aplatissement, les changements apportés par les ultrasons ont pu être comparés. Dans l’ensemble des conditions opératoires testées, la phase liquide a vu sa distribution améliorée. A l’inverse, les effets sur la phase gazeuse étaient plus mitigés. Cependant, la répartition du titre a révélé que pour l’ensemble des conditions, celle-ci était améliorée avec l’ajout des ultrasons.
Les visualisations ont permis de mieux étudier les comportements dans le distributeur. Les vidéos réalisées ont confirmé que les fontaines étaient bien l’élément moteur de ce changement sur la distribution. En effet, elles permettent de propulser le fluide vers le canal situé en vis-à-vis mais également, par l’effet du débit d’air, de disperser des gouttes de liquide dans le distributeur. Ceci a pour conséquence de mieux mélanger les deux fluides dans le distributeur qui, sans ultrasons, présente un régime d’écoulement stratifié sur une grande partie.
L’étude de l’influence de l’activation des générateurs d’ultrasons sur la distribution a été poursuivie en changeant le nombre et la position des appareils activés au sein du distributeur. Ceux-ci laissent envisager la possibilité d’une régulation du système. Deux points intéressants ont été observés : le premier est que les générateurs dans la zone noyée en fond de distributeur sont inutiles car il faut une interface liquide-gaz pour que la fontaine soit créée et donc que l’alimentation du canal soit changée. Des appareils peuvent donc être désactivés en fonction du volume de cette zone monophasique liquide. Le second point, observé notamment lorsque le nombre de canaux était réduit, concerne la perturbation en amont du canal qui semble nécessaire pour améliorer l’alimentation du canal considéré. Cependant une fontaine située en face d’un canal reste indispensable. Cette remarque concerne davantage la construction et l’implémentation de ce système dans un échangeur que la régulation.
Pour certains essais, les ultrasons provoquent une suralimentation du canal en vis-à-vis, leur tension d’alimentation pourrait être diminuée afin de réduire la quantité de liquide passant dans le canal en atténuant la fontaine.
Dans la majorité des résultats, la distribution a été améliorée suite à l’activation des générateurs d’ultrasons. Cette amélioration a été obtenue grâce aux fontaines générées dans le distributeur. Cette technologie permet de changer complètement le régime d’écoulement présent dans le distributeur afin de mieux homogénéiser les deux phases, ce qui permet de mieux les distribuer dans les multiples canaux de la section d’essais.

3. Pertes de pression.

Un autre paramètre important dans les échangeurs, qu'ils soient avec un écoulement monophasique ou bien diphasique, est les pertes de pression. Celles-ci doivent être prises en compte pour le dimensionnement de l'échangeur de chaleur et également de la tuyauterie associée. De plus les pertes d'énergies générées par les pertes de pression sont irréversibles, elles ne peuvent pas être récupérées à un autre point du procédé. De ce fait, l'estimation des pertes de pression s'avère très importante afin d'en réduire l'impact sur l'efficacité du système où elles interviennent.

3.1 Définitions

La définition de la perte de pression en monophasique ou en diphasique reste la même : la pression diminue d'amont en aval le long de l'élément étudié et également entre deux sections 1 et 2. La différence de pression entre les deux points est définie par l'intégrale du gradient de pression $-dP/dz$, l'axe de l'élément étant orienté dans le sens de l'écoulement.

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \int_1^2 (-dP/dz)dz \qquad \text{(IV.14)}$$

Ce gradient de pression comprend plusieurs composantes inhérentes au système diphasique en écoulement stationnaire dans un canal rectiligne de section constante. Ces composantes sont au nombre de quatre : pertes de pression par accélération, par gravité, par frottement et enfin les pertes de pression dues aux singularités. L'importance de chacun de ces composantes dépend des conditions de l'écoulement ainsi que la nature du fluide étudié.

Le gradient de pression peut alors être exprimé de la façon suivante :

$$-\frac{dP}{dz} = -\frac{dP_a}{dz} - \frac{dP_g}{dz} - \frac{dP_f}{dz} - \frac{dP_{\sin g}}{dz} \qquad \text{(IV.15)}$$

Plusieurs approximations peuvent être faites pour certaines configurations d'écoulement, certaines sont présentées ci-dessous :

- Dans le cas d'un système à deux constituants, la composante liée à l'accélération peut être négligée, et la pression hydrostatique est nulle si le tube est horizontal.

- Dans un tube vertical avec écoulement à bouchons ou à bulles, les pertes de pression dépendent en plus des pertes par frottement, de la composante liée à la gravité, et la précision de son estimation est liée celle du taux de vide.

- Lorsqu'un changement de phase entraine une forte variation des coefficients locaux (titre massique, taux de vide, frottement), les pertes de pressions par accélération ne peuvent plus être négligées.

En principe, la chute de pression dans l'élément étudié, ne doit pas dépasser une valeur limite afin que le nombre de *Mach* de l'écoulement diphasique vérifie :

$$M_a^2 = \frac{G^2}{\varepsilon_v^2} x^2 \frac{d\left(\frac{1}{\rho_v}\right)}{dP} < 1 \qquad \text{(IV.16)}$$

Sans expliquer les différents modèles pour les pertes de pression, qui seront développés dans la partie exploitation des résultats, il existe deux approches pour décrire un écoulement diphasique. Le modèle homogène et le modèle à phases séparées.

Pour le premier, les deux phases sont remplacées par un « pseudo-fluide » monophasique incompressible et dont les propriétés (vitesse, température, masse volumique et viscosité) sont les moyennes de deux phases, obéissant aux lois d'un écoulement monophasique. Ces particularités permettent de faire plusieurs simplifications telles que :

- Caractéristiques moyennes du mélange diphasique : vitesse, température, masse volumique et viscosité.
  - Il obéit aux lois d'un écoulement monophasique
- Profils de vitesse et de température :
  - Uniformes dans les deux phases
  - Pas de glissement entre les phases.

En ce qui concerne le modèle à phases séparées, les propriétés des deux phases sont prises en compte. Dans ce cas, la description et la quantification des interactions entre les interfaces est difficile. Les équations bilans doivent être déterminées pour chaque phase et les conditions d'interfaces doivent être établies. L'utilisation de corrélations empiriques est alors nécessaire pour la fermeture du système d'équation.

Une étude en parallèle de la distribution diphasique a été menée sur les pertes de pression dans les canaux. Deux aspects ont été abordés : le premier concerne l'influence de l'introduction des ultrasons sur les pertes de pression dans les canaux ; le deuxième s'intéresse à la prédiction des pertes de pression dans les canaux et pour cela, différents modèles ont été testés. Les mesures ont ensuite été comparées aux valeurs calculées avec ces mêmes modèles.

3.2 Influence des ultrasons sur les pertes de pression.

Lors de l'analyse des mesures de pertes de pression dans les canaux, il est apparu que le maximum mesuré en prenant en compte l'ensemble des dix canaux était pratiquement tout le temps supérieur lorsque les ultrasons étaient activés. De ce fait, il apparaissait alors que les ultrasons semblaient jouer un rôle sur les pertes de pression. Pour analyser cela, plusieurs mesures, avec et sans ultrasons ont été menées. Afin de pouvoir comparer l'ensemble des résultats obtenus, les expériences ont été faites avec une densité de flux massique constante dans le canal. Le paramètre variant était le titre massique. Pour faire cela, les débits massiques d'eau et d'air étaient alors ajustés pour correspondre aux valeurs de titre massique voulues. Dans le but de connaître correctement les débits passant dans le canal, un seul (le dernier) a été gardé ouvert, les neufs autres ont été fermés. Les résultats expérimentaux sont présentés sur la Figure IV- 119.

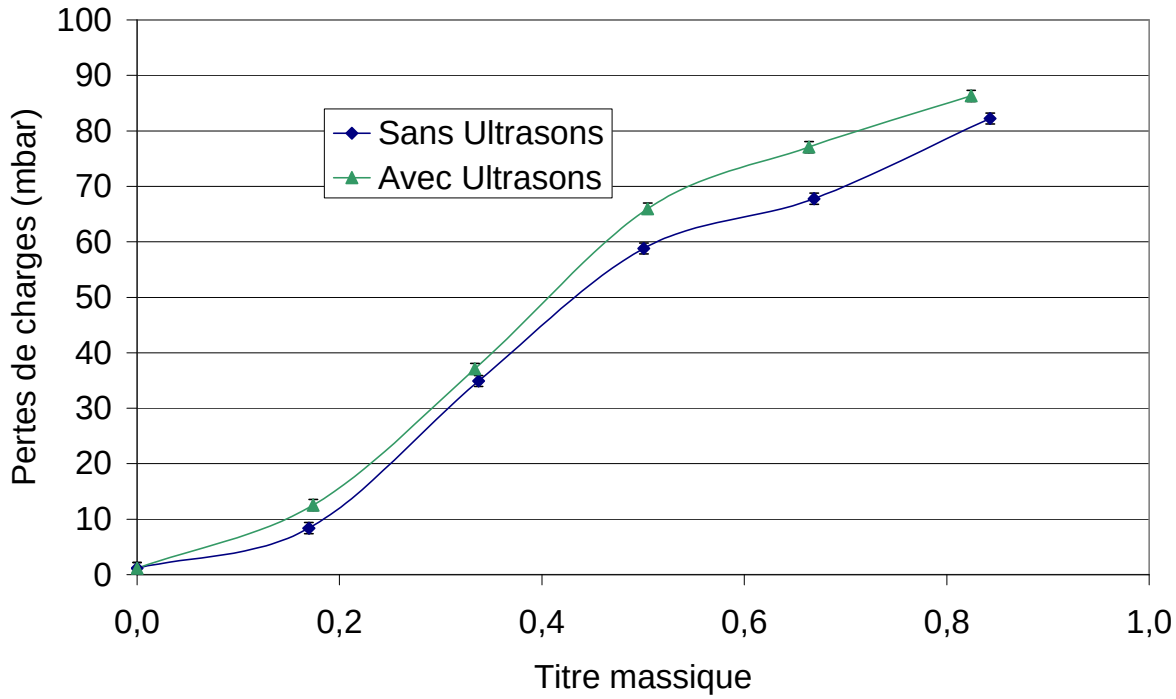


Figure IV- 119 : Évolution des pertes de pression par frottement sur un canal en fonction du titre massique avec et sans ultrasons pour G = 166 kg.m^{-2}.s^{-1}.

Les essais ont été réalisés avec une densité de flux massique de 166 kg.m^{-2}.s^{-1}, ce qui équivaut à un débit massique total de 30 kg/h pour le canal. Aucun essai n'a été effectué avec un titre de 1,0 car l'absence de l'eau sur le disque piézo-électrique est préjudiciable pour le bon fonctionnement des éléments piézo-électrique. Les essais à un titre de 1,0 ne peuvent donc pas être faits avec les ultrasons.
Sur ces résultats il est intéressant de noter que la courbe représentant les pertes de pression par frottement lorsque les ultrasons sont activés est toujours supérieure à celle correspondant aux essais sans ultrasons. Cela confirme alors la remarque préalablement faite sur les maximums mesurés. Pour comprendre cette différence, il faut étudier plus précisément ce qu'il se passe au niveau du canal considéré.

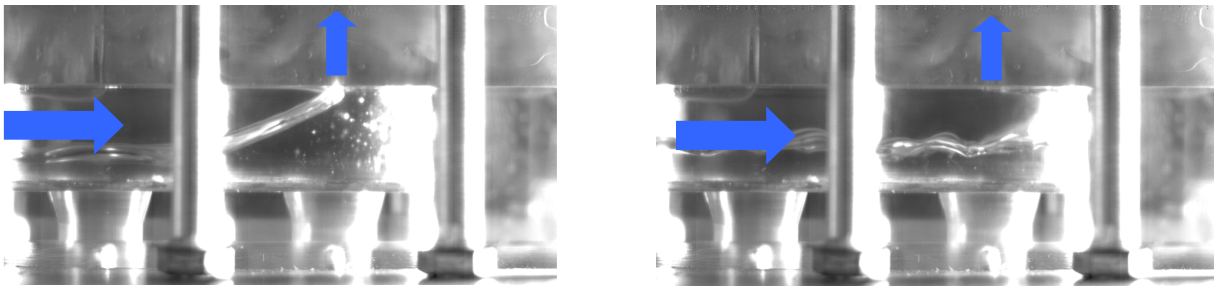


Figure IV- 120 : Photos de l'alimentation du canal sans ultrasons. A gauche alimentation liquide, à droite, alimentation gazeuse.

La Figure IV- 120 montre des images au niveau de l'entrée du canal lorsqu'aucun appareil n'est activé. Les deux photos montrent les deux états entre lesquels l'alimentation du canal oscille. Le canal n'est alors pas alimenté d'une façon continue par un écoulement diphasique. Il est observé alternativement deux types d'écoulements. A certains moments, un écoulement diphasique est observé et à d'autres un écoulement monophasique (soit liquide soit gazeux).

L'ensemble pourrait s'apparenter à un régime « bouchon » mais avec des passages monophasiques importants. Cette alternance de régime conduit donc à des pertes de pression variables dans le temps. Pour mieux comprendre cela, il faut se référer aux études préalables des pertes de pression par frottement dans des écoulements diphasiques. **Poggi [2008]** a étudié ces pertes de pression pour des écoulements diphasiques, en particulier leur évolution en fonction du titre massique pour plusieurs densités de débits massiques surfaciques. La Figure IV- 121 montre les résultats de cette étude pour des canaux verticaux et écoulement descendant.

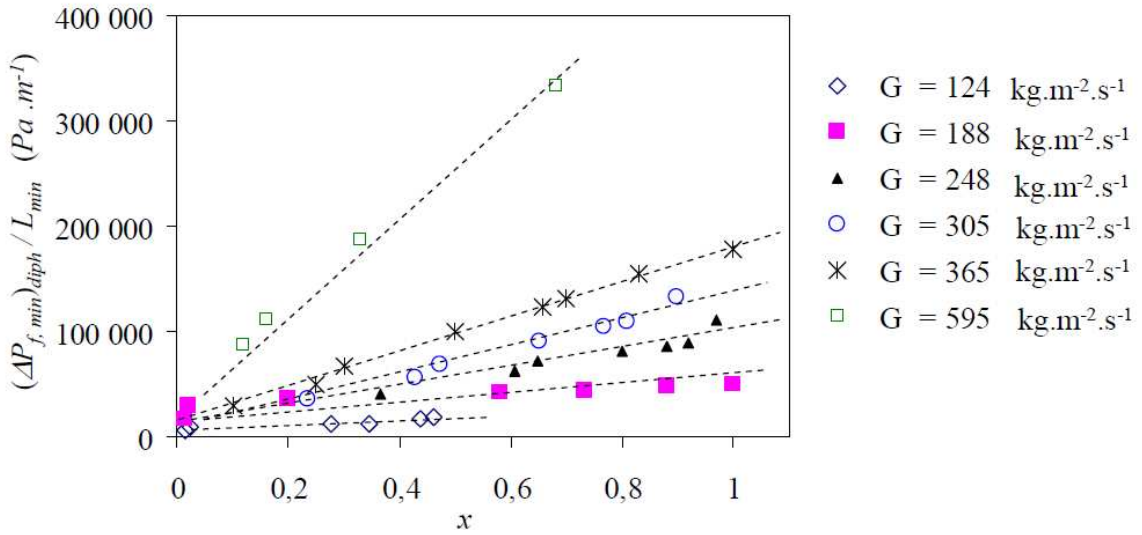


Figure IV- 121 : Gradient de pertes de pression diphasique par frottement dans les mini-canaux verticaux, Poggi [2008].

Pour une même densité de flux massique, les pertes de pression se déplacent sur la courbe associée. Lorsque la valeur de la densité de flux massique augmente, le gradient de pression augmente également. L'augmentation du titre provoque également des pertes de pression plus importantes. Normalement, si l'écoulement était le même avec et sans ultrasons, les deux courbes devraient alors être confondues car la densité de flux massique est la même et donc une seule courbe est considérée. Cependant comme signalé précédemment, une alternance est observée pour l'alimentation sans ultrasons. Cette variation conduit alors à un changement de la densité de flux massique dans le canal. Par exemple, pour les tests réalisés, le paramètre *G* est égal à 166 $kg.m^{-2}.s^{-1}$ ce qui correspond à un débit massique de 30 kg/h. Dans le cas d'un titre de 0,5, le débit massique liquide est égal à celui de la phase gazeuse qui est de 15 kg/h. Cependant c'est uniquement quand les deux phases sont ensemble que la densité de flux massique est égale à celle voulue. Lorsque les deux régimes s'alternent, comme montré sur les précédentes photos. Il y a uniquement de l'air ou uniquement de l'eau qui passe. La valeur de *G* n'est donc localement plus la même. Lorsque seule l'air passe, la valeur n'est que la moitié du total entrant car de l'eau semble s'accumuler au niveau du distributeur Lorsque l'eau passe, la valeur de *G* est alors supérieure à la moitié et peut même dépasser la valeur du débit entrant si la phase d'accumulation est importante. Pour la phase liquide les variations de cette grandeur, n'ont pas beaucoup d'influence car la valeur de la densité de flux massique influence peu les pertes de pression monophasique liquide. Cependant pour la phase gazeuse, l'influence est plus significative. D'après la Figure IV- 121, une densité de flux massique plus faible donne des pertes de pression moins importantes à isotitre.

En se plaçant toujours dans le même cas avec un titre de 0,5, si une alternance de liquide et de gaz est observée, la moyenne se situera alors sur la droite d'une densité de flux massique inférieure à la valeur désirée. Les ultrasons permettent de réduire cette variation de régime

dans le canal grâce à la fontaine, continuellement en contact avec le canal, comme le montre la Figure IV- 122.

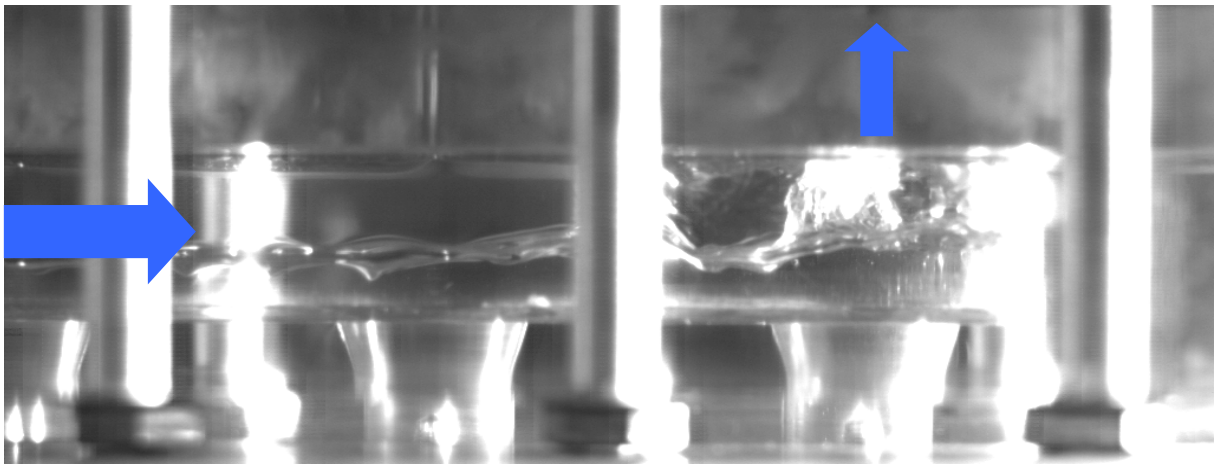


Figure IV- 122 : Photos de l'alimentation du canal avec ultrasons.

La fontaine permet d'alimenter de façon permanente le canal en liquide et donc d'avoir une meilleure homogénéisation des deux phases dans celui-ci. La densité de flux massique instantanée est donc plus proche de la valeur théorique désirée. C'est ainsi que les pertes de pression présentent des valeurs plus importantes en présence qu'en l'absence de fontaines ultrasonores.
De plus lorsque l'écart-type des mesures est calculé, la valeur de celui-ci est à chaque fois moins importante lorsque les ultrasons sont activés. Preuve encore une fois que cet ajout permet une meilleure homogénéisation des deux phases dans le canal. Cette observation est illustrée sur la Figure IV- 123. Celle-ci présente les valeurs de pertes de pression instantanées avec et sans les ultrasons lors d'un enregistrement pour les mêmes conditions de débits

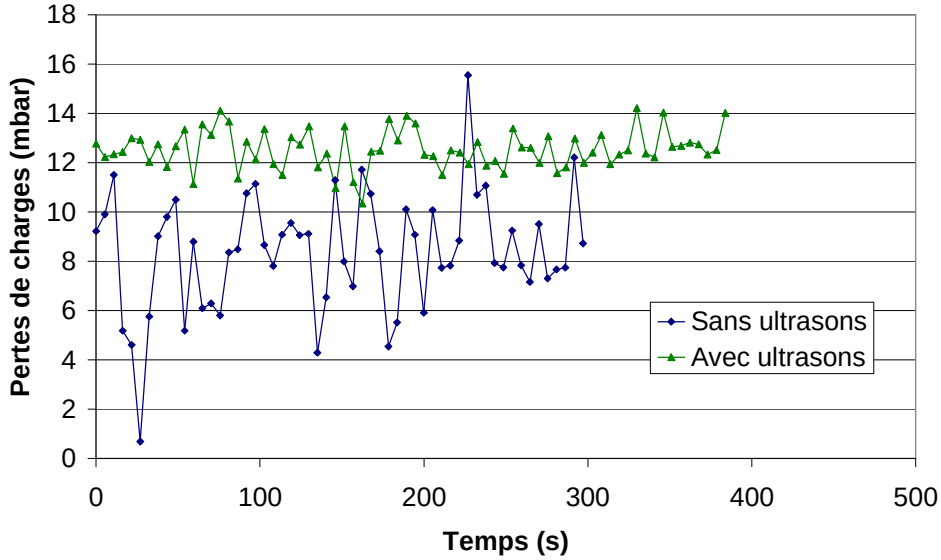


Figure IV- 123 : Variation de la mesure des pertes de pression.

Les ultrasons génèrent des pertes de pression moyennes plus importantes pour des mêmes conditions opératoires, mais avec une variation d'ampleur moindre. Pour les essais réalisés, les mesures de pertes de pression avec les ultrasons présentent moins de variations et sont donc plus précises.

3.3 Comparaison des résultats expérimentaux à différents modèles.

3.3.1. Présentation des modèles.

Pour analyser les pertes de pression mesurées, différents modèles ont été utilisés. Les équations nécessaires aux calculs de ces prédictions sont donc détaillées dans la suite du manuscrit. Parmi les modèles il peut être distingué deux principaux : le modèle homogène, et les modèles à deux fluides.
Le modèle homogène équilibré est le plus simple des modèles. Il suppose que le mélange diphasique peut être traité comme un pseudo fluide monophasique. L'hypothèse sous jacente est qu'il n'y a pas de vitesse relative entre les phases.
Les modèles à deux fluides sont plus généraux. Ils s'appuient sur des équations de bilan pour chacune des phases. Leur grande généralité nécessite de nombreuses équations constitutives qui ont donné lieu à de nombreux sous – modèles.

3.3.1.1. Modèle Homogène.

La perte de pression par frottement s'écrit donc

$$\Delta p = -\frac{L}{D_h} \times 4 f_{TP} \times \frac{G^2}{2\rho_m} \tag{IV.14}$$

où f_{TP} est le facteur de frottement diphasique calculé avec les propriétés physiques moyennes. Pour la masse volumique du mélange, cela s'écrit alors :

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{1}{\varepsilon_V \rho_G + (1-\varepsilon_V)\rho_L} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \tag{IV.15}$$

Pour la viscosité, des corrélations sont utilisées. La plus simple est :

$$\mu_m = x\,\mu_G + (1-x)\mu_L$$

mais la plus utilisée est celle de Duckler et al.

$$\mu_m = \mu_G \left(\frac{x\,\rho_m}{\rho_G} \right) + \mu_L \left(\frac{(1-x)\rho_m}{\rho_L} \right) \tag{IV.16}$$

3.3.1.2. Modèle de Lockhart-Martinelli.

Un des modèles les plus utilisés est celui de Lockhart-Martinelli. Ces auteurs expriment le gradient de pression par frottement en diphasique en fonction de celui d'un écoulement monophasique (liquide ou gaz) circulant seul dans le canal. L'écoulement liquide (respectivement gaz) circule avec le débit qu'il a effectivement dans le mélange. Cela s'écrit ainsi :

$$\frac{dp}{dz} = \Phi_G^2 \times \left(\frac{dp}{dz} \right)_G = \Phi_L^2 \times \left(\frac{dp}{dz} \right)_L \tag{IV.17}$$

Les pertes de pression par frottement $\left(\frac{dp}{dz}\right)_G$ et $\left(\frac{dp}{dz}\right)_L$ dépendent du régime d'écoulement de la phase étudiée. Pour des écoulements laminaires, la loi de Poiseuille est utilisée :

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_L = \frac{64}{D_h \,\mathrm{Re}_L} \times \left(\frac{G_L{}^2}{2\rho_L}\right) \quad et \quad \left(\frac{dp}{dz}\right)_G = \frac{64}{D_h \,\mathrm{Re}_G} \times \left(\frac{G_G{}^2}{2\rho_G}\right) \tag{IV.18}$$

$$\text{avec} \quad Re_L = \frac{G_L \, D_h}{\mu_L} \qquad \text{et} \qquad \mathrm{Re}_G = \frac{G_G \, D_h}{\mu_G}$$

Pour les écoulements turbulents, la relation de Blasius est utilisée:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_L = 0{,}3164\,\mathrm{Re}_L{}^{-0{,}25} \times \left(\frac{G_L{}^2}{2\rho_L}\right) \times \frac{1}{D_h}$$
$$et \quad \left(\frac{dp}{dz}\right)_G = 0{,}3164\,\mathrm{Re}_G{}^{-0{,}25} \times \left(\frac{G_G{}^2}{2\rho_G}\right) \times \frac{1}{D_h} \tag{IV.19}$$

Cette méthode introduit la variable X qui est définie par la relation suivante :

$$X^2 = \frac{\Phi_G^2}{\Phi_L^2} = \frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G} \text{ Avec } \Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad et \quad \Phi_G^2 = 1 + CX + X^2 \tag{IV.20}$$

Le coefficient C présent dans les formules de Φ_L^2 et Φ_G^2 dépend lui aussi du régime d'écoulement des deux phases. Suivant les combinaisons possibles, pour des tubes horizontaux, il prend les valeurs suivantes :

Liquide turbulent et Gaz turbulent : C = 20
Liquide laminaire et Gaz turbulent : C = 12
Liquide turbulent et Gaz laminaire : C = 10
Liquide laminaire et Gaz laminaire: C = 5

De plus le taux de vide peut être également calculé par cette formule :

$$1 - \varepsilon_V = \frac{X}{\sqrt{X^2 + 20X + 1}} \tag{IV.21}$$

Ce modèle est généralement conseillé pour les basses pressions avec une vitesse massique faible. Le modèle est également plus précis avec un fluide plus visqueux que l'eau.

3.3.1.3. Modèle de Chisholm.

Le modèle de Chisholm est basé sur le précédent. Une modification est apportée sur le coefficient Φ_L^2. Contrairement à Lockhart-Martinelli, ce modèle est plus utilisé pour des écoulements avec une vitesse massique importante.

$$\Phi_{L0}^2 = 1 + \left(\Gamma^2 - 1\right)\left\{B\left[x(1-x)\right]^{(2-n)/2} + x^{2-n}\right\} \tag{IV.22}$$

L'indice *LO* (respectivement *GO*) signifie que le mélange s'écoule comme s'il était entièrement liquide (respectivement gazeux).

$$\text{Avec } \Gamma^2 = \frac{(dp/dz)_{G0}}{(dp/dz)_{L0}} \quad et \quad B = \frac{CT - 2^{2-n} + 2}{\Gamma^2 - 1} \tag{IV.23}$$

Friedel en 1979 a également proposé un modèle. Il utilise un coefficient diphasique multiplicateur spécifique pour corriger les pertes de pression (par frottement) calculées pour la phase liquide. La formule générale utilisée est :

$$\Delta p_{frict} = \Delta p_L \Phi_{fr}^2 \tag{IV.24}$$

La perte de pression pour la phase liquide est calculée de la manière suivante :

$$\Delta p_L = 4 f_L \left(L / D_h\right) G_{total}^2 \left(1/2\rho_L\right) \tag{IV.25}$$

Le coefficient multiplicateur est défini par :

$$\Phi_{fr}^2 = E + \frac{3{,}24FH}{Fr_H^{0,045} We_L^{0,035}} \tag{IV.26}$$

Les différents coefficients présents ont les expressions ci-dessous :

$$E = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_L f_G}{\rho_G f_L} \tag{IV.27}$$

$$F = x^{0,78}(1-x)^{0,224} \tag{IV.28}$$

$$H = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0,91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0,19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0,7} \tag{IV.29}$$

Cette corrélation est recommandée lorsque le rapport de la viscosité liquide sur celle du gaz est inférieur à 1000.
De la même façon, en 1999 Mishima et Hibiki se sont inspirés de la corrélation de Lockhart-Martinelli. Cependant, le modèle alors proposé regroupe également d'autres résultats expérimentaux, afin d'avoir une meilleure précision sur une grande base de données. Cette

corrélation est plus adaptée lorsque les tubes ont des faibles diamètres. Les auteurs proposent un paramètre C qui dépend du diamètre hydraulique selon :

$$C = 21(1 - e^{-0,319 D_h}) \tag{IV.30}$$

A partir d'un plus grand nombre de données que Mishima et Hibiki en 1999, Sun et Mishima [2009] ont proposé une corrélation. Ils modifient la corrélation de Lockhart-Martinelli avec un coefficient *C* fonction, en particulier, du régime d'écoulement. Pour des écoulements laminaires, fréquents dans les minicanaux, ils obtiennent :

$$C = 26\left(1 + \frac{\mathrm{Re}_l}{1000}\right)\left[1 - \exp\left(\frac{-0,153}{0,27 \times La \times 0,8}\right)\right] \tag{IV.31}$$

La étant le nombre de Laplace, défini par :

$$La = \frac{\left(\dfrac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}\right)^{0,5}}{D_h} \tag{IV.32}$$

Lorsque l'un des deux fluides a son nombre de Reynolds dépassant 2000, l'équation de la corrélation est modifiée telle que :

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C\left(\dfrac{\mathrm{Re}_g}{\mathrm{Re}_l}, \dfrac{1-x}{x}\right)}{X^n} + \frac{1}{X^2} \tag{IV.33}$$

$$\text{Avec } n = 1,19 \text{ et } C = 1,79\left(\frac{\mathrm{Re}_g}{\mathrm{Re}_l}\right)^{0,4}\left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,5} \tag{IV.34}$$

3.3.1.4. Modèle d'Ide et Fukano.

Ide et Fukano [2005] ont proposé un modèle pour les canaux rectangulaires. Leur corrélation est basée sur des écoulements air - eau dans des canaux verticaux ascendants, ce qui correspond aux conditions de notre étude. Ce modèle obéit au même principe que les précédents, c'est-à-dire la présence d'un coefficient multiplicateur qui permet de calculer la perte de pression diphasique à partir du calcul des pertes de pression par frottement du liquide. La perte de pression totale pour la longueur *L* s'écrit :

$$\Delta P = \Phi_L^2 \times \left(\frac{dp}{dz}\right)_L \times \left(\frac{L}{D_h}\right) \tag{IV.35}$$

Avec Φ_L^2 dépendant du régime d'écoulement du liquide et du régime d'écoulement de l'ensemble des deux phases. Pour un écoulement du liquide laminaire et un écoulement total turbulent, le coefficient est alors calculé avec l'équation ci-dessous.

$$\Phi_L = 0{,}0848 T^{-0{,}145} \left(\left(j_G + j_L \right) / \, j_L \right)^{0{,}425} \mathrm{Re}_L^{3/8} \qquad \text{(IV.36)}$$

j_G et j_L étant les vitesses superficielles des deux fluides.

Lorsque l'écoulement total est laminaire, l'équation devient alors :

$$\Phi_L = 0{,}2485 T^{-0{,}355} \left(j_L / \sqrt{g D_h} \right)^{-0{,}233} \mathrm{Re}_L^{3/8} \qquad \text{(IV.37)}$$

Le coefficient T représente le ratio des dimensions du canal : $T = L / l$.

Les auteurs précisent que, pour faire ce modèle, les essais ont été réalisés avec une pression d'environ 0,2 MPa, une température de 18 à 22 °C et enfin des vitesses superficielles de l'ordre de 0,5 à 15,0 $m.s^{-1}$ pour le gaz et de 0,1 à 0,7 $m.s^{-1}$ pour le liquide.

3.3.2. Résultats obtenus.

Dans cette partie, les mesures des dix canaux obtenues lors des caractérisations de la distribution ont été comparées à celles calculées avec les différentes corrélations présentées. Comme expliqué précédemment, seuls les résultats avec tous les ultrasons activés ont été comparés avec les modèles.

Le Tableau IV- 4 donne les résultats de ces comparaisons en termes d'écart moyen, d'écart moyen absolu et enfin du pourcentage de points de mesure prédits à 20% près.

Tableau IV- 4: Écarts des principaux modèles de prédiction des pertes de pression.

Modèle	Moyenne des écarts	Moyenne des écarts absolus	Pourcentage des points ayant moins de 20% d'écart
Ide et Fukano	-32%	41%	22%
Lockhart-Martinelli	18%	51%	19%
Mishima-Hibiki	-52%	53%	3%
Chisholm	17%	58%	11%
Homogène	9%	60%	6%
Sun-Mishima	83%	89%	4%
Friedel	228%	229%	6%

D'après ce tableau, le modèle d'Ide et Fukano semble être le meilleur. Parmi ces corrélations, deux d'entre elles ont tendances à sous-estimer les pertes de pression. Ces deux modèles sont ceux d'Ide et Fukano ainsi que Mishima-Hibiki. Tous les autres surestiment les mesures. La Figure IV- 124 permet d'observer ces tendances plus distinctement en fonction du titre massique.

Une forte densité de points expérimentaux apparaît pour un titre tendant vers zéro. En effet, lors des essais, beaucoup de canaux présentaient un titre massique proche de zéro. Les pertes de pressions dans ces conditions sont alors faibles. L'erreur des capteurs est donc plus importante à ce niveau que pour les pertes de pressions supérieures. De ce fait, une faible différence entre la mesure et le modèle peut donner une erreur relative parfois importante. Ceci explique donc la disparité des points proches d'un titre de zéro. Toutefois, lorsque l'étude est faite sur des valeurs de titres au-delà de cette zone proche de zéro, des tendances se

dégagent. Le modèle de Lockhart-Martinelli se révèle de moins en moins fiable lorsque le titre augmente. Ce comportement peut être également observé pour le modèle de Chisholm, qui présentait des résultats sensiblement proche. Néanmoins, l'écart entre ces deux modèles semble augmenter avec le titre massique. Une autre corrélation donnant des bons résultats regardant les moyennes des écarts est celle de Mishima-Hibiki. Une pente similaire est observée mais cela résulte à une tendance opposée à celles précédemment évoquées. Lorsque le titre augmente, ce modèle tend à mieux prédire les pertes de pression, même si elles sont sous-estimées.

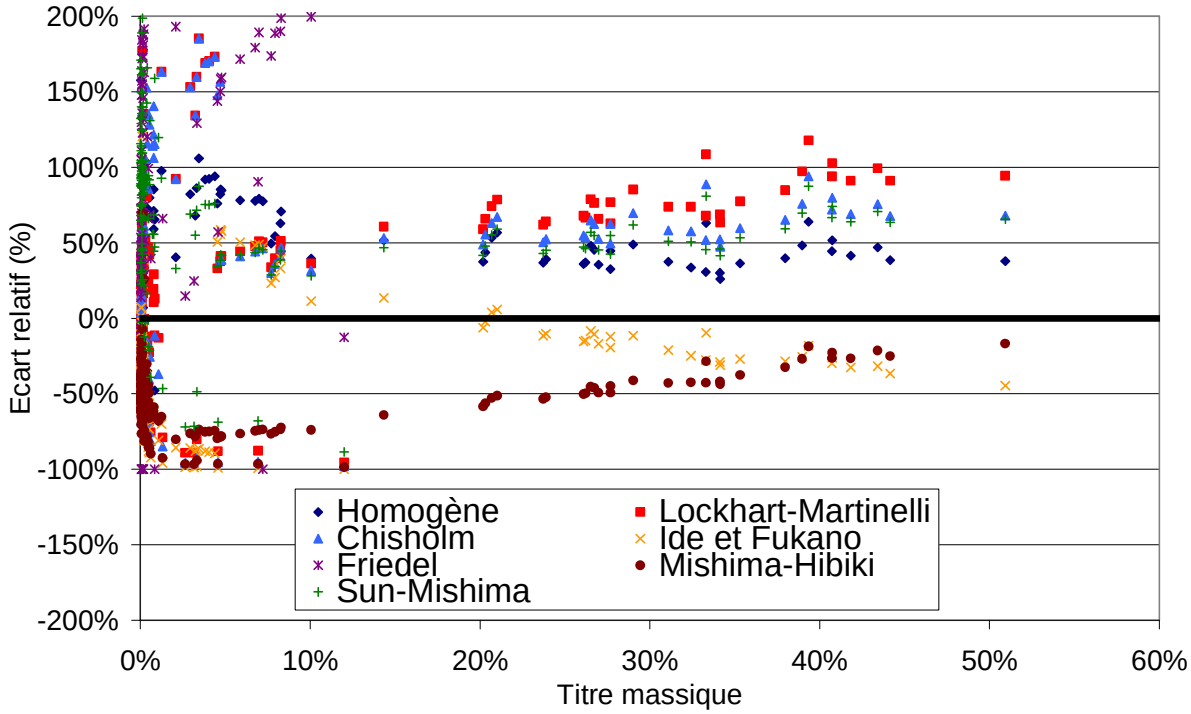


Figure IV- 124 : Évolution de l'écart relatif des modèles en fonction du titre massique.

Le modèle homogène présente lui aussi une meilleure précision à fort titre plutôt qu'à faible titre massique. Le modèle de Sun et Mishima propose des résultats sensiblement proches du modèle homogène. Cependant, sa précision n'apparaît pas influencée par la variation du titre massique. Les deux derniers modèles ont des tendances différentes et opposées. Le modèle de Friedel donne des résultats qui surestiment fortement les pertes de pression. Ce modèle est en effet plus précis pour des fluides frigorigènes.

Enfin, la corrélation d'Ide et Fukano observe une décroissance avec l'augmentation du titre massique. C'est de plus la seule qui bascule d'une surestimation à une sous-estimation avec la variation du titre. De ce fait, les prédictions avec un titre massique compris entre 10 et 35% sont bonnes.

Une autre manière d'étudier ces pertes de pression et également complémentaire du précédent graphique est de regarder l'évolution de l'écart des modèles avec les mesures en fonction de la vitesse de la phase gazeuse. La Figure IV- 125 montre alors les résultats obtenus avec cette méthode d'analyse. Ce graphique permet de voir que le modèle de Lockhart-Martinelli est en effet de moins en moins précis lorsque la vitesse augmente alors que celui de Chisholm semble avoir la tendance inverse. Le modèle homogène présente également une diminution de l'erreur avec l'augmentation de la vitesse du gaz. Ces tendances sont très similaires à celles observées pour le titre massique. Un point important se situe pour le modèle de Mishima et Hibiki. En effet, l'erreur présente un maximum (en prenant la valeur absolue). Des prédictions correctes sont faites pour les plus faibles et les plus fortes vitesses. Ceci n'était pas visible

avec le titre. La corrélation de Sun et Mishima a permis de corriger cette particularité car cette corrélation n'est pas sensible à la vitesse (comme au titre).

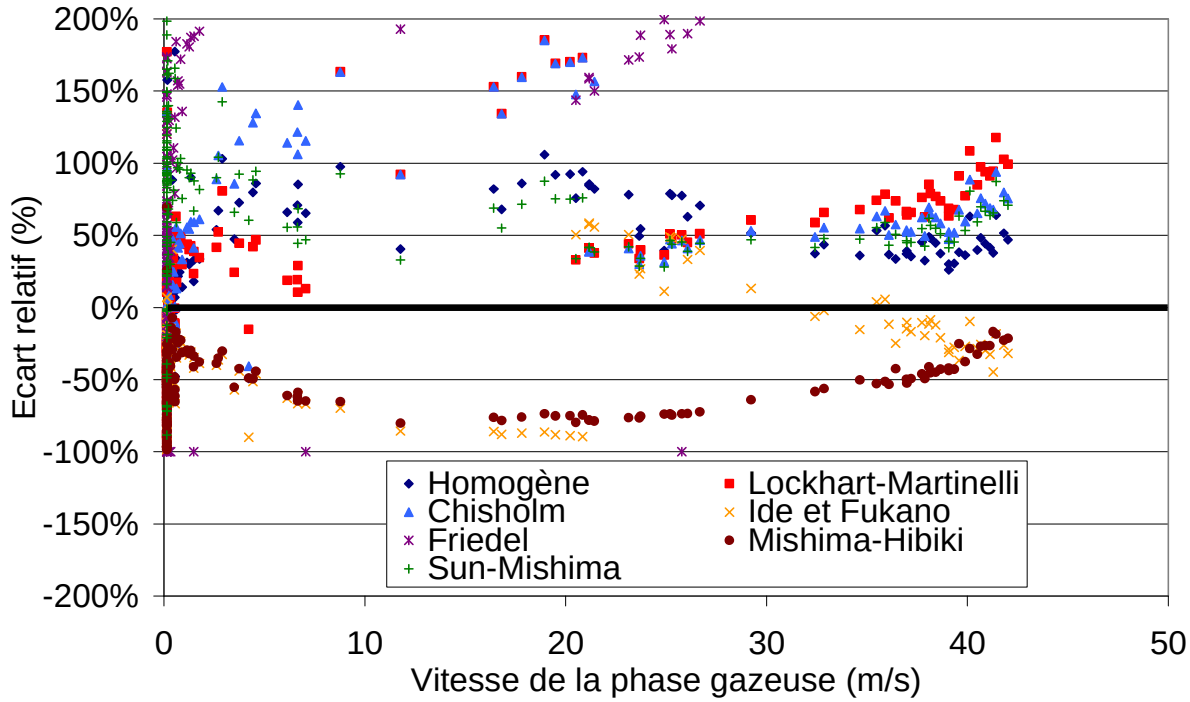


Figure IV- 125 : Evolution de l'écart relatif des modèles en fonction de la vitesse de la phase gazeuse.

Tous ces modèles étudiés présentent donc un écart important par rapport aux mesures expérimentales des pertes de pression sur la section d'essais. Toutefois, sur l'ensemble des mesures, Ide et Fukano possède la meilleure précision avec un écart moyen de 41%. Il peut être remarqué un changement du signe de l'erreur pour cette corrélation lorsque le débit de la phase gazeuse passe au dessus de 20 $m.s^{-1}$. Cela passe d'une sous-estimation à une sur-estimation. Cette modification est liée au changement de l'équation utilisée pour le coefficient modificateur. En effet, lorsque les écoulements deviennent turbulents, l'équation change, c'est donc cette variation qui est visible sur ce graphique.
Lorsque seules les mesures avec un titre massique supérieur à 2% sont prises en compte, la meilleure corrélation reste la même mais des changements sont observés pour les autres corrélations. En effet, celle de Sun et Mishima devient la deuxième plus précise avec un écart moyen de 55% (contre 81% pour Lockhart-Martinelli dans ce cas). Les résultats restent cependant peu précis. Les nouveaux écarts sont répertoriés dans le Tableau IV- 5.

Tableau IV- 5 : Ecarts des principaux modèles de prédiction des pertes de pression sans les essais avec un titre massique inférieur à 2%.

Modèle	Moyenne des écarts absolus	Différence
Ide et Fukano	43%	2%
Sun-Mishima	55%	-34%
Mishima-Hibiki	59%	6%
Homogène	60%	0%
Chisholm	77%	19%
Lockhart-Martinelli	81%	30%

La colonne « différence » montre le décalage de l'écart moyen dans ce cas avec celui prenant en compte tous les titres massiques. La corrélation d'Ide et Fukano semble donc être la mieux adaptée pour tous les titres testés lors des différentes expériences.

Afin de mieux visualiser les comportements des modèles pour une distribution, la Figure IV-126 et la Figure IV- 127 présentent l'évolution des pertes de pression dans les canaux de la section d'essais pour deux débits gazeux différents. Le premier est de 7 kg/h et le second de 30 kg/h.

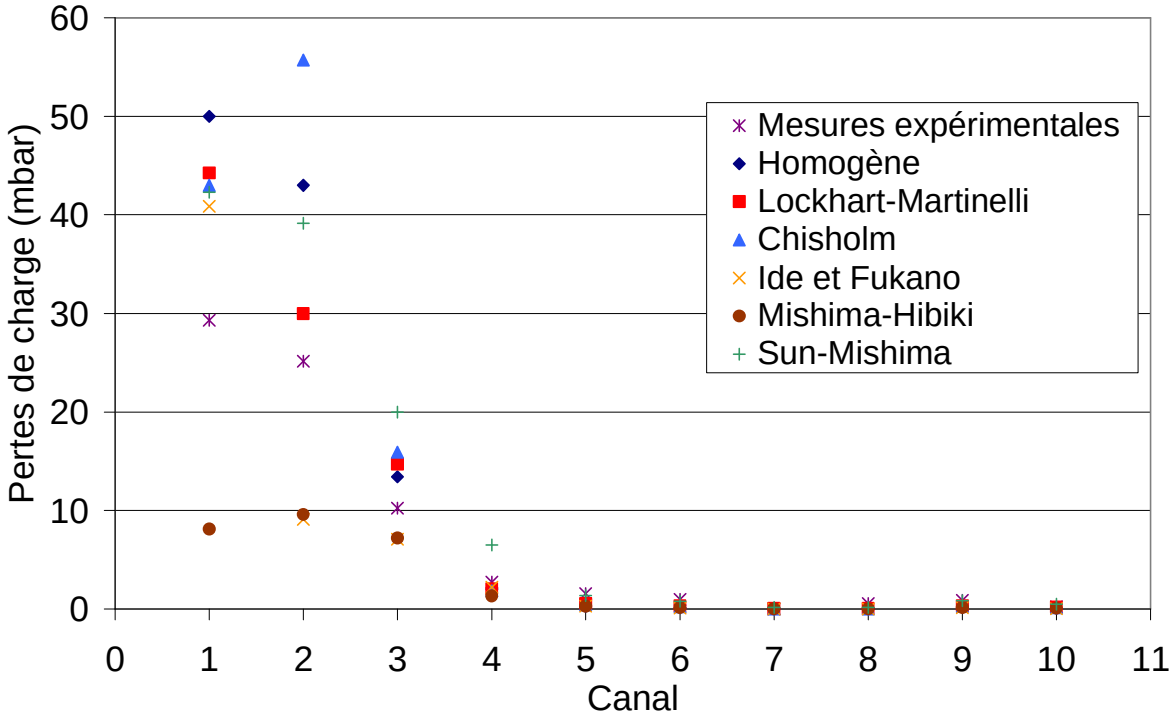


Figure IV- 126 : Comparaison des pertes de pression dans la section d'essais avec les modèles pour Q_{eau}=500kg/h et Q_{air} = 7 kg/h.

Le premier graphique permet de comparer les modèles avec des vitesses de gaz faibles. Les résultats obtenus donnent donc que la corrélation d'Ide et Fukano est la plus précise pour prédire les pertes de pression réelles. Cependant, il peut être remarqué que le modèle de Sun et Mishima suit exactement les mêmes tendances que les mesures expérimentales, mais avec un décalage important. Pour ces conditions, le modèle de Lockhart-Martinelli semble prédire relativement bien les mesures. Le second graphique offre la possibilité d'observer la comparaison avec les modèles pour des vitesses de gaz plus importantes. Dans ce cas là, le modèle permettant de mieux prédire les pertes de pression est celui d'Ide et Fukano. Cependant, il faut remarquer que ce modèle possède un maximum très élevé, ce qui dans le calcul de la moyenne des écarts augmente considérablement la valeur de cette moyenne. Le modèle de Sun et Mishima suit encore une fois très bien les fluctuations des pertes de pression dans la section d'essais, mais surestime fortement les pertes de pression pour les derniers canaux, ceux qui présentent un faible titre et une faible vitesse.

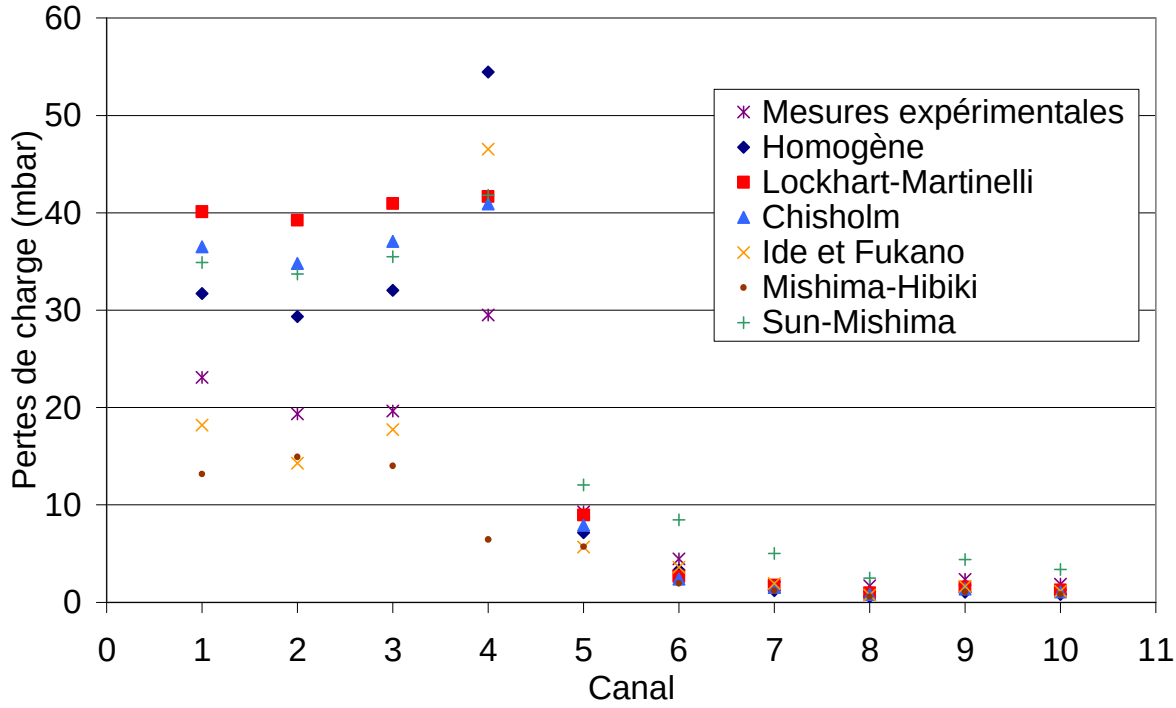


Figure IV- 127 : Comparaison des pertes de pression dans la section d'essais avec les modèles pour Q_{eau}=500kg/h et Q_{air} = 30 kg/h.

Le premier graphique permet de comparer les modèles avec des vitesses de gaz faibles. Les résultats obtenus montrent donc que la corrélation d'Ide et Fukano est la plus précise pour prédire les pertes de pression réelles. Cependant, il peut être remarqué que le modèle de Sun et Mishima suit exactement les mêmes tendances que les mesures expérimentales, mais avec un décalage important. Pour ces conditions, le modèle de Lockhart-Martinelli semble prédire relativement bien les mesures. Le second graphique permet d'analyser l'évolution des erreurs des modèles en fonction de la vitesse de la phase gazeuse. Dans ce cas-là, le modèle permettant de mieux prédire les pertes de pression est celui d'Ide et Fukano. Cependant, il faut remarquer que ce modèle possède un maximum très élevé, ce qui dans le calcul de la moyenne des écarts augmente considérablement la valeur de cette moyenne. Le modèle de Sun et Mishima suit encore une fois très bien les fluctuations des pertes de pression dans la section d'essais, mais sur-prédit fortement les pertes de pression pour les derniers canaux, ceux qui présentent un faible titre et une faible vitesse.

Ces comparaisons aux modèles montrent que la large gamme de conditions couverte par tous les essais n'est pas facilement prédictible par une seule corrélation. Sur l'ensemble des points, la corrélation d'Ide et Fukano semble néanmoins plus précise. Elle suit également la même évolution que les mesures mais avec des valeurs légèrement différentes. En effet, cette corrélation a été faite pour des écoulements eau-air dans des canaux verticaux, ce qui la rapproche des conditions dans lesquelles les mesures expérimentales de ce mémoire ont été faites. Ce modèle permet de donner des prédictions avec un écart moyen de 41% sur l'ensemble des conditions testées. Le modèle de Sun et Mishima est très intéressant car il présente lui aussi le même comportement que les mesures, quelles que soient les conditions, contrairement aux autres corrélations. Cependant, les valeurs obtenues sont plus éloignées des mesures que ne le sont les résultats obtenus à l'aide de la corrélation d'Ide et Fukano.

4. Etude de la fontaine générée dans le distributeur.

Lors des visualisations de l'écoulement dans le distributeur, le comportement de la fontaine au sein d'un écoulement a été étudié. En effet, l'étude de la fontaine est primordiale pour mieux comprendre comment le procédé évolue en fonction des conditions opératoires. L'étude de la fontaine permettra également de compléter la présentation de l'influence de certains paramètres sur ce procédé faite dans le deuxième chapitre.

4.1 Comportement de la fontaine avec un écoulement diphasique.

Les enregistrements vidéo ont mis en évidence un phénomène qui n'était pas attendu. En effet, la fontaine créée par les appareils n'avait pas de stabilité dans le temps. La fontaine est créée par intermittence au dessus du générateur d'ultrasons et le jet d'eau ainsi formé est entraîné par l'écoulement diphasique le long du distributeur. Le générateur créé à nouveau une nouvelle fontaine qui elle-même va être entrainée par l'écoulement. La Figure IV- 128 illustre ce phénomène. Les trois fontaines indiquées ont été produites par le même générateur d'ultrasons.

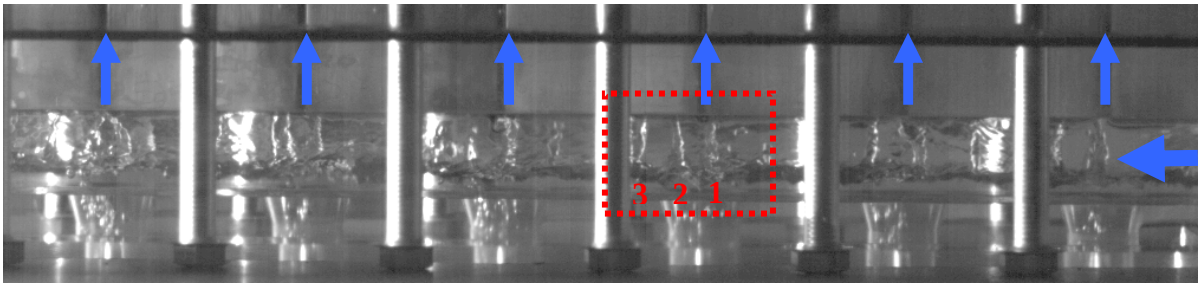


Figure IV- 128 : Photo du décalage des fontaines dans le distributeur pour Q_{eau} = 600 kg/h et Q_{air} = 7 kg/h.

Dans la littérature il a été remarqué une certaine fréquence sur le phénomène d'atomisation par **Il'in et Eknadiosyants [1965].** Cette fréquence a été observée comme étant dépendante de la tension d'alimentation ainsi que de la température du fluide. Les différentes périodes de formation du brouillard correspondaient à des fréquences comprises entre 50 et 150 Hz. Cependant, les auteurs précédents n'ont pas observé de fréquence de création de la fontaine car leurs études étaient faites avec un fluide statique. Dans le distributeur, un écoulement liquide est présent, ce qui permet de mettre en évidence cette fréquence d'apparition. La fréquence de l'atomisation est la même que celle de la création de la fontaine. Avec les dispositifs utilisés dans l'ensemble des expériences, la période d'apparition était de 0,01s, ce qui peut correspondre à une fréquence aux alentours de 100 Hz. Cette périodicité pourrait être liée d'une part au dispositif utilisé et d'autre part à la fréquence du réseau. En effet, la fréquence du réseau est de 50 Hz et le pont de diode du circuit générateur d'impulsion va alors augmenter la fréquence par un coefficient multiplicateur de deux. Néanmoins, des paramètres tels que la tension d'alimentation ou la température de l'eau ne semblait pas influencer cette fréquence, ni celle de la formation des gouttes. Le changement de fluide ne semblait pas non plus influencer cette fréquence.

Ce point peut se révéler intéressant car si la fréquence d'entrée au circuit électrique est plus importante, cela signifie que le nombre de fontaine dans le distributeur sera plus grand. Cela aurait deux conséquences : la première serait une alimentation plus importante des canaux car le liquide impacterait plus souvent le canal. De ce fait, la quantité de liquide envoyée dans le

canal par la fontaine serait transmise plus régulièrement, ce qui aboutirait sans doute à un total transmis plus important. La seconde conséquence serait que l'écoulement serait encore plus perturbé. En effet, plus de liquide serait projeté vers la partie supérieure du distributeur, ce qui d'une part diminuerait le volume de la zone noyée en fond de distributeur et d'autre part diminuerait le taux de vide en son sein.
Il faut toutefois noter qu'une fréquence trop importante ne serait pas forcément bénéfique car les fontaines créées se superposeraient. La fréquence optimale pourrait donc être celle qui permet d'avoir comme un film liquide uniforme composé de multiples fontaines.

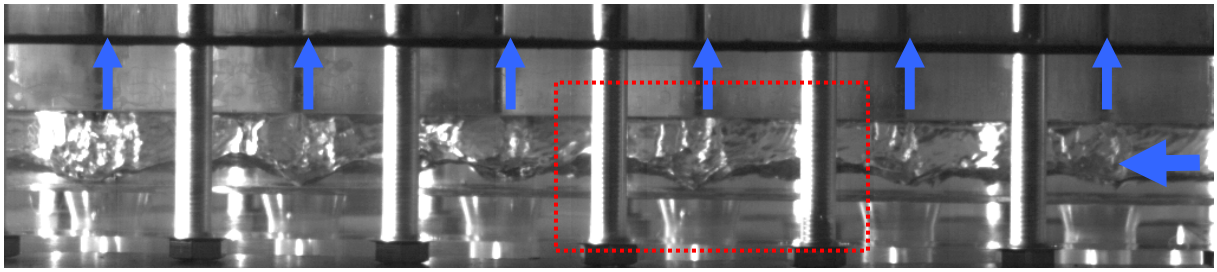


Figure IV- 129 : Photo du décalage des fontaines dans le distributeur pour Q_{eau} = 250 kg/h et Q_{air} = 7 kg/h.

Cet optimum pourrait être également lié à la distance sur laquelle la fontaine est déplacée. Ce déplacement est dépendant du débit liquide et plus précisément de sa vitesse. Plus celui-ci est important, plus la fontaine sera déplacée sur une distance importante. La comparaison de la photo précédente à un débit plus faible peut être faite à l'aide de la Figure IV- 129. Sur cette image, il peut être observé que les fontaines sont déplacées sur une distance moins importante et sont également plus rapprochées les unes des autres, ce qui, pour des débits liquides très faibles, pourrait s'apparenter à une seule fontaine. Cependant, cela ne veut pas dire qu'il y a une fontaine présente à tout moment. En effet, celle créée est légèrement décalée, laissant alors la place à la nouvelle. Dans ces cas-là, l'augmentation de la fréquence d'apparition des fontaines ne jouerait que sur la quantité de liquide envoyée vers les canaux et non sur une déstructuration plus importante de l'écoulement.
En plus de l'écoulement liquide qui joue un rôle sur le décalage des fontaines, le débit gazeux possède également son importance sur leur efficacité. Cette influence peut être visualisée sur la Figure IV- 130.

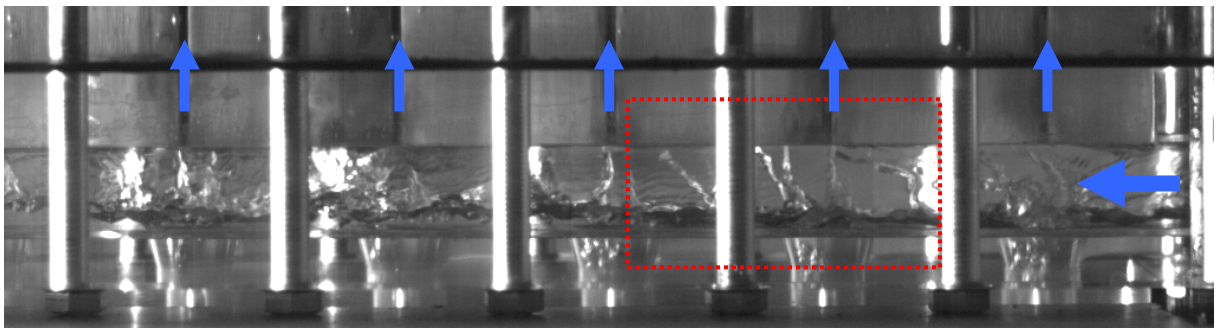


Figure IV- 130 : Photo du transport des fontaines dans le distributeur pour Q_{eau} = 250 kg/h et Q_{air} = 30 kg/h.

Cette photo peut être comparée à la précédente car elle a été prise pour un même débit liquide mais pour un débit gazeux plus important. Il est alors clairement visible que la fontaine ne se comporte pas de la même façon selon le débit d'air entrant. Dans ce cas, la fontaine est plus entraînée et est même balayée par l'air. De cette façon, les fontaines sont alors déstructurées en gouttes, qui sont emportées par l'air. Ceci permet d'avoir un régime dispersé dans une partie du distributeur. Alors que pour un débit gazeux plus faible, l'espace et le décalage des fontaines n'étaient pas très important, lorsque la vitesse de l'air augmente, ceux-ci

augmentent. Il est donc visible que les débits des deux phases influencent le comportement de la fontaine. Une fréquence d'apparition plus grande permettrait d'avoir plus de liquide en suspension et donc un écoulement encore plus modifié. De plus, cela autoriserait plus de liquide à se diriger vers les canaux sous-alimentés en eau.

4.2 Paramètres influant sur la qualité de la fontaine.

Les trois photos présentées ci-après montrent des conditions relativement bonnes pour les ultrasons. En effet, l'eau remplit correctement les puits contenant les générateurs, permettant à la fontaine de se créer normalement. Cependant, dans certains cas, les cavités ne sont pas correctement remplies d'eau. Lorsque la quantité de liquide dans ces emplacements diminue, la fontaine est alors affectée sur deux aspects. Le premier est la direction de la fontaine. Celle-ci sera dirigée en amont du canal faisant face, comme le montre la Figure IV- 131. Le niveau de la surface de l'eau dans le puits est indiqué par un trait en pointillés rouge.

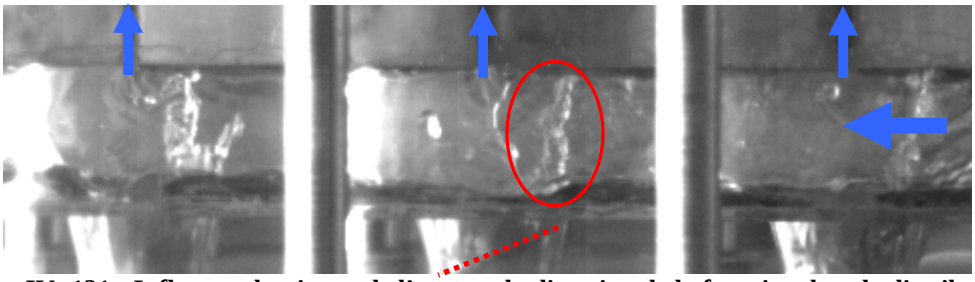


Figure IV- 131 : Influence du niveau de l'eau sur la direction de la fontaine dans le distributeur.

Le second aspect concerne sa hauteur. La hauteur de la fontaine est en effet dépendante de la hauteur de liquide présente au-dessus de l'élément piézo-électrique. La fontaine atteint une hauteur maximale pour une certaine profondeur de liquide comme le montre le graphique de la Figure IV- 132.

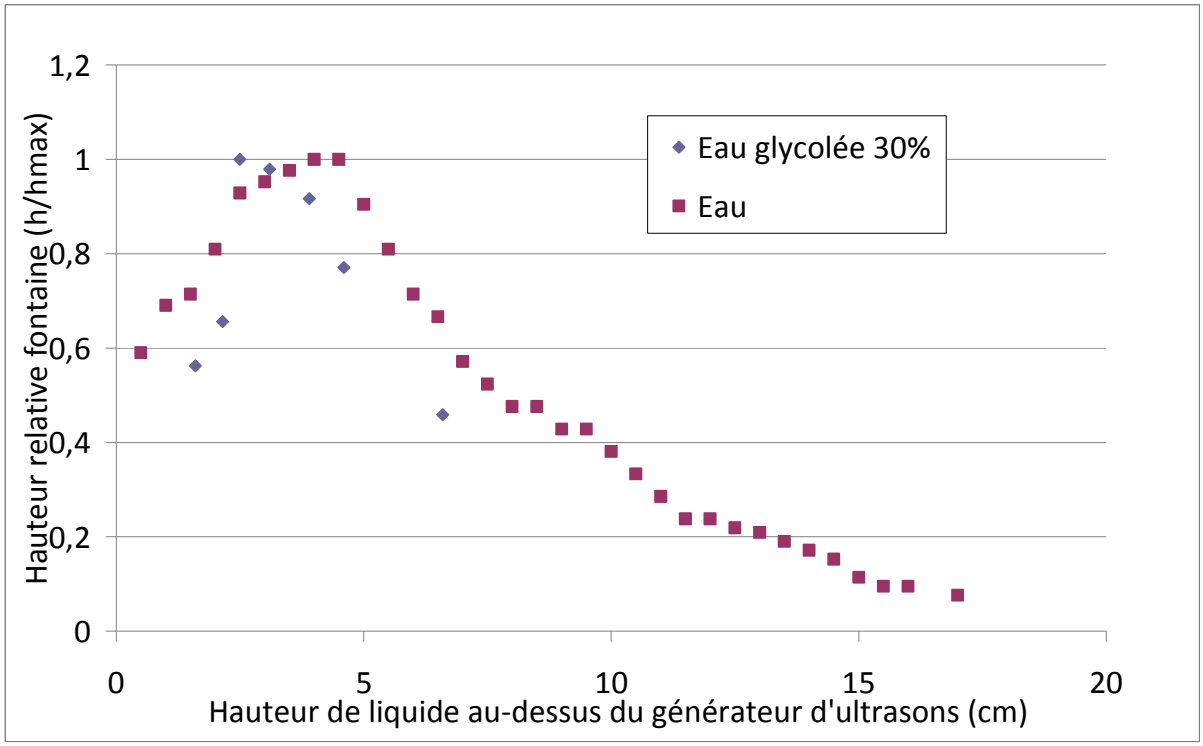


Figure IV- 132 : Évolution de la hauteur relative de la fontaine en fonction de la hauteur de liquide au-dessus de l'élément piézo-électrique.

Les résultats obtenus avec deux fluides différents (eau et eau glycolée à 30%) sont présentés en hauteur relative correspondant à la hauteur mesurée sur la hauteur maximale observée :

$$Hauteur\ relative = {h}/{h_{max}} \qquad \text{(IV.38)}$$

Il peut être remarqué que la hauteur d'eau en dessus de l'élément piézo-électrique pour une fontaine la plus haute est comprise entre 2,5 et 4,5 cm, valeur à laquelle la hauteur de la fontaine ne varie que faiblement. Pour le second fluide, le maximum est situé dans la même zone. Cependant, lorsqu'une comparaison est faite avec l'eau, la plage dans laquelle ce maximum ne varie que faiblement est plus étroite. De plus, le maximum atteint n'est pas le même. Pour l'eau, le maximum est de 5,6 cm alors que pour l'eau glycolée, ce maximum est de 4,8 cm. Néanmoins, les deux courbes semblent suivre les mêmes tendances.

Les photos de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustrent la différence de hauteur de fontaine en fonction de la profondeur de l'eau. Cette dépendance au niveau de l'eau est difficile à maîtriser dans un distributeur avec un écoulement diphasique car elle dépend du régime d'écoulement. Cependant, la faible variation de la hauteur de la fontaine dans une certaine plage de hauteur d'eau permet d'estimer les dimensions pour l'introduction des ultrasons dans un distributeur.

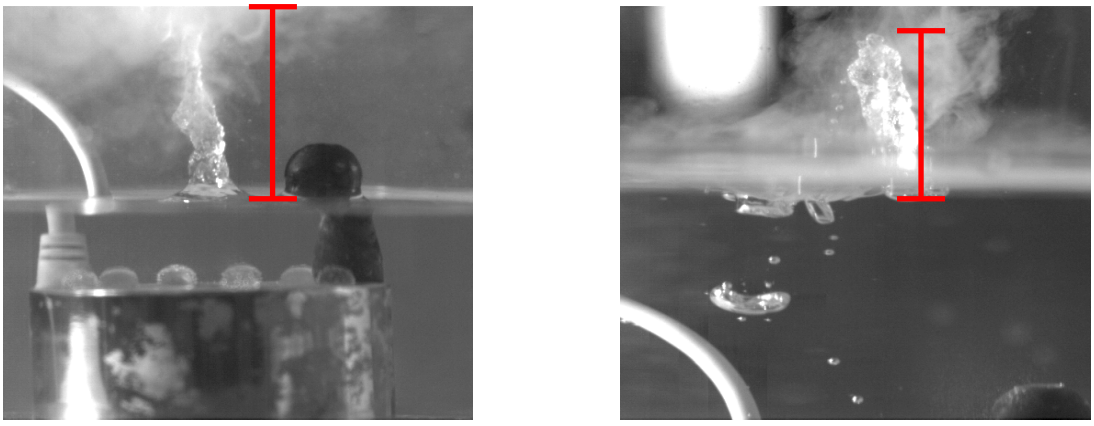


Figure IV- 133 : Influence de la hauteur d'eau sur la fontaine, à gauche h = 1,7 cm et à droite h = 6,5 cm.

La hauteur de la fontaine pour différents fluides peut être estimée à l'aide de l'intensité de l'onde arrivant à la surface ainsi qu'avec la pression acoustique (calculées respectivement avec les équations II.6 et II.4). Ces résultats sont présentés en valeur relative par rapport à l'eau dans le Tableau IV- 6.

Tableau IV- 6 : Influence du fluide sur l'intensité et la pression acoustique.

Fluide	Intensité arrivant à la surface du liquide pour une hauteur de 4cm	Pression acoustique
Eau	100%	100%
Ethanol	96%	128%
Eau glycolée	83%	90%

D'après ce tableau, le fluide transmettant la pression acoustique la plus importante à l'interface, pour une même puissance du générateur, est l'éthanol. Ceci est en accord avec les résultats expérimentaux présentés, en partie, sur la Figure IV- 134. L'eau glycolée présente la

plus faible pression acoustique ainsi que l'intensité la plus faible. Comparée à l'eau, le résultat correspond également aux valeurs de hauteur de fontaine indiquées précédemment (Figure IV- 132).

L'analyse de ces comportements s'est aussi révélée dépendante de la nature du fluide. Des essais avec deux autres fluides, l'éthylène glycol et de l'éthanol ont été réalisés. Ces deux fluides permettent de voir le comportement de la fontaine avec une masse volumique, une viscosité, ou encore une tension de surface différente. L'observation de ces nouvelles fontaines a montré que l'atomisation avait plus de difficulté à se produire qu'avec l'eau et de plus, que la hauteur de la fontaine était influencée. La différence entre ces deux fluides est visible sur la Figure IV- 134.

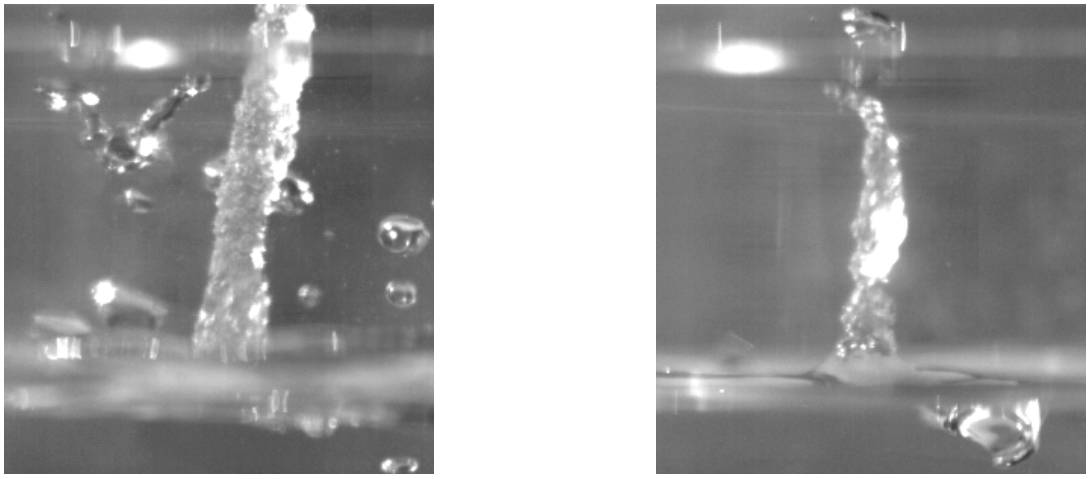


Figure IV- 134 : Influence de la nature du fluide sur la hauteur de la fontaine, gauche : éthanol, droite : glycol.

L'éthanol présente une fontaine avec un diamètre plus important et une hauteur et plus grande que le glycol (au moins 25% plus grande). Cette différence se retrouve sur la densité des deux fluides. Le premier ayant une densité de 0,798 et le second de 1,135. La viscosité dynamique est également moins importante pour l'éthanol que pour le glycol. Cette influence des propriétés physiques sur la fontaine est un point important à maîtriser pour l'implémentation des ultrasons dans un échangeur avec un fluide différent de l'eau. L'influence des ultrasons sur la distribution risque d'être différente selon le liquide utilisé. Néanmoins, une fontaine plus importante semble être un avantage car une plus grande quantité de liquide sera alors projetée vers le canal et dans le distributeur.

Concernant la hauteur de ces fontaines, elle peut être régulée, comme précisé précédemment, par la tension d'entrée au circuit générateur d'impulsions. Des tests ont été réalisés afin de voir son influence. De ces expériences, il apparaît une tension minimale nécessaire à la formation de la fontaine. En-dessous de cette valeur, la fontaine n'apparaît pas. Une fois que la fontaine apparaît, celle-ci grandit avec l'augmentation de la tension. A partir d'une certaine valeur (environ 80% de la tension de fonctionnement optimale), la hauteur ne semble plus influencée, contrairement au phénomène d'atomisation.
Dans un premier temps, la hauteur semble donc influencée par la tension d'alimentation et dans un second temps c'est l'atomisation qui va se voir améliorée avec l'augmentation de la tension, la fontaine ayant atteint sa hauteur maximale. L'influence de ce paramètre est visible sur la Figure IV- 135.

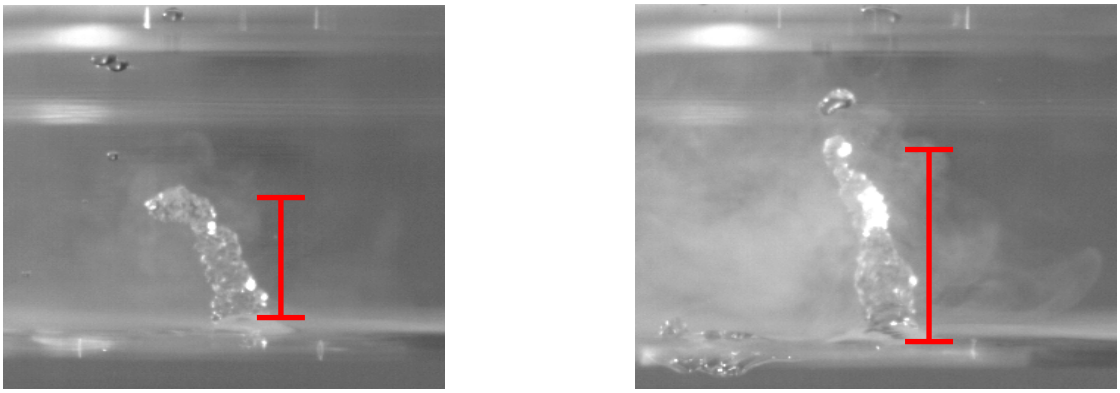


Figure IV- 135 : Influence de la tension d'alimentation sur la hauteur de la fontaine, à gauche 63% de la tension nominale et à droite 70%.

Cet élément peut donc être une autre variable à contrôler dans le distributeur. En effet, si des canaux deviennent suralimentés par l'activation des ultrasons, une diminution de la tension va diminuer la hauteur de la fontaine et donc la quantité de l'eau envoyée vers le canal. De ce fait, la tension peut être réglée pour avoir un débit homogène dans le canal considéré.

Conclusion générale et perspectives

L'optimisation d'un procédé est un but qui est naturellement recherché quel que soit le domaine de celui-ci. Il n'y a que très rarement une seule possibilité pour arriver à une amélioration. Dans le domaine de la distribution diphasique, nombreuses sont les solutions proposées pour en améliorer les performances. Une grande partie concerne cependant des dispositifs fixes et figés dans le temps, conçus pour un régime nominal et ne prenant donc pas en compte les régimes transitoires. Les méthodes actives d'optimisation de la distribution sont beaucoup moins nombreuses mais peuvent s'avérer plus intéressantes car elles permettent une flexibilité du système.

Ce mémoire a permis de mettre en avant, à travers le premier chapitre, les différentes composantes influençant la distribution diphasique. Une grande partie d'entre elles sont liées à la géométrie de l'échangeur. Les dimensions des canaux, du distributeur mais également les éléments amont ont un impact sur la distribution, et de ce fait, chacun doit être pris en compte lors de changements des conditions opératoires. Ceci est reflété dans l'analyse des profils de distribution observés dans la littérature. En effet, ces profils ne sont pas tous identiques, tout simplement car toutes les expériences ne sont pas réalisées dans les mêmes conditions, que cela soit au niveau du diamètre des canaux, distributeur, ou encore du nombre de canaux, de l'espacement entre eux. De plus, la distribution est très sensible aux conditions opératoires, telles que le titre massique ou encore la densité de débit massique. C'est également un point qui peut être différent entre les multiples expériences faites dans la littérature, à même titre massique mais un débit modifié, les profils ne sont plus identiques, même pour des sections d'essais similaires. Malgré ces difficultés, plusieurs auteurs ont cherché des solutions, pour la plupart passives, afin de changer le profil de distribution du régime nominal en une répartition homogène des deux phases. Une grande partie des cas présente une déstructuration de l'écoulement entrant dans le distributeur, afin de le rendre plus homogène. L'idée novatrice de cette étude est de remplacer une structure géométrique par une fontaine ultrasonore générée par un élément piézo-électrique.

Le second chapitre permet d'ailleurs d'approfondir l'étude de cette méthode qui est peu utilisée encore dans le domaine des échangeurs de chaleur et encore moins dans un écoulement diphasique. L'association de ces générateurs d'ultrasons et de la distribution diphasique peut alors sembler difficile. Toutefois, certaines études ont été menées montrant le comportement de ces fontaines dans différentes conditions et également la propagation des ultrasons au sein d'un liquide. Ces études ont permis une meilleure compréhension des ultrasons afin de l'intégrer correctement dans l'échangeur et plus précisément dans le distributeur. Une section d'essais spécifique a été conçue afin de répondre aux besoins et de satisfaire les contraintes imposées par cette technologie. Dans le but de comprendre et d'analyser les différents comportements dans la section d'essais, celle-ci a été construite en plexiglas, ce qui autorisait des visualisations à l'aide d'une caméra rapide notamment. Néanmoins, cette particularité a conduit à réaliser des essais dans des conditions adiabatiques, et d'analyser uniquement la distribution des deux phases d'un mélange eau et air.

Une multitude de conditions opératoires différentes ont été testées et ceci, dans différentes configurations de la section d'essais. Les premiers essais ont permis une approche de la distribution spécifique à l'échangeur conçu. L'influence des paramètres tels que le débit de la phase liquide et celui de la phase gazeuse sur la répartition de chacune d'elle a été étudiée. Pour ces premières expériences, les générateurs d'ultrasons n'étaient pas activés afin de caractériser la distribution de base. Malgré des profils de distribution très différents de ceux de la littérature, ces essais ont montré qu'une phase était répartie de façon plus homogène lorsque son débit massique à l'entrée du distributeur était élevé. Afin d'analyser plusieurs

résultats différents et de les comparer entre eux, l'utilisation de coefficients statistiques s'est révélée nécessaire. Le coefficient STD (STandard Deviation) qui représente la dispersion des ratios des débits mesurés dans chaque canal sur le débit homogène théorique a été utilisé comme principal outil de comparaison dans l'étude. L'analyse menée avec ce coefficient en fonction des conditions opératoires a montré que lorsque le titre massique augmente, sa valeur diminue pour la phase gazeuse caractérisant une amélioration de la distribution gazeuse et lorsque la densité de flux massique augmente, c'est la valeur du coefficient pour la phase liquide qui diminue. Afin de se rapprocher des distributions observées dans la littérature pour la même configuration d'échangeur (distributeur horizontal et canaux verticaux avec écoulement ascendant), des vannes en sortie des canaux ont permis de créer des pertes de charges supplémentaires et ainsi obtenir une distribution similaires à celles des études réalisées par d'autres auteurs.

Ces nouvelles distributions ont présenté des tendances différentes au niveau des valeurs du coefficient STD pour la phase gazeuse. En effet la distribution se dégrade lorsque le débit d'air augmente en entrée de la section d'essais. Pour la distribution liquide, les mêmes tendances ont été retrouvées. Lorsque les générateurs d'ultrasons ont été activés, la répartition de l'eau dans les dix canaux a, à chaque fois, été améliorée. Cette amélioration était d'autant plus importante que le débit liquide était faible. Pour la phase liquide, les résultats étaient plus mitigés. Cependant pour prendre en compte les deux phases, et également dans l'optique d'améliorer la distribution diphasique pour intensifier les transferts thermiques, une étude sur la répartition du titre a été réalisée. Les résultats sont sans appel, pour toutes les conditions avec les configurations 1 et 2, la distribution du titre massique est améliorée. Les dégradations observées sur la phase gazeuse sont donc largement compensées par les améliorations sur la répartition de la phase liquide.

Ces modifications sur la distribution, plus ou moins prononcé selon les débits massiques entrant dans la section d'essais sont donc liés à l'ajout des ultrasons mais plus précisément aux fontaines formées dans le distributeur. Ces fontaines perturbent complètement l'écoulement initial. Le régime est alors changé, et ce n'est plus un régime stratifié seul qui parcourt le distributeur mais en plus, un régime dispersé fait son apparition. Les fontaines servent donc à propulser le fluide dans les canaux sous-alimentés mais, avec un débit d'air important, permettent de propulser des gouttes à travers le distributeur, ce qui homogénéise mieux les deux phases et permet donc une meilleure distribution de celles-ci.

Pour aller plus loin dans l'analyse des effets des générateurs d'ultrasons, des essais ont été réalisés pour différents placements de ces appareils. Ces tests ont montré que pour être efficaces, les fontaines devaient avoir une perturbation amont (sous forme de fontaine) afin d'alimenter de façon la plus optimale possible le canal en vis-à-vis. Il a également été observé que les générateurs présents dans une zone monophasique ne changeaient en rien l'alimentation des canaux.

L'influence du nombre de canaux sur l'effet des ultrasons a également été étudiée en fermant certains canaux (les premiers). Cependant, aucune tendance nette n'a pu être tirée même si le nombre de canaux semble influencer la configuration optimale du placement des générateurs d'ultrasons. Néanmoins dans la majeure partie des cas, l'usage d'ultrasons en amont des canaux en plus d'ultrasons en face des canaux ouverts semblent donner les meilleurs résultats.

Concernant les pertes de pressions, celles-ci ont également été analysées dans le dernier chapitre. Une comparaison avec et sans ultrasons semblent montrer que les fontaines homogénéisent les deux fluides passant dans les canaux en diminuant les passages de bouchons (d'air ou d'eau) en maintenant d'une façon continue le contact avec l'entrée du canal et la phase liquide. Les fluctuations de pression au sein même du canal sont donc diminuées avec l'ajout d'une fontaine à sa base. Toutefois, les pertes de pressions mesurées

ne correspondent précisément à aucun modèle utilisé. Les résultats les plus proches font état d'un écart moyen de 41%.
L'utilisation d'une caméra rapide a permis d'observer une génération discontinue de la fontaine ultrasonore avec une période de 0,01 seconde. De ce fait, la quantité de mouvement du fluide n'est pas constante dans le temps. Il pourrait être envisageable de réguler cette fréquence de fluctuation de la fontaine afin de contrôler la déstructuration de l'écoulement diphasique. Une fréquence de fontaine plus importante pourrait alors améliorer l'alimentation du canal en vis-à-vis du générateur d'ultrasons.

Tous les résultats présentés dans ce mémoire montrent que les fontaines ultrasonores, ont un effet non négligeable sur la distribution diphasique et améliore la répartition de celle-ci dans une grande majorité des cas. Ces bons résultats ont permis de conduire à un dépôt de brevet en cours. Il serait néanmoins intéressant de poursuivre l'analyse sur différents paramètres. La géométrie du distributeur influe significativement sur la qualité de la distribution. Il pourrait sembler intéressant d'étudier l'influence de paramètres géométriques du distributeur.
Le diamètre hydraulique du distributeur, en diminuant notamment la hauteur permettrait d'observer l'effet d'un écoulement plus confiné sur les fontaines générées par les ultrasons. La fontaine étant sensiblement d'un diamètre plus important en se rapprochant de sa base, le débit envoyé dans les canaux serait potentiellement plus important. De plus, l'obstacle créé par cette déformation de la surface libre de l'écoulement diphasique serait plus imposant, notamment pour le débit d'air. A ce niveau il pourrait être également intéressant de mesurer les pertes de pression au sein même du distributeur pour voir si les fontaines créent une perte de charges négligeables ou pas.
L'espacement entre les canaux pourrait également être un paramètre géométrique du distributeur à étudier. En effet, une perturbation amont influence le débit parcourant le canal. Si la perturbation est placée à un endroit plus proche de ce canal, il faudrait étudier l'influence sur le débit parcourant ce canal.
Enfin la profondeur des puits pourrait être changée, une diminution de celle-ci pourrait générer des fontaines de hauteurs différentes et donc peut-être, changer le débit alimentant les canaux.
En plus de ces modifications géométriques, la hauteur de fontaine pourrait être également réglée en modifiant la tension arrivant sur chaque générateur d'ultrasons. En effet pour certains cas observés dans ce mémoire, la distribution était tellement modifiée que les canaux sous-alimentés devenaient suralimentés avec l'activation des ultrasons. Une diminution de la puissance des fontaines pourrait réduire ces alimentations trop importantes et donc améliorer l'homogénéisation la distribution. Il faudrait cependant réguler chaque appareil individuellement pour cela.
Le choix du fluide semble jouer un rôle important. En effet, il faudrait étudier le comportement d'un fluide frigorigène dans l'échangeur. L'interaction avec les ultrasons et la formation des fontaines serait un point décisif pour pousser l'étude vers la prochaine étape. Dans le dernier chapitre, il a été observé que la nature du fluide influence la hauteur de la fontaine notamment. Une plus grande fontaine serait bien sur bénéfique car elle permettrait de pouvoir propulser plus de liquide dans le canal et donc d'avoir une plus grande marge de manœuvre.
L'étude de ce mémoire ne s'est faite que sur une configuration d'échangeur : un distributeur horizontal et avec des canaux verticaux ascendant. Une conception avec un écoulement descendant dans les canaux serait également possible en plaçant les générateurs en amont du distributeur. En effet, les fontaines étant pulvérisées par les forts débits gazeux, cela dirigerait la phase liquide au fond du distributeur, vers les canaux sous-alimentés dans cette configuration. De la même façon sur des distributeurs de faibles dimensions, l'ajout de

générateurs d'ultrasons en amont permettrait de rendre l'écoulement totalement dispersé, ce qui homogénéiserait bien les deux phases et donnerait sans doute lieu à une meilleure distribution.
Cette étude s'est également faite dans des conditions adiabatiques, il serait très intéressant d'étudier l'impact de ces changements de profils de distribution sur les performances thermiques de l'échangeur. En effet, il serait intéressant de comparer l'amélioration apportée par les changements sur la distribution sur l'efficacité thermique par rapport aux différentes énergies supplémentaires nécessaires. Les générateurs d'ultrasons nécessitent une alimentation électrique mais ils provoquent également une faible augmentation des pertes de pressions. Il faudrait donc une nouvelle puissance de pompage pour vaincre ces pertes de pressions supplémentaires.
A plus long terme, il peut être imaginé des générateurs d'ultrasons spécifiques aux différents distributeurs et totalement différents de ceux utilisés dans ce mémoire. Des éléments piézo-électriques directement intégrés à la géométrie du distributeur réduiraient donc l'encombrement de cette technologie.
Les ultrasons apparaissent comme une méthode active possible pour réguler la distribution diphasique dans les échangeurs. Cette étude a montré la faisabilité de cette technologie. Cependant des études complémentaires semblent indispensables afin d'intégrer celle-ci sur un vrai prototype et non plus sur une section d'essais en plexiglas. Ceci pourrait être fait en partie lors d'une prochaine thèse qui poursuivra celle effectuée et décrite dans ce mémoire. Enfin, même si la régulation des générateurs d'ultrasons semble réalisable, une connaissance au préalable de la distribution spécifique à l'échangeur reste nécessaire.

Références

1. Ablanque, N., et al., *Two-phase flow distribution in multiple parallel tubes.* International Journal of Thermal Sciences, 2010. 49(6): p. 909-921.
2. Acrivos, A., D.B. Babcock, and R.L. Pigford, *Flow Distribution in Manifolds.* Chemical Engineering Science, 1959. 10: p. 112-125.
3. Agostini B., *Etude expérimentale de l'ébullition de fluide régrigérant en convection forcée dans les mini-canaux.* Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I, 174 pages, octobre 2002.
4. Ahmad, M., G. Berthoud, and P. Mercier, *General characteristics of two-phase flow distribution in a compact heat exchanger.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. 52(1-2): p. 442-450.
5. Ahmad, M., et al., *CFD simulation of a stratified flow at the inlet of a compact plate heat exchanger*. Computational Methods in Multiphase Flow IV, 2007. 56: p. 75-85.
6. Akers W.W., Deans H.A., Crosser O.K., *Condensing heat transfer within horizontal tubes*. Chemical Engineering Progress Symposium Series, 59, 1958, p. 171-176.
7. Azzopardi, B.J., *The effect of the side arm diameter on the two-phase flow split at a "T" junction.* International Journal of Multiphase Flow, 1984. 10(4): p. 509-512.
8. Azzopardi, B.J., *Phase separation at T junctions.* Multiphase Science and Technology, 1999. 11(4): p. 223-329.
9. Azzopardi, B.J. and P.B. Whalley, *The effect of flow patterns on two-phase flow in a T junction.* International Journal of Multiphase Flow, 1982. 8(5): p. 491-507.
10. Bajura, R.A. and E.H. Jones, *Flow Distribution Manifolds.* Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 1976. 98 Ser 1 (4. Décembre): p. 654-666.
11. Bassiouny, M.K. and H. Martin, *Flow Distribution and Pressure-Drop in Plate Heat-Exchangers .1. U-Type Arrangement.* Chemical Engineering Science, 1984. 39(4): p. 693-700.
12. Bergles, A.E., et al., *Boiling and evaporation in small diameter channels.* Heat Transfer Engineering, 2003. 24(1): p. 18-40.
13. Bernoux, P., *Etude de la distribution d'un mélange liquide-vapeur à l'entrée des échangeurs de chaleur.*, in *Mécanique-Energétique*. 2000, Université Henri Poincaré: Nancy. p. 240.
14. Bernoux, P., P. Mercier, and M. Lebouche, *Two-phase flow distribution in a compact heat exchanger.* Proceedings of the Third International Conference on Compact Heat Exchangers, 2001: p. 347-352.
15. Buel, J.R., H.M. Soliman, and G.E. Sims, *Two-phase pressure drop and phase distribution of a horizontal tee junction.* International Journal of Multiphase Flow, 1994. 20(5): p. 819-836.
16. Caniere, H., et al. *Experimental study of two-phase flow through distributors*. in *Collection of Technical Papers - 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference Proceedings*. 2006. San Francisco, CA.
17. Cavallini A., Del Col D., Doretti L., Matkovic M., Rossetto, Zilio L.C., Two-phase frictional pressure gradient of R236ea, R134a and R410A inside multi-port mini-channels. Experimental Thermal and Fluid Science 29, 2005, p. 861-870.
18. Chisholm D., Laird A.D.K., *Two-phase in rough tubes*. Trans, ASME, 80-2, 1958, p. 227-286.

19. Cho, H. and K. Cho, *Two-phase flow distribution and pressure drop in microchannel tubes under non-heating and heating conditions.* Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 2006. 10(3): p. 233-247.
20. Cho, H.G. and K.N. Cho, *Mass flow rate distribution and phase separation of R-22 in multi-microchannel tubes under adiabatic condition.* Microscale Thermophysical Engineering, 2004. 8(2): p. 129-139.
21. Choi C.W., Yu D.L., Kim M.H., *Adiabatic two-phase flow in rectangular microchannels with different aspect ratios: Part I – Flow pattern, pressure drop and void fraction.* International Journal of Heat and Mass Transfer 54, 2011, 618-624.
22. Choi, C.W., et al., *Distribution of two phase flow in the evaporator header having multi-channels.* Proceedings of the 3rd Asian Conference on Refrigeration and Air-Conditioning Vols I and II, 2006: p. 113-116.
23. Collier J., Thome J., *Convective boiling and condensation.* Oxford Engineering Science Series 38, 3rd Edition, New York, 1994.
24. Das, G., P.K. Das, and B.J. Azzopardi, *The split of stratified gas-liquid flow at a small diameter T-junction.* International Journal of Multiphase Flow, 2005. 31(4): p. 514-528.
25. Datta, A.B. and A.K. Majumdar, *Flow Distribution in Parallel and Reverse Flow Manifolds.* International Journal of Heat and Fluid Flow, 1980. **2**(4): p. 253-262.
26. Donnelly T.D., Bernoff A.J., Dasnurkar S., Ditmire T., *Using ultrasonic atomization to produce an aerosol of micron-scale particles.* Review of Scientific Instruments 76, 113301, 2005.
27. Esche, R. (1955) Communications du congrès international sur les traitements par les ultrasons, p. 179 (Marseilles).
28. Fei, P. and P.S. Hrnjak, *Adiabatic Developing Two-Phase Refrigerant Flow in Manifolds of Heat Exchangers,* in *ACRC Technical Report TR-225*. 2004, University of Illinois at Urbana Champaign.
29. Friedel L., *Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow*. European Two Phase Flow Group Meet., Ispra, Italy, paper E2, 1979.
30. Gondrexon N., Renaudin V., Petrier C., Clement M., Boldo P., Gonthier Y., Bernis A., *Experimental study of the hydrodynamic behaviour of a high frequency ultrasonic reactor*. Ultrasonics Sonochemistry 5, 1998, 1-6.
31. Haraguchi H., Koyama S., Fujii T., *Condensation of refrigerants HCFC22, HFC134a and HCFC123 in a horizontal smooth tube (1st report, proposal of empirical expressions for the local frictional pressure drop).* Trans. JSME, (B), 60-574 (In Japanese), 1994, p. 239-244.
32. Henri J.A.R., *Dividing annular flow in a horizontal tee*. Int. J. Multiphase Flow 7, 1981, P. 343-355.
33. Hervieu E., *Ecoulement monophasique à bulles dans un écoulement en té : étude théorique et expérimentale.* Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1988.
34. Hong, K.C., *Two-Phase Flow Splitting at a Pipe Tee.* JPT, Journal of Petroleum Technology, 1978. 30: p. 290-296.
35. Horiki, S. and M. Osakabe. *Water flow distribution in horizontal protruding-type header contaminated with bubbles*. in *American Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Division, (Publication) HTD*. 1999. Nashville, TN, USA: ASME.
36. Hrnjak, P., *Developing adiabatic two phase flow in headers - Distribution issue in parallel flow microchannel heat exchangers.* Heat Transfer Engineering, 2004. **25**(3): p. 61-68.

37. Hrnjak, P., *Flow distribution issues in parallel flow heat exchangers*. 2004, ASHRAE annual Meeting.
38. Huamao Li , Yuhua Li , Zhouhua Li, *The heating phenomenon produced by an ultrasonic fountain*, Ultrasonics Sonochemistry 4 (1997) 2 l 7-218
39. Hwang, S.T., H.M. Soliman, and R.T. Lahey Jr, *Phase separation in dividing two-phase flows.* American Institute of Chemical Engineers, Workshop, 1988. **14**(4): p. 439-458.
40. Hwang, Y., D.H. Jin, and R. Radermacher, *Refrigerant distribution in minichannel evaporator manifolds.* Hvac&R Research, 2007. 13(4): p. 543-555.
41. Ide H., Fukano T., *Experimental research on the correlations of holdup and frictional pressure drop in air-water two-phase flow in a capillary rectangular channel.* Experimental Thermal and Fluid Science 29, 2005, 833-841.
42. Idriss, Thèse, 1992
43. Il'in, B. I. and Eknadiosyants, O. K., (1966), *Nature of the atomization of liquids in a ultrasonic fountain*, Akust. Zh., Vol. 12, N°3, 310-318 [(1967) Soviet Physics - Acoustics, 12, 269].
44. Issenmann, B., Wunenburger, R., Manneville, S., Delville, J.-P., *Bistabilité d'une surface liquide induite par la pression de radiation et application à l'atténuation d'ondes capillaires*, Communication au 18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27 - 31 août 2007.
45. Kim, N.H. and S.P. Han, *Distribution of air-water annular flow in a header of a parallel flow heat exchanger.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008. 51(5-6): p. 977-992.
46. Kim, N.H. and D.Y. Kim, *Two-phase refrigerant distribution in a parallel-flow heat exchanger.* Journal of Enhanced Heat Transfer, 2010. **17**(1): p. 59-75.
47. Kim, N.H. and T.R. Sin, *Two-phase flow distribution of air-water annular flow in a parallel flow heat exchanger.* International Journal of Multiphase Flow, 2006. **32**(12): p. 1340-1353.
48. Kim, N.-H., J.-H. Ham, and D.-Y. Kim. *Two-phase refrigerant distribution in a parallel-flow heat exchanger*. in *International Congress of Refrigeration*. 2007. Beijing.
49. Kim, S.Y., E. Choi, and Y.I. Cho, *The Effect of Header Shapes on the Flow Distribution in a Manifold for Electronic Packaging Applications.* International Communications in Heat and Mass Transfer, 1995. 22(3): p. 329-341.
50. Kitto Jr, J.B. and J.M. Robertson, *Effects of Maldistribution of Flow on Heat Transfer Equipment Performance.* Heat Transfer Engineering, 1989. 10(1): p. 18-25.
51. Kojima Y., Asakura Y., Sugiyama G., Koda S., *The effects of acoustic flow and mechanical flow on the sonochemical efficiency in a rectangular sonochemical reator.* Ultrasonics Sonochemistry 17, 2010, 978-984.
52. Koyama, S., et al., *Developing adiabatic two-phase flow distribution in minichannel-branch headers.* Proceedings of the 3rd Asian Conference on Refrigeration and Air-Conditioning Vols I and II, 2006: p. 125-128.
53. Koyama S., Kuwahara K., Nakashita K., Yamamoto K., *An experimental study on condensation of refrigerant R134a in a multi-port extruded tube.* International Journal of Refrigeration 24, 2003, p. 425-432.
54. Kulkarni, T., C.W. Bullard, and K. Cho, *Header design tradeoffs in microchannel evaporators.* Applied Thermal Engineering, 2004. **24**(5-6): p. 759-776.
55. Kundt, Lehmann O., *Ueber longitudinale schwingungen and Klangfiguren in cylindrishen flüssigkeitssaülen.* Annales de Poggendorff, t. CLIII, p. 1, 1874.

56. Kurosawa M., Watanabe T., Futami A., Higuchi T., *Surface wave atomizer.* Sensors and Actuators A 50, 1995, 69-74.
57. Lang, R. J. (1962), *Ultrasonic atomization of liquids*, J. Acoust. Soc. Am. 34:6-8.
58. Lee, J.K., *Two-phase flow behavior inside a header connected to multiple parallel channels.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2009. 33(2): p. 195-202.
59. Lee, J.K., *Branching of two-phase flow from a vertical header to horizontal parallel channels.* Journal of Mechanical Science and Technology, 2009. 23(6): p. 1628-1636.
60. Lee, J.K., *Optimum channel intrusion depth for uniform flow distribution at header-channel junctions.* Journal of Mechanical Science and Technology, 2010. 24(7): p. 1411-1416.
61. Lee, J.K. and S.Y. Lee, *Dividing two-phase annular flow within a small vertical rectangular channel with a horizontal branch.* Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries-2001, 2001: p. 361-368.
62. Lee, J.K. and S.Y. Lee, *Distribution of two-phase annular flow at header-channel junctions.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2004. 28(2-3): p. 217-222.
63. Lee, S.Y. *Flow distribution behaviour in condensers and evaporators*. in *Proceedings of the 13th International Heat Transfer Conference*. 2006. Sydney, Australia.
64. Legay M., Le Person S., Gondrexon N., Boldo P., Bontemps A., *Performances of two heat exchangers assisted by ultrasound.* Applied Thermal Engineering 37, 2012, 60-66.
65. Lemonnier H., Hervieu E., *Theoritical modeling and experimental investigation of single-phase and two-phase flow division at a junction.* Nucl. Eng. Design 125, 1991, p. 201-213.
66. Levac, M.L.J., et al., *Systematic testing of the two-phase pressure-drop equations for horizontal dividing T-junctions.* Multiphase Science and Technology, 2002. 14(3): p. 227-266.
67. Li, G., et al., *Application of CFD models to two-phase flow in refrigerant distributors.* HVAC and R Research, 2005. 11(1): p. 45-62.
68. Li, K.N., X.B. Wu, and Y.L. Yin, *Experimental Study of Gas-Liquid Two-Phase Flow Even Distribution in Parallel-Flow Evaporator.* Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2010. 23(6): p. 1111-1114.
69. Lockhart R.W., Martinelli R.C., *Proposed correlation of data for isothermal two-phase. Two-Component Flow in Pipes*. Chemical Engineering Progress Symposium Series, 45, 1949, p. 39-48.
70. Maciaszek T., *Etude des écoulements diphasique eau-vapeur dans un branchement en Té.* Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1987.
71. Marchitto, A., Devia F., Fossa M., Guglielmini G., Schenone C., *Experiments on two-phase flow distribution inside parallel channels of compact heat exchangers.* International Journal of Multiphase Flow, 2008. 34(2): p. 128-144.
72. Marchitto, A., M. Fossa, and G. Guglielmini, *Distribution of air-water mixtures in parallel vertical channels as an effect of the header geometry.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2009. 33(5): p. 895-902.
73. Mc Adams W., *Vaporization inside horizontal tubes –ii- benzene-oil mixtures.* Transactions of the ASME 64, 1942, 193.
74. Mc Callion O.N.M., Patel M.J., *Viscosity effects on nebulisation of aqueous solutions.* International Journal of Pharmaceutics 130, 1996, 245-249.
75. Mishima K., Hibiki T., *Some characteristics of air-water two-phase flows in small diameter vertical tubes*. International Journal of Multiphase flow, 22(4), 1996, p. 703-712.

76. Mitome, H., *Study of the Generation Mechanism of an Acoustic Jet Through Visualization Experiments.* Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 30 (1991) Supplement 30-1, pp. 60-62.
77. Moffat R.J., *Describing the uncertainties in experimental results*, Experimental and Thermal Fluid Science, Vol. 1, pp 3-17, 1988.
78. Mueller, A.C. and J.P. Chiou, *Review of Various Types of Flow Maldistribution in Heat Exchangers.* Heat Transfer Engineering, 1988. 9(2): p. 36-50.
79. Mueller-Steinhagen H., Heck K., *Single friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes.* Chemical engineering and processing, Vol. 20, Issue 6, November 1986, p. 297-308.
80. Nakamura, Y., W. Jia, and M. Yasuhara, *Incompressible-Flow through Multiple Passages.* Numerical Heat Transfer Part a-Applications, 1989. 16(4): p. 451-465.
81. Oh, S.J., K.S. Lee, and S.J. Moon, *Optimal design of a parallel-flow heat exchanger using a response surface methodology.* Numerical Heat Transfer Part a-Applications, 2006. 49(4): p. 411-426.
82. Oliet, C., et al., *Numerical studies of two-phase flow distribution in evaporators.* Proceedings of the 22th International Congress of Refrigeration, 2007.
83. Osakabe, M., T. Hamada, and S. Horiki, *Water flow distribution in horizontal header contaminated with bubbles.* International Journal of Multiphase Flow, 1999. 25(5): p. 827-840.
84. Paneva R., Temmel G., Burte E., Ryssel H., *Microchanical ultrasonic liquid nebulizer.* Sensors and Actuators A 62, 1997, 765-767.
85. Perry, *Perry's chemical engineer handbook (4th edition),* McGraw-Hill, 1997.
86. Poggi, F., *Etude de la distribution d'écoulements mono- et diphasiques dans un échangeur à mini-canaux. Pertes de pression régulières et singulières.*, in *Mécanique-Energétique*. 2008, Université Joseph Fourier: Grenoble. p. 240.
87. Qi A., Yeo L.Y., Friend J.R., *Interfacial destabilization and atomization driven by surface acoustic waves.* Physics of Fluids 20, 074103, 2008.
88. Rajan R., Pandit A.B., *Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomisation.* Ultrasonics 39, 2001, 235-255.
89. Reimann, J., H.J. Brinkmann, and R. Domanski, *Gas-liquid flow in dividing T-junction with horizontal inlet and different branch orientations and diameters.* Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institue fur Reaktorbauelemente Report KfK, 1988. 4399: p. 105-119.
90. Reimann, J. and W. Seeger, *Two-phase flow in a T-junction with a horizontal inlet. Part II: Pressure differences.* International Journal of Multiphase Flow, 1986. 12(4): p. 587-608.
91. Romie F., *Private communication to P. Lottes* (see Lottes, 1961). American Standard Co.
92. Saba, N. and R.T. Lahey, *The Analysis of Phase-Separation Phenomena in Branching Conduits.* International Journal of Multiphase Flow, 1984. 10(1): p. 1-20.
93. Seeger W., 1985, *Untersuchungen zum Druckabfall und zur Massenstromumverteilung von Zweiphasenströmungen in rechtwinkligen Rohrverzweigungen*. Dissertation, Universität Karlsruhe, KfK 3876.
94. Seeger, W., J. Reimann, and U. MÃ¼ller, *Two-phase flow in a T-junction with a horizontal inlet. Part I: Phase separation.* International Journal of Multiphase Flow, 1986. 12(4): p. 575-585.
95. Shoham, O., J.P. Brill, and Y. Taitel, *Two-phase flow splitting in a tee junction-experiment and modelling.* Chemical Engineering Science, 1987. 42(11): p. 2667-2676.

96. Soliman M., Schuster J., Berenson P., A general heat transfer correlation for annular flow condensation. ASME Ser. C, 90-2, 1968, p. 267-276.
97. Söllner K. Trans. Faraday Soc. 32, 1952 (1936).
98. Sun L., Mishima K., *Evaluation analysis of prediction methods for two-phase flow pressure drop in mini-channels.* International Journal of Multiphase Flow 35, 2009, 47-54.
99. Teclemariam Z., Soliman H.M., Sims G.E., Kowalski J.E., *Experimental investigation of the two-phase flow distribution in the outlets of a horizontal multi-branch header*, Nuclear Engineering and Design 222 (2003) 29-39.
100. Timothy G. Leighton, *What is ultrasound?*, Progress in Biophysics and Molecular Biology 93 (2007) 3–83
101. Triplett K., Ghiaasiaan S., Abdel-Khalik S., LeMouel A., McCord B., *Gas liquid two-phase flow in microchannels, Part I: two-phase flow patterns.* International Journal of Multiphase Flow 25, 1999, p. 377-394.
102. Vist S., *Two-phase flow distribution in heat exchanger manifolds*, Thesis, 2003.
103. Vist S., Petterson J., *Two-phase flow distribution in compact heat exchangers manifolds*, Experimental Thermal an Fluids Science 28 (2004) 209-215.
104. Wagner M.H., Wiethoff S., Friedrich W., Mollenhauer I., Obladen M., Boenick U., *Ultrasonic surfactant nebulisation with different exciting frequencies.* Biophysical Chemistry 84, 2000, 35-43.
105. Wambganss M. W., Jendrzejczyk J. A., France D. M., *Two-Phase flow and pressure drop in flow passages of compact heat exchangers.* SAE Technical Paper Series, no. 920550, 1192.
106. Yan Y-Y., Lin T-F., *Condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R134a in a small pipe.* International Journal of Heat and Mass Transfer 42, 1999, p. 697-708.
107. Yang C. Y., Webb R. L., *Friction pressure drop of R-12 in small hydraulic diameter extruded aluminium tubes with and without micro-fins.* Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39 No.4, p. 801-809, 1996.
108. Zetzmann K., *Phasenseparation und Druckabfall in zweiphasig durchströmten vertikalen Rhorabzweigungen*. Dissertation, Hannover, 1982, 127 pages.
109. Zhan T. XU C-N., Fukuda O., Yamada H., Li C., *Direct visualization of ultrasonic power distribution using mechanoluminescent film.* Ultrasonics Sonochemistry 18, 2011, 436-439.
110. Zhang M., Webb R.L., *Correlation of two-phase friction for refrigerants in small-diameter tubes.* Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 25, 2001, p. 131-139.
111. Zivi S.M., *Estimation of steady state steam void-fraction by means of the principle of minimum entropy production*. Transactions ASME, Journal Heat Transfer, Series C, Vol.86, May 1964, p. 247-252.

Annexe 1

Caractérisation expérimentale du comportement thermique de différents matériaux soumis à une fontaine ultrasonique

Florian TINGAUD[1*], Stéphane COLASSON[1], Sébastien FERROUILLAT[2], André BONTEMPS[2]

[1]CEA Grenoble, LITEN, DTS, Laboratoire des Échanges Thermiques, 38054 Grenoble cedex 9.
[2]Université Joseph Fourier, Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI), BP 53, 38041 Grenoble cedex 9.
*auteur correspondant : florian.tingaud@cea.fr

Résumé – Le but de cette étude est de caractériser le comportement thermique de différents matériaux soumis à une fontaine à ultrasons créée par un disque piézo-électrique. Des mesures par caméra infrarouge sont menées afin de déterminer la température de la surface de la plaque étudiée. Les différents matériaux polymères étudiés ont montré une augmentation rapide de leur température, au-delà de 200°C. Une comparaison avec une plaque d'aluminium dont la température n'augmente que faiblement, a été effectuée afin de mieux comprendre les différents phénomènes qui entrent en compte.

Nomenclature

a distance liquide-plaque, *m*
b hauteur d'eau, *m*
c célérité du son, $m.s^{-1}$
R coefficient de réflexion
T coefficient de transmission
X coordonée radiale, *m*
z avancement, *m*
Z impédance acoustique, $kg.m^{-2}.s^{-1}$

Symboles grecs
α coefficient d'absorption, $dB.cm^{-1}$
ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$

1. Introduction

Les ultrasons sont utilisés pour un grand nombre de procédés tels que des diagnostics médicaux, test de matériel, nettoyage, échange de chaleur ou encore pour la géophysique. Un de ces nombreux procédés est l'atomisation d'un fluide en gouttes de faible grandeur. Les nébuliseurs à ultrasons permettent cette technique qui consiste à atomiser un fluide avec un disque piézoélectrique. Plusieurs études se sont intéressées aux mécanismes de l'atomisation et deux théories principales ont été développées afin d'expliquer ce phénomène. Les expériences d'Esche (1955) [1] et Lang (1962) [2] soutiennent la première théorie : les gouttes sont formées à partir des ondes capillaires à la surface du liquide. L'autre théorie a été mise en avant par Il'in et Eknadiosyants (1967) [3], expliquant que la cavitation était associée à la formation des gouttes. Depuis, de nombreuses études ont pris part pour l'une ou l'autre des théories. Plusieurs expériences ont montré que les deux phénomènes peuvent expliquer la formation des gouttes.

La propagation à travers de multiples milieux et plus spécifiquement des liquides a été explorée par différents auteurs. Cette propagation conduit à une interaction et une transmission de l'onde ultrasonore depuis un milieu à un autre. Mitome (1990) [4] a placé des films de polyéthylène en face d'un nébuliseur à ultrasons pour voir le résultat sur la propagation acoustique mais également sur la fontaine ultrasonore. La transmission à une interface fluide-solide a été étudiée par Belgroune *et al.* (2008) [5]. Les conséquences de cette transmission à un élément plastic ont été examinées par Huamao et al. (1996) [6] et ils ont montré que la température pouvait atteindre 250°C sur la face opposée à l'impact de la fontaine.

Afin d'étudier l'interaction entre la fontaine à ultrasons et une surface solide, nous avons testé cinq matériaux avec des propriétés acoustiques et thermiques différentes. Quatre plaques de différents polymères et une en aluminium ont été misent en contact avec la fontaine à ultrasons. Différentes conditions expérimentales ont été testées afin d'observer leur influence sur les différents fluides.

2. Dispositif expérimental

Dans le cadre d'une étude sur la caractérisation de l'influence d'une fontaine ultrasonique sur un écoulement diphasique, nous avons développé un banc expérimental comprenant une section d'essai construite de telle façon que des générateurs d'ultrasons sont intégrés avec la puissance suffisante pour créer une fontaine ultrasonique. Cette section d'essai transparente permet la visualisation de l'écoulement et l'évaluation de l'influence des ultrasons. Différents plastiques transparents ont été proposés pour satisfaire nos demandes. Cependant au sein d'un écoulement diphasique, la quantité de liquide varie avec le temps et la fontaine liquide peut interagir avec les parois de la section d'essai, conduisant à des dégâts importants comme Huamao et al. (1996) [6] l'ont montré.

Afin de caractériser expérimentalement le comportement thermique de différents matériaux soumis à une fontaine ultrasonique, le dispositif expérimental schématisé sur la figure 1 a été utilisé. Le nébuliseur (tension d'entrée : 24 V, 1.7MHz) est localisé au fond d'un récipient rempli d'eau déminéralisée, comme recommandé par le fabriquant du nébuliseur. La puissance ultrasonore est choisie pour provoquer la formation de la fontaine à la surface et les tests se déroulent en plaçant la plaque testée perpendiculaire à la fontaine et en contact avec celle-ci. La surface opposée au jet est observée par une caméra infrarouge (FLIR Thermacam SC3000). Cette caméra permet de mesurer les valeurs de la température du matériau ainsi que sa distribution sur la surface L'erreur de mesure est de 1°C pour les températures inférieures à 150°C et de 2°C pour celles supérieures à 150°C. Pour tous les matériaux, cette surface est recouverte au préalable d'une peinture noire d'émissivité connue (ε=0,96). La température ambiante est mesurée avec un thermocouple. Enfin, la distance séparant la caméra de la surface est mesurée directement grâce au support de la caméra.

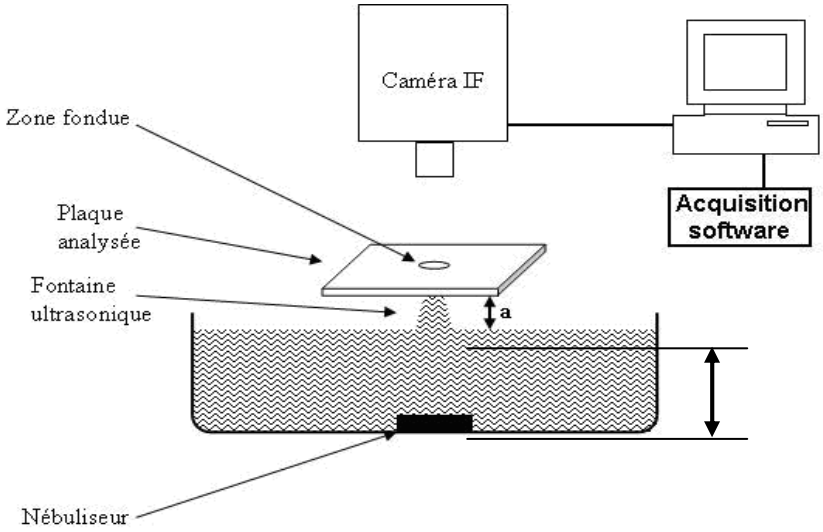


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental

Les essais sont effectués sur différents matériaux et également sous différentes conditions expérimentales. Deux paramètres géométriques sont modifiés afin d'observer leur influence sur le phénomène étudié. Le premier est la distance *a* entre la surface plane de l'eau et la surface inférieure de la plaque. Il faut noter que si la fontaine ne touche pas la plaque, aucun échauffement ne se produit sur celle-ci. Le second paramètre est la hauteur *b* de l'eau au dessus du nébuliseur. Cependant ce dernier a une limite car l'eau absorbe l'onde acoustique, au-dessus d'une certaine valeur (dépendant de la puissance du nébuliseur), la fontaine à la surface n'est plus visible.

3. Résultats expérimentaux

Des tests préliminaires ont montré un effet significatif des ultrasons sur différents matériaux polymères. Une déformation apparait sur la surface opposée à la fontaine seulement quelques secondes après le début de l'exposition à celle-ci. Quatre types de polymères ont été testés : le PolyMethylMethAcrylate (PMMA), le PolyEthylène Téréphtalate Glycol (PETg), le PolyVinyle Chloride (PVC) et le PolyCarbonate (PC). Ces analyses qualitatives ont montré des comportements différents pour chacun. En particulier, dans les mêmes conditions expérimentales, la déformation est moins importante pour le PMMA que pour les trois autres échantillons. Plusieurs essais ont été réalisés afin d'observer la reproductibilité de ces déformations. Une déformation est la conséquence d'un essai, les différentes plaques après plusieurs essais sont présentées sur la figure 2. Ces photos de la face opposée à la fontaine ont été prises après des expositions de l'ordre d'une minute à la fontaine à ultrasons.

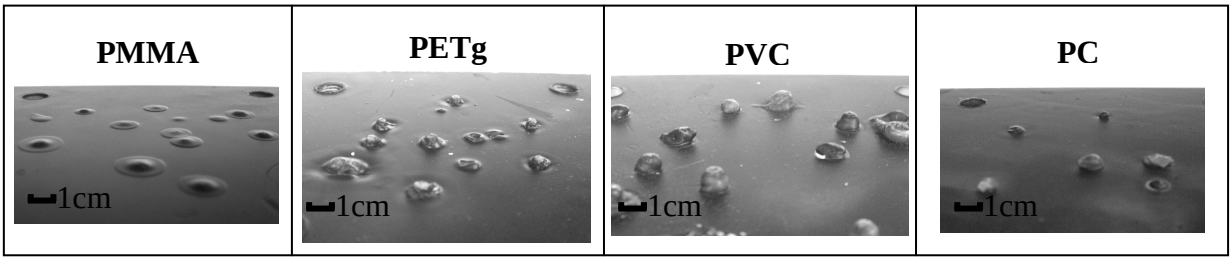


Figure 2: Photos des surfaces opposées à la fontaine à ultrasons

3.1 Intensité des ultrasons et profil de température

L'interaction de l'onde avec le matériau s'effectue en trois étapes clés : la première concerne la transmission de l'énergie incidente à la plaque. La deuxième est la capacité du matériau à absorber cette onde d'énergie sous forme de chaleur. La dernière concerne la capacité de la plaque à diffuser cette chaleur [7], [8], [9], [10] et [11].

Dans cette optique, le premier paramètre d'intérêt est l'impédance acoustique Z_0 propriété intrinsèque d'un milieu. Dans un milieu au repos, sa valeur est donnée par le produit de la masse volumique du matériau ρ et de la célérité du son c dans celui-ci :

$$Z_0 = \rho c \tag{1}$$

A partir des impédances acoustiques des milieux considérés, la transmission de l'onde incidente d'un milieu à un autre peut être déterminée. Lorsqu'une onde incidente est normale à une interface entre deux milieux avec respectivement les impédances acoustiques Z_1 et Z_2, le coefficient de réflexion est donné par la formule suivante :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{2}$$

L'intensité est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde. L'intensité réfléchie est alors déduite de la relation (2) pour déterminer le ratio de l'onde réfléchie :

$$R_I = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \tag{3}$$

L'intensité transmise peut alors être déduite de la précédente relation pour le coefficient de transmission T :

$$T_I = 1 - R_I \qquad \text{et} \qquad T_I = T^2 \tag{4}$$

Le dernier phénomène à considérer est l'absorption de l'énergie dans le milieu. Pour une onde plane progressant suivant l'axe z, l'intensité au point z est :

$$I(z) = I_0 \, e^{-\alpha z} \tag{5}$$

I_0 étant l'intensité pour z = 0 (dans notre cas, cela correspond à la surface du nébuliseur) et α le coefficient d'absorption qui dépend de la fréquence et qui, dans les solides, est relié aux constantes élastiques du matériau.

Afin de comprendre comment les matériaux sont affectés par les ultrasons, la fraction de l'énergie des ultrasons transmise a été calculée en fonction de la distance parcourue depuis le nébuliseur, jusqu'à la surface supérieure des échantillons étudiés (PMMA, PVC, PC, PETg et aluminium). Dans cette simulation, nous avons supposé que la surface inférieure de la plaque est en contact avec la surface de l'eau (a = 0). La hauteur d'eau au dessus du nébuliseur est de 4 cm et l'épaisseur de la plaque de 0,5 cm, sauf pour l'aluminium qui était de 0,2 cm. Les coefficients d'absorption et les impédances acoustiques sont donnés dans le tableau 1 et les formules (3) à (5) sont utilisées. Nous avons pu observer une diminution de l'intensité de l'onde lorsqu'elle progresse dans l'eau. A la surface entre l'eau et l'échantillon, l'intensité diminue encore, conséquence du coefficient de transmission. L'énergie transmise aux plastiques (environ 90%) est trois fois plus importante que celle transmise à l'aluminium (environ 30%). Pour les quatre plaques plastiques, une forte atténuation est observée lorsque

l'onde les traverse, à tel point que quasi toute l'énergie transmise a été absorbée par le polymère. Pour le cas de l'aluminium c'est l'effet inverse, seulement 29% de l'énergie est transmise, cependant, l'atténuation dans la plaque est faible, ce qui permet d'avoir une absorption de seulement 0,2% le long des 0,2 cm de l'épaisseur de la plaque.

Matériau	Coefficient d'absorption	Impédance Z	Transmission à l'interface avec de l'eau	Diffusivité thermique	Conductivité thermique
	dB/cm	Mrayl	%	m²/s	W/mK
PMMA	6,4	3,1	86	$1{,}22.10^{-07}$	0,21
PVC	11,2	3,31	86	$1{,}00.10^{-07}$	0,16
PC	4,6	2,71	92	$1{,}41.10^{-07}$	0,20
PETg	/	2,86	90	/	0,42
Aluminium	0,02	17,1	29	$8{,}30.10^{-05}$	200,00
Eau	0,02	1,51	100,00	$1{,}42.10^{-07}$	$5{,}90.10^{-05}$

Tableau 1 : Propriétés acoustiques et thermiques des matériaux

L'absorption de l'onde incidente a un effet direct sur la température maximum du matériau à la zone de l'impact. Les figures 3 et 4 montrent deux exemples de la distribution de la température mesurée sur la surface de la plaque opposée à l'impact de la fontaine. Deux matériaux sont étudiés sur ces figures, en premier le PMMA et en second le PETg. Deux comportements différents sont observés. Pour le PMMA, un seul point chaud est constaté au centre du faisceau d'ultrasons (Figure 3). Pour le PETg, la température maximale représente une zone annulaire (Figure 4). Une analyse en une dimension est alors réalisée en considérant la température le long d'une ligne passant à travers le profil de température. Pour le PMMA, la courbe de la température présente un seul maximum, tandis que pour le PETg, nous avons rapidement deux températures maximales qui se dégagent. Cette différence s'explique par la déformation à la surface et également dans le matériau qui est différente entre le PMMA et le PETg. En effet, pour le PMMA, la surface n'est que légèrement déformée, alors que pour le PETg, une cloque apparait à la surface pour se refroidir immédiatement après, créant un point « froid » pour la visualisation de la surface par la caméra.

Le nébuliseur est un disque piézo-électrique d'un diamètre de 1,5 cm. Cette valeur correspond grossièrement à la largeur du profil de températures.

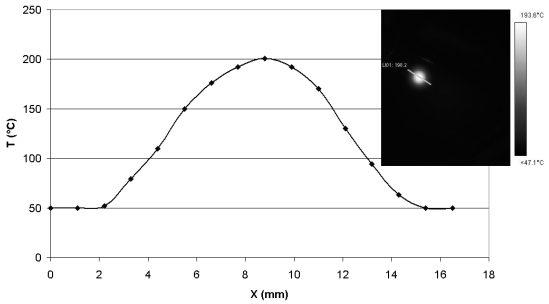


Figure 3 : Profil de température pour le PMMA.

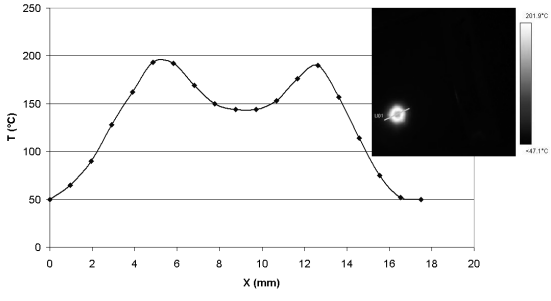


Figure 4: Profil de température pour le PETg.

3.2 Analyse dynamique

Des analyses quantitatives en fonction du temps ont été réalisées via la caméra infrarouge afin de mesurer les températures de la surface. Un point commun à tous les

polymères est l'augmentation rapide de la température de la surface jusqu'à au moins 150°C en moins de 20 secondes et pouvant atteindre 280°C sous certaines conditions. Le jet de la fontaine à ultrasons est également constamment en contact avec la plaque tout au long de l'expérience.

La figure 5 présente pour trois conditions expérimentales différentes la température maximale pour le PMMA.

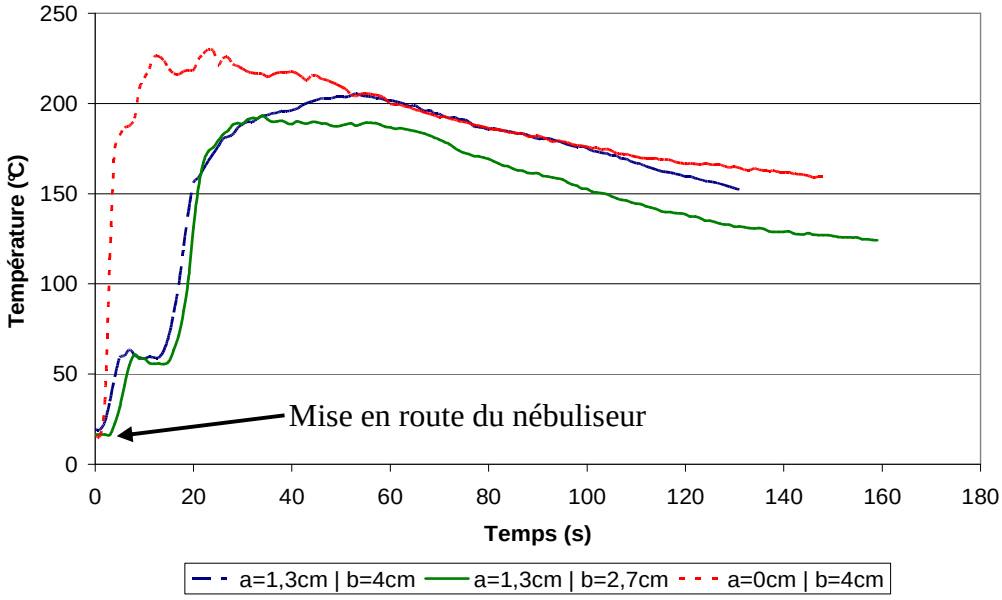


Figure 5 : Evolution de la température maximale sur la surface du PMMA

Nous pouvons observer une augmentation brutale de la température dès la mise en marche du nébuliseur. Pour a = 0, la plaque est en contact direct avec la surface de l'eau et la température s'élève quasi-instantanément aux alentours de 225°C. Après une minute d'exposition, une diminution de la température maximale est observée. Pour a = 1,3 cm nous observons pour les deux expériences, un plateau vers 55-60°C suivit d'une forte augmentation de la température jusqu'à un maximum de 185°C pour la plus faible hauteur d'eau (b = 2,7 cm) et de 205°C pour une hauteur d'eau b = 4 cm.

Des expériences similaires ont été effectuées avec les trois autres polymères. Des tendances similaires sont également observées. Une augmentation rapide de la température dès les premières secondes, ensuite quelques oscillations apparaissent et le niveau de la température est plus ou moins constant, contrairement au PMMA pour lequel nous observons une diminution de la température. Pour ces trois autres plastiques, à l'inverse du PMMA, la surface observée présente de fortes déformations. Ces déformations expliquent le profil en col des températures (figure 4). En effet, une fois que la température maximale est atteinte (au-delà de la température de fusion), une « cloque » apparait à la surface. Ces « cloques » explosent comme des bulles à la surface de la plaque. Une zone plus froide est donc située au milieu et les températures les plus importantes sont situées autour de cette zone, formant alors un anneau. Ceci peut être interprété comme un phénomène d'ébullition ou de sublimation qui refroidit le matériau au centre du faisceau d'ultrasons, faisant diminuer la température. Cela peut également causer des fluctuations de température.

Ces échauffements peuvent être séparés en deux phases : la première où la température monte et la seconde où elle fluctue ou alors diminue. En effet, lors de la première phase (qui ne dure que quelques secondes) les ultrasons se propagent bien à travers la matière. Seulement, l'élévation de la température dégrade progressivement les propriétés du matériau et donc dégrade la propagation des ultrasons. Ce qui fait que la surface opposée ne reçoit plus

toute l'énergie transmise par la fontaine. C'est à ce moment que la seconde phase commence. En effet, la surface observée ne recevant plus autant d'énergie, la température a tendance à diminuer.

Le comportement des plaques plastiques a été comparé à celui de l'aluminium pour les mêmes conditions expérimentales. La figure 6 ne montre aucune augmentation de la température pendant les premières minutes. Après 150 minutes d'expositions, la température atteint environ 28°C. Cette valeur est bien inférieure à celle observée pour les plastiques au bout de quelques secondes. Cette augmentation est également différente car aucun maximum de température n'est visible, l'augmentation se fait de manière faible mais constante après le début de l'exposition. Le second commentaire concerne l'homogénéité de la température sur la plaque. Pour les plastiques, les fortes températures sont très localisées, pour l'aluminium, la température a une bonne homogénéité, cependant, la différence entre le maximum et le minimum augmente en fonction du temps, ce que tend à montrer une influence de la fontaine. Malgré cette augmentation, la différence n'est que de 1,5°C après deux heures d'exposition aux ultrasons.

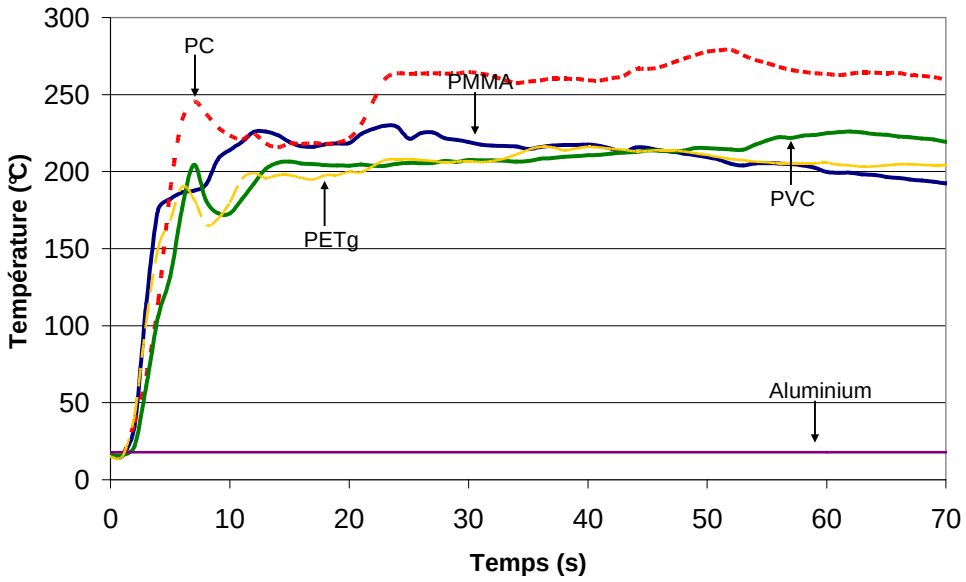


Figure 6: Comparaison des températures maximales pour les cinq matériaux

4. Discussion

Pour comparer les résultats obtenus avec les différents matériaux, nous suivons les mêmes étapes définies dans la partie 3.1. Afin de caractériser l'interaction entre les ultrasons et les plaques, nous prenons en compte les propriétés acoustiques notées sur le tableau 1 [12, 13].

Une nette différence apparait entre les polymères et le métal. En moyenne, 90% de l'énergie incidente est transmise lorsque l'interface se fait entre l'eau et un plastique, tandis que ce pourcentage descend à environ 30% avec l'aluminium. L'impédance acoustique de l'air est très faible par rapport aux différents matériaux, ce qui résulte à une intensité transmise d'environ 0,05% de l'eau à l'air. La transmission des ultrasons de l'eau vers l'air est donc négligeable. De ce fait, la présence d'air entre la fontaine et la plaque permet d'expliquer l'absence d'échauffement des plaques.

Le second point est la capacité du matériau à absorber l'énergie sous forme de chaleur. Les données sur les coefficients d'absorption sont valables à une fréquence de 5Mhz [12, 13]. Cette fréquence est supérieure à celle utilisée par le nébuliseur lors des expériences, mais ces coefficients sont proportionnels à la fréquence au carré [14]. Nous pouvons supposer que les proportions restent les mêmes entre les différents matériaux. Les valeurs sont également regroupées dans le tableau 1.

En se référant aux coefficients dans le tableau 1 et en utilisant la formule (5), nous pouvons calculer que l'intensité de l'onde reçue par les plastiques à l'interface est complètement absorbée, alors que pour l'aluminium, seulement 0,5% des 30% transmis, est absorbé. De ce fait, l'échauffement des plaques est causé par la transmission puis l'absorption et non par l'impact de la fontaine.

Le dernier point concerne la capacité du milieu à diffuser cette chaleur, caractérisée par la diffusivité thermique sur le tableau 1 (Données de la société VINK). La différence est évidente entre l'aluminium et les autres matériaux testés, ce qui fait que non seulement l'aluminium absorbe moins sous forme de chaleur mais en plus il la diffuse mieux à travers l'intégralité du matériau. Au contraire, pour les matériaux polymères, la chaleur est concentrée au niveau de l'impact de la fontaine et la diffusion thermique est faible et lente dans une direction perpendiculaire. La température maximale diminue en fonction du temps, ce qui indique que soit le processus de diffusion de chaleur est plus rapide que la quantité absorbée soit que la déformation à la surface est le résultat d'une décomposition du matériau.

5. Conclusion

Le but de cette étude était de caractériser les réactions de différents types de polymères soumis à une fontaine à ultrasons. Des essais ont été réalisés sur quatre matériaux polymères différents et une plaque en aluminium.

De manière globale, la plaque de polymère tend à chauffer rapidement en un point et peut atteindre des températures au-delà de 200°C. L'augmentation de la température dépend des conditions expérimentales, à savoir la hauteur d'eau au-dessus du nébuliseur et également la distance entre la surface plane de l'eau et la plaque étudiée ainsi que de la nature du polymère. La comparaison avec un échantillon en aluminium nous a permis d'avoir une meilleure compréhension du phénomène, lié à trois caractéristiques de l'expérience : la transmission de l'onde incidente à l'interface eau / échantillon, la capacité du matériau à absorber l'énergie sous forme de chaleur et enfin les propriétés thermiques du matériau. Ces trois paramètres déterminent le comportement de la plaque quand elle est soumise à une fontaine à ultrasons.

Des essais complémentaires, avec une épaisseur d'échantillon ont montré que le phénomène était toujours présent mais avec un léger déphasage par rapport à ceux présentés dans cette étude.

Etude expérimentale de l'amélioration de la distribution diphasique dans un échangeur thermique à l'aide d'ultrasons.

Résumé : Les préoccupations relatives à la consommation de l'énergie et notamment des pertes provoquent une demande d'optimisation toujours plus forte des procédés. La recherche de l'efficacité maximale dans les échangeurs de chaleur est d'autant plus forte lorsque ceux-ci ne fonctionnent pas au régime nominal. L'étude présentée dans ce mémoire se concentre sur une problématique de l'efficacité des échangeurs thermiques : la distribution diphasique. Le but de ce travail a été de montrer la faisabilité d'un dispositif améliorant la répartition des deux phases dans un échangeur à mini canaux. La méthode choisie a été l'introduction d'ultrasons par le biais de générateurs placés dans le distributeur produisant une fontaine. Cette technologie présente l'avantage d'être facilement modulable en ne changeant que la tension d'entrée des appareils. Ceci permet donc de pouvoir adapter le dispositif aux différentes conditions opératoires. Des essais expérimentaux ont été réalisés dans différentes conditions, en changeant notamment le débit de chaque phase. La densité de flux massique a été variée de 60 $kg.m^{-2}.s^{-1}$ à 450 $kg.m^{-2}.s^{-1}$ et le titre massique de moins de 1% à plus de 23% en entrée de section d'essais. Les comparaisons entre les différents essais se sont faite par la mesure des débits de chaque phase sortant des canaux. L'introduction des ultrasons a également été étudiée en jouant sur le placement et le nombre des générateurs d'ultrasons. Cette technologie s'est alors montré viable car la distribution diphasique est améliorée dans une grande majorité des cas testés. Des phénomènes intéressant ont même été observés, permettant lors d'une prochaine étude, des approches différentes mais complémentaires.

Experimental study of the enhancement of the two-phase distribution in a heat exchanger using ultrasound.

Abstract: Concerns about energy consumption including thermal losses cause a need in greater optimization of the processes. The goal of the maximum efficiency in heat exchangers is even stronger when they do not work at nominal conditions. The study presented in this paper focuses on the two-phase flow distribution problematic. The aim of this work was to demonstrate the feasibility of a device that can improve the distribution of the two phases in a mini-channel heat exchanger. The method chosen was the introduction of ultrasound through generators placed in the distributor where they can produce an ultrasonic fountain. This technology has the advantage of being easily adjustable by changing the input voltage of the devices. This therefore allows the device to adapt to different operating conditions. Experimental tests have been done under different conditions, in particular by changing the flow rate of each phase. The mass flow density was varied from 60 $kg.m^{-2}.s^{-1}$ to 450 $kg.m^{-2}.s^{-1}$ and the mass quality of less than 1% to over 23% at the tests section inlet. Comparisons between different tests were made by measuring flow rates of each phase at the outlet of the channels. The introduction of ultrasound was also studied by varying the placement and number of the generators of ultrasound. This technology has been shown as viable two-phase distribution enhancement in a majority of cases tested. Interesting phenomena were even observed, which allows, for a future study, different but complementary approaches.