

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



## Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de

### MASTER

En Génie des Procédés

**Option : Génie Chimique**

Présenté par :

M<sup>lle</sup> OULEBSIR Sarah

M<sup>lle</sup> TOUAHRI Synthia Baya

**Thème :**

**Contribution à l'étude de l'effet de quelques modes  
d'injections sur l'hydrodynamique d'un réacteur airlift à  
boucle externe**

**Soutenu le : 29 septembre 2020**

**devant le jury composé de :**

M<sup>me</sup> BOUROUINA S.

Professeur (U. A. M. Béjaïa)

Présidente

M<sup>r</sup> BRAHIMI M.

Professeur (U. A. M. Béjaïa)

Examineur

M<sup>r</sup> TIGHZERT H.

MCB (U. A. M. Béjaïa)

Promoteur

**Promotion 2020**

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

*Sarah*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail aux deux êtres les plus chers qui puissent exister, mes Parents. Je ne vous remercierai sans doute jamais assez pour tout ce que vous avez fait et tout ce que vous faites pour moi*

*Je vous aime tellement.*

*Je le dédie aussi à ma chère sœur et mon cher frère, ainsi qu'à toute ma famille.*

*A mes amis, spécialement à Salim, Anis, Djodjo et Melissa.*

*Synthia*

# *Remerciements*

*C'est avec un profond respect que nous tenons à remercier notre promoteur Mr TIGHZERT Hamid pour ses précieux conseils, son aide, sa confiance et surtout sa patience tout au long de la préparation de ce mémoire.*

*Nous adressons nos sincères remerciements aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Nous remercions également tous ceux qui ont participé de loin ou de près afin d'assurer le bon déroulement de notre soutenance.*

Remerciements .....	I
Liste de figures .....	II
Nomenclature .....	IV
Introduction .....	01

## **Chapitre I**

### **Généralités sur les systèmes airlift**

I.1 Quelques notions sur les écoulements diphasiques.....	03
I.1.1 Ecoulements diphasiques.....	03
I.1.2 Ecoulement diphasique classique.....	03
I.1.3 Ecoulement diphasique classique .....	04
I.2 Les régimes principaux d'un écoulement diphasique ascendant .....	04
a) Le régime à bulles.....	04
b) Le régime à poches.....	04
c) Le régime turbulent baratté.....	05
d) Le régime annulaire .....	05
I.3 Présentation générale d'un système airlift .....	05
I.4 Principe de fonctionnement d'un système airlift .....	06
I.5 Colonne à bulles .....	07
I.6 Les réacteurs airlift .....	08
a. Réacteurs à boucles internes.....	09
b. Réacteurs à boucles externes.....	10
I.7 Régime homogène et régime hétérogène.....	11
I.8 Cartes d'écoulement.....	11

I.9 Paramètres caractérisant un système airlift .....	12
I.10 Les avantages d'un système airlift .....	13
I.11 Différentes applications des systèmes airlift.....	13
I.12 Méthodes d'injections dans les systèmes airlift.....	14
A. Méthode d'injection radiale .....	14
B. Méthode d'injection axiale .....	14
C. Méthode à double injection .....	14
D. Méthode d'injection à orifice unique .....	15
E. Autres méthodes .....	15
❖ Injection rotative.....	15
❖ Injection multi-étage.....	16
❖ Injection hélicoïdale .....	17
I.13 Paramètres influençant le fonctionnement d'un système airlift .....	18
I.13.1 Hauteur de plongée ( $H_p$ ).....	18
I.13.2 Le Rendement ( $\eta$ ) .....	19
I.13.3 L'efficacité (E) .....	19
I.13.4 Gradient de pression.....	19
I.13.5 La masse volumique du mélange diphasique .....	20
I.13.6 Vitesses des phases et glissement .....	20
1. Vitesse superficielle .....	20
2. Vitesse interstitielle .....	20
3. Vitesse de glissement ( $U_s$ ) .....	20
I.13.7 Rapport de glissement (S) .....	20
I.13.8 Le Taux de vide .....	21
• Taux de vide global .....	21

• Taux de vide surfacique .....	21
• Taux de vide volumétrique .....	21
I.13.9 Techniques de mesure du taux de vide.....	21
a) Technique de vanne à fermeture rapide .....	22
b) Techniques radiatives .....	22
c) Technique d'anémomètre à fil chaud .....	22
d) Technique de sonde électrique .....	22
e) Technique acoustique .....	23
f) Technique d'expansion du volume .....	23
g) Technique manométrique .....	23

## **Chapitre II :**

### **Dispositif expérimental et techniques de mesure**

II.1 Présentation de l'installation.....	24
a. Colonne (riser) .....	25
b. Les vannes du taux de vide .....	26
c. Section de transit .....	26
d. Disperseur et techniques d'injection .....	27
e. Séparateur de phases .....	28
f. Downcomer .....	29
g. Bac coulissant .....	29
h. Alimentation en eau .....	30
i. Alimentation en air .....	30
j. Débitmètre .....	31
II.2 Fonctionnement de l'installation .....	31
II.3 Techniques de mesures.....	32

II.3.1 Mesure du débit de la phase liquide.....	32
II.3.2 Mesure du taux de vide.....	33
II.3.3 Mesure du gradient de pression .....	34

## **Chapitre III**

### **Résultats et discussions**

III.1 Régimes d'écoulement obtenus .....	35
III.2 Débit de la phase liquide .....	36
III.3 Taux de vide global .....	38
III.4 Confrontation du taux vide avec la corrélation de Nicklin(1963).....	40
III.5 Confrontation du taux vide avec la corrélation de Hills(1976).....	41
III.6 Vitesse de glissement .....	42
III.7 Masse volumique du mélange .....	43
III.8 Gradient de pression au-delà de la vanne .....	44
Conclusion .....	48
Références bibliographique .....	49

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> : Les 4 principaux régimes d'un écoulement diphasique.....	04
<b>Figure I.2</b> : Schéma d'une colonne airlift.....	05
<b>Figure I.3</b> : Système de pompage airlift... ..	06
<b>Figure I.4</b> : Schéma d'une colonne à bulles.....	07
<b>Figure I.5</b> : Domaine opératoire d'une colonne à bulles et d'un réacteur airlift.....	08
<b>Figure I.6</b> : Quelques configurations de réacteurs airlift à boucle interne .....	10
<b>Figure I.7</b> : Configuration d'un réacteur airlift à boucle externe .....	10
<b>Figure I.8</b> : Régimes d'écoulement dans un réacteur airlift .....	11
<b>Figure I.9</b> : Exemple d'une carte d'écoulement .....	11
<b>Figure I.10</b> : Autres exemples de cartes d'écoulements .....	12
<b>Figure I.11</b> : Exemple de méthode à double injection .....	15
<b>Figure I.12</b> : Système d'injection rotatif.... ..	16
<b>Figure I.13</b> : Schéma représentatif d'une injection multi-étages.....	16
<b>Figure I.14</b> : Injection hélicoïdale.....	17
<b>Figure I.15</b> : Exemple de disperseurs.....	17
<b>Figure I.16</b> : Schéma illustrant la hauteur de plongée.....	18
<b>Figure II.1</b> : Schéma de l'installation expérimental .....	24
<b>Figure II.2</b> : Colonne (riser).....	25
<b>Figure II.3</b> : Vannes du taux de vide .....	26
<b>Figure II.4</b> : Emplacement de la section de transit.....	27
<b>Figure II.5</b> : Les quatre disperseurs utilisés .....	28
<b>Figure II.6</b> : Séparateur de phases .....	28
<b>Figure II.7</b> : Downcomer .....	29

<b>Figure II.8</b> : Bac coulissant .....	30
<b>Figure II.9</b> : Compresseur .....	31
<b>Figure II.10</b> : Débitmètres en parallèles .....	31
<b>Figure II.11</b> : Bac gradué pour la mesure du débit .....	33
<b>Figure III.1</b> : Photographies des régimes d'écoulement obtenus.....	35
<b>Figure III.2</b> : Evolution du débit de la phase liquide en fonction de $Q_g$ .....	36
<b>Figure III.3</b> : Evolution du débit de liquide en fonction du débit d'air pour les quatre disperseurs.....	37
<b>Figure III.4</b> : Evolution du taux de vide global en fonction du débit d'air pour le disperseur DISP1.....	38
<b>Figure III.5</b> : Évolution du taux de vide global pour les quatre disperseurs.....	39
<b>Figure III.6</b> : Confrontation du taux de vide expérimental avec la corrélation de Nicklin (1963).....	41
<b>Figure III.7</b> : Confrontation du taux de vide expérimental avec la corrélation de Hills (1976).....	42
<b>Figure III.8</b> : Variation de la vitesse de glissement en fonction du débit d'air pour les quatre disperseurs.....	43
<b>Figure III.9</b> : Evolution de la masse volumique du mélange diphasique en fonction de $Q_g$ pour les quatre disperseurs.....	44
<b>Figure III.10</b> : Evolution du gradient de pression au-delà la vanne en fonction de $Q_g$ pour les quatre disperseures.....	45
<b>Figure III.11</b> : Confrontation du gradient de pression total au gradient gravitaire.....	45
<b>Figure III.12</b> : Confrontation de la masse volumique du mélange et du gradient de pression pour les quatre disperseurs.....	47

## Nomenclature

### Lettres latines

A	: Section de la colonne.....	(m <sup>2</sup> )
A <sub>d</sub>	: Section du downcomer.....	(m <sup>2</sup> )
A <sub>g</sub>	: Aire de la phase gazeuse.....	(m <sup>2</sup> )
A <sub>l</sub>	: Aire de la phase liquide.....	(m <sup>2</sup> )
A <sub>r</sub>	: Section du riser.....	(m <sup>2</sup> )
C <sub>0</sub>	: Coefficient de distribution.....	(-)
D	: Diamètre de la colonne.....	(-)
E	: Efficacité d'un système de pompage airlift.....	(-)
g	: Accélération de la pesanteur.....	(m/s <sup>2</sup> )
H	: Hauteur immergée dans la phase liquide.....	(m)
H <sub>m</sub>	: Hauteur mouillée.....	(m)
H <sub>p</sub>	: Hauteur de plongée.....	(m)
L	: Longueur de la colonne.....	(m)
P <sub>a</sub>	: Pression atmosphérique.....	(Pa)
P <sub>in</sub>	: Pression de l'air injectée.....	(Pa)
Q <sub>g</sub>	: Débit de la phase gazeuse.....	(m <sup>3</sup> /s)
Q <sub>l</sub>	: Débit de la phase liquide.....	(m <sup>3</sup> /s)
S	: Rapport de glissement.....	(-)
t	: Temps.....	(s)
u <sub>g</sub>	: Vitesse interstitielle de la phase gazeuse.....	(m/s)
U <sub>g</sub>	: Vitesse superficielle de la phase gazeuse.....	(m/s)
u <sub>l</sub>	: Vitesse interstitielle de la phase liquide.....	(m/s)
U <sub>l</sub>	: Vitesse superficielle de la phase liquide.....	(m/s)
U <sub>s</sub>	: Vitesse de glissement.....	(m/s)
V <sub>g</sub>	: Volume de la phase gazeuse.....	(m <sup>3</sup> )
V <sub>l</sub>	: Volume de la phase liquide.....	(m <sup>3</sup> )

**Lettres grecques**

$\varepsilon$	: Taux de vide global.....	(-)
$\varepsilon_d$	: Taux de vide du downcomer.....	(-)
$\varepsilon_g$	: Taux de vide de la phase gazeuse.....	(-)
$\varepsilon_l$	: Taux de vide de la phase liquide.....	(-)
$\varepsilon_r$	: Taux de vide du riser.....	(-)
$\beta$	: Taux de vide volumétrique.....	(-)
$\Delta H$	: Différence de hauteur entre deux points de la colonne.....	(m)
$\Delta P$	: Gradient de pression.....	(Pa)
$\Delta P_{acc}$	: Gradient de pression dû à l'accélération.....	(Pa)
$\Delta P_{fr}$	: Gradient de pression dû au frottement.....	(Pa)
$\Delta P_g$	: Gradient de pression dû à la gravité.....	(Pa)
$\eta$	: Rendement d'un système airlift.....	(-)
$\rho_e$	: Masse volumique de l'eau .....	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_g$	: Masse volumique de la phase gazeuse.....	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_l$	: Masse volumique de la phase liquide.....	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_m$	: Masse volumique du mélange diphasique.....	(kg/m <sup>3</sup> )

# Introduction

---

Un système airlift est un dispositif qui permet de soulever ou de faire circuler un liquide ou un mélange liquide-solide le long d'une colonne verticale au moyen d'une injection de l'air comprimé à la base. Le principe est basé sur la différence de pression créée en amont et en aval de la colonne engendrée par la masse volumique du mélange diphasique plus léger que la phase liquide. La différence de pression ainsi créée provoque la circulation du mélange.

Les systèmes airlift utilisés comme réacteurs gagnent de plus en plus du terrain dans la recherche scientifique. Ces dernières décennies, leurs applications se sont multipliées pour toucher divers domaines. Utilisés dans des bioprocédés (aération, agitation, culture de micro-organismes, réactions biochimiques...etc.), ils servent aussi au traitement des eaux et dans l'industrie chimique pour l'hydrogénation et l'oxydation de produits organiques et encore beaucoup d'autres réactions.

Le réacteur airlift offre plusieurs avantages tels que l'amélioration des contacts entre phases, ainsi que le transfert de masse, transfert de chaleur et un bon mélange à une faible consommation d'énergie. Comme mode d'agitation, dans les bioprocédés, il épargne les microorganismes des effets néfastes de cisaillement. L'absence de toute pièce mobile, la possibilité de manipuler des produits toxiques et corrosifs, leurs pouvoirs d'adaptabilité sont aussi autant d'avantages qui suscitent un grand intérêt à les étudier afin de comprendre leur dynamique et pouvoir optimiser leur fonctionnement. Lors de la conception ou le dimensionnement de ces réacteurs, beaucoup de paramètres doivent être pris en compte. Car, amener ce système à un fonctionnement optimal, exige une bonne connaissance de l'influence de tous les paramètres qui interviennent.

Le travail que nous présentons ici est purement expérimental. Nous nous intéressons à l'étude de quelques effets de quatre modes d'injection sur quelques paramètres hydrodynamiques régissant le fonctionnement d'un réacteur airlift à boucle externe tels que le débit de la phase liquide, le taux de vide global, la vitesse de glissement, la masse volumique du mélange et le gradient de pression. Toutefois, en raison des conditions sanitaires imposées par la pandémie COVID-19 au cours de l'année 2020, nous n'avons pas pu réaliser des expériences. Les résultats que nous présentons ici, sont le fruit d'une analyse et d'un traitement de données brutes que nous avons pu nous procurer au sein du laboratoire de Transfert de quantité de mouvement (Université A.MIRA-Béjaia). Ces données sont accompagnées d'un

ensemble d'observations visuelles sous formes de notes, de photos et de vidéos prises par les auteurs de ces expériences et qui nous ont été utiles lors de l'analyse.

Ce mémoire comporte donc trois chapitres. Dans le premier nous présentons quelques généralités sur les systèmes airlifts destinés notamment à la fonction du pompage. Dans le même chapitre nous présentons également les paramètres utilisés pour les caractériser et les optimiser.

Dans le second chapitre, nous décrivons le dispositif expérimental utilisé pour l'obtention des données traitées. Nous avons eu accès à ce dispositif, donc tout ce que nous rapportons dans ce chapitre nous avons pu le vérifier.

Dans le dernier chapitre, nous présentons l'ensemble des résultats que nous avons traités et discutés. On termine enfin par une conclusion.

# **CHAPITRE I**

---

## **Généralités sur les systèmes airlift**

## **I.1 Quelques notions sur les écoulements diphasiques**

### **I.1.1 Ecoulements diphasiques**

Les écoulements diphasiques se rencontrent fréquemment dans la nature et interviennent dans de nombreux processus industriels où l'on cherche dans la plupart des cas à mettre en œuvre un transfert d'énergie ou un transfert de masse. Ils procèdent de la mécanique des fluides à laquelle est liée le transfert thermique et le transfert de matière. A l'origine, ces disciplines sont nées et ont été développées notamment pour le génie nucléaire et le génie chimique (Lemonnier, 2006).

Dans notre cas on s'intéresse particulièrement aux écoulements diphasiques de types liquide-gaz, car tous les écoulements mettant en jeu deux phases même étant de même nature mais de propriétés différentes sont aussi considérés diphasiques. Les écoulements monophasiques sont généralement étudiés, ces derniers sont bien connus et très précis, ils permettent de décrire facilement le comportement des écoulements et des transferts ainsi que leurs structures pour les besoins pratiques. Cependant la nature des écoulements diphasiques est encore assez complexe, c'est pourquoi ils font l'objet de beaucoup de recherche actuellement. Pour ces écoulements diphasiques on distingue deux types : l'écoulement diphasique classique et l'écoulement diphasique de type airlift.

### **I.1.2 Ecoulement diphasique classique**

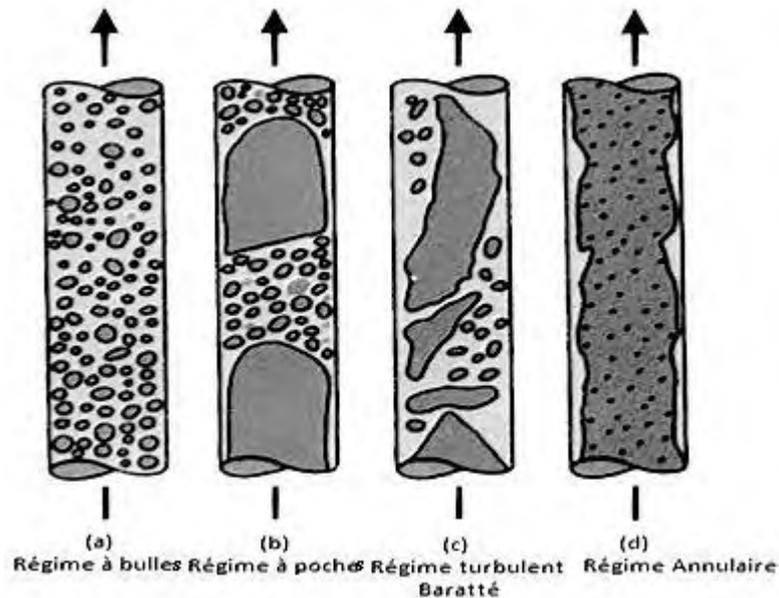
C'est un écoulement de deux phases simultanées identifiées où le mouvement de la phase liquide n'est pas induit par celui du gaz. Elles peuvent être de même espèce ou pas, et quand on parle de deux phases on parle forcément d'interfaces entre celles-ci. Les écoulements diphasiques classiques sont généralement utilisés dans le génie chimique, génie pétrolier, génie nucléaire et dans l'environnement. Si on prend l'exemple de l'application des écoulements diphasiques (gaz-liquide) dans le domaine du génie chimique ou environnement (colonnes d'absorption industrielles) ou est amené à véhiculer des mélanges de deux fluides dans des proportions variées, ceci consiste à mettre en jeu un liquide et un gaz les deux en écoulements à co-courant ou à contre-courant et à des pressions et débits différents selon le but recherché par le processus. Dans ces types d'installations la phase gazeuse est générée par un compresseur, et l'écoulement de la phase liquide est générée à l'aide d'une pompe ce qui les différencie des airlift.

### I.1.3 Ecoulement diphasique de type airlift

Ce type d'écoulement est celui dans lequel le mouvement de la phase liquide est induit par celui de la phase gazeuse.

### I.2 Les régimes principaux d'un écoulement diphasique ascendant

Les différents régimes d'écoulement conditionnent le fonctionnement des systèmes airlifts. La taille de bulles générées dépend de plusieurs paramètres tels que : les conditions d'injection (pression), le type d'injecteur et les propriétés des fluides (viscosité, densité,...). Pour cela on distingue 4 régimes principaux :



**Figure I.1** : les quatre principaux régimes d'un écoulement diphasique

- a) **Le régime à bulles** : correspond à des faibles débits de gaz où ce gaz injecté, donne naissance à des bulles qui se dispersent d'une manière homogène dans la phase liquide. Le diamètre des bulles est toujours très inférieur au diamètre de la colonne.
- b) **Le régime à poches** : c'est la conséquence du rapprochement entre les bulles quand on augmente le débit d'air. La collision ou la coalescence donnent naissance à de grosses bulles qu'on appelle « poches » et dont le diamètre avoisine celui de la colonne. Les poches ont une forme ovale en aval et une forme légèrement aplatie en amont. Derrière elles, un sillage de fines bulles se crée dans la phase liquide. L'espace séparant deux poches consécutives est appelé : *bouchon liquide*.

- c) **Le régime turbulent baratté** : il apparaît lors de la destruction des poches d'air qui ne peuvent plus maintenir leur forme ovale. La structure de l'écoulement devient anarchique et désordonnée.
- d) **Le régime annulaire** : il est caractérisé par l'écoulement continu de gaz le long du centre de la colonne. Le liquide est aspiré le long de la paroi sous la forme d'un film homogène. Ce régime d'écoulement correspond à de fortes vitesses de gaz.

### I.3 Présentation générale d'un système airlift

Un airlift est une colonne à bulles dans laquelle une cloison a été introduite pour canaliser l'écoulement des phases liquides et gazeuses entre plusieurs compartiments de la colonne. L'injection d'air se fait dans un des compartiments. Elle permet de modifier la densité apparente et l'expansion du fluide diphasique, provoquant la circulation de la phase liquide initialement immobile. L'airlift est généralement divisé en quatre compartiments :

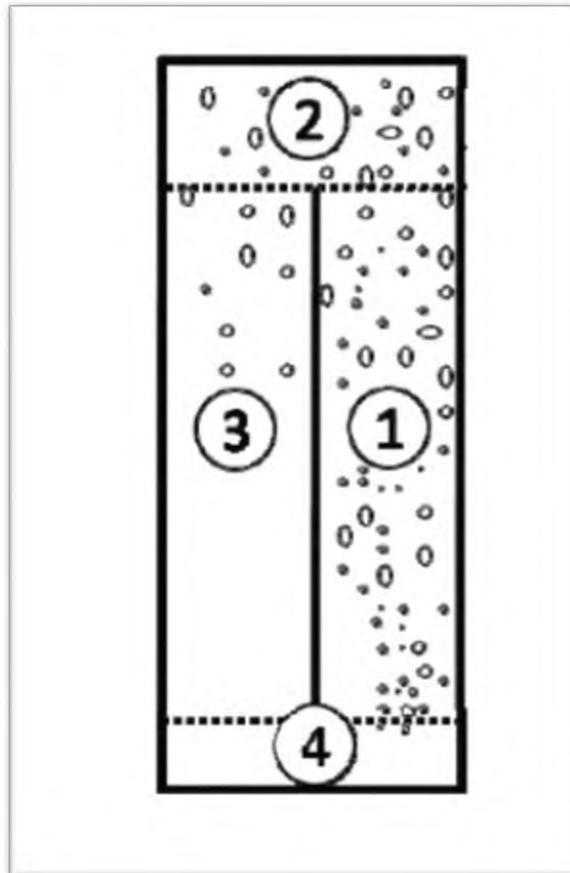


Figure I.2 : Schéma d'une colonne airlift

- Compartiment 1 : partie aérée où l'on injecte le gaz et où les fluides se déplacent dans un mouvement ascendant. C'est le riser.
- Compartiment 2 : changement de direction de circulation au-dessus du premier compartiment, le liquide redescend vers le compartiment 3 alors que la majeure partie du gaz s'échappe par le sommet de la colonne. C'est le séparateur de phases.
- Compartiment 3 : partie généralement non aérée elle correspond au tube de retour appelé « downcomer ».
- Compartiment 4 : Base de la colonne qui contient le disperser. C'est la section de transit.

#### I.4 Principe de fonctionnement d'un système airlift

La seule énergie requise pour le fonctionnement d'un système airlift est l'air comprimé qui sert à soulever ou faire circuler un liquide ou un mélange liquide-solide à travers une colonne verticale partiellement ou totalement immergée. De l'air comprimé est injecté à la base de cette colonne pour aérer la phase liquide, d'où, un mélange diphasique gaz-liquide plus léger que la phase liquide non aérée. Ceci génère une différence de densité entre les deux extrémités de la colonne qui se traduit par une différence de pression hydrostatique. Une très longue colonne du mélange diphasique serait nécessaire pour contrebalancer la colonne du liquide pur, si bien que cette différence de pression engendrée, combinée aux forces de flottaison, entraînent le mélange gaz-liquide vers le haut. Il en résulte qu'une quantité de liquide (ou de liquide-solide) est transportée jusqu'à la sortie de la colonne. (Kassab et al., 2009, Khalil et al., 1999).

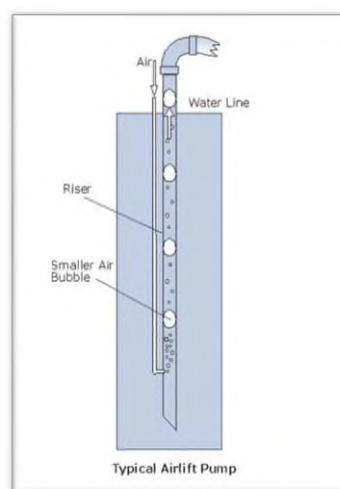
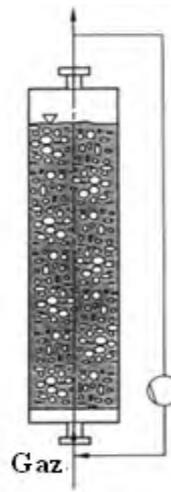


Figure I.3 : Système de pompage airlift

## I.5 Colonne à bulles

C'est une simple colonne à la base de laquelle de l'air comprimé est injecté à travers un dispositif troué appelé *disperseur à gaz* (figure I.4). L'injection de l'air provoque la formation de bulles qui se déplacent dans la phase liquide. Les colonnes à bulles ne contiennent pas de cloisons ni de dispositifs pour la séparation des phases. Elles se caractérisent par la stagnation ou la faible circulation de la phase liquide. En pratique leur utilisation se répand dans plusieurs domaines, comme contacteurs



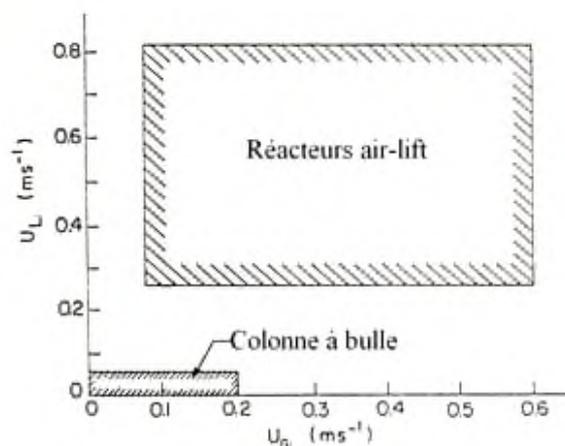
**Figure I.4 :** Schéma d'une colonne à bulles

multiphasiques, comme sièges de réactions chimiques (oxydation, chloration, alkylation, hydrogénation, polymérisation...etc.), comme sièges de bioprocédés (fermentation, aération, culture de micro-organismes, production d'enzymes, de protéines et d'antibiotiques.) ; elles sont utilisées également dans le domaine pétrochimique (synthèse de combustible par conversion du gaz), dans l'industrie métallurgique et le traitement des eaux. Une colonne à bulles peut être considérée comme une variante de réacteurs multiphasiques offrant une multitude d'avantages par rapport aux réacteurs classiques (Chisti, 1989; Vial et al., 2000; Kantarci et al., 2005).

## I.6 Les réacteurs airlifts

C'est une sorte de colonne à bulles modifiée où la phase liquide est mise en circulation par induction. Principalement un réacteur airlift consiste en un dispositif constitué de deux tubes formant deux zones distinctes connectées entre elles par une cloison ou une jonction horizontale. La première zone est une colonne verticale, siège d'un écoulement diphasique ascendant, alimentée à sa base par le gaz et le liquide. On appelle cette partie *le riser (tube montant)*. La seconde zone est aussi une colonne, ou un tube vertical, à travers lequel le liquide provenant du riser en traversant la jonction horizontale circule vers le bas. Cette zone est appelée *downcomer (tube descendant)*. Le riser et le downcomer peuvent avoir différentes formes géométriques (circulaire, rectangulaire...etc.). La jonction horizontale liant ces derniers peut être une zone fermée ou ouverte ce qui fait du downcomer une zone aérée (ou faiblement aérée), donc, caractérisé par un certain taux de vide comme le riser. Le principe faisant circuler la phase liquide est le même que celui expliqué au début de ce manuscrit. C'est-à-dire, la circulation de la phase liquide est induite par la différence de densité et de pression (Chisti, 1989 ; Vial et al., 2000).

Chisti (1989) établit un digramme permettant de situer le domaine opératoire des colonnes à bulles et des réacteurs airlifts en fonction des vitesses superficielles des deux phases figure I.5.



**Figure I.5 :** Domaine opératoire d'une colonne à bulles et d'un réacteur airlift (Chisti, 1989)

Les réacteurs airlifts se rencontrent fréquemment dans les procédés de l'industrie chimique nécessitant le contact gaz-liquide ; dans les bioprocédés où ils sont utilisés en général pour l'aération, la fermentation, la culture des micro-organismes et les réactions biochimiques (protéine, vitamines, enzymes...etc.). De tels systèmes se caractérisent par des champs de cisaillements assez faibles, c'est pourquoi ils remplacent efficacement l'agitation mécanique nocive aux micro-organismes. Comme les colonnes à bulles, les réacteurs airlifts favorisent le transfert de masse et de chaleur ; ils jouent un rôle important dans l'homogénéisation de la température et la stabilité thermique. Contrairement aux colonnes à bulles, ils offrent la possibilité de travailler à de très hauts débits de gaz (Chisti, 1989 ; Vial et al., 2000).

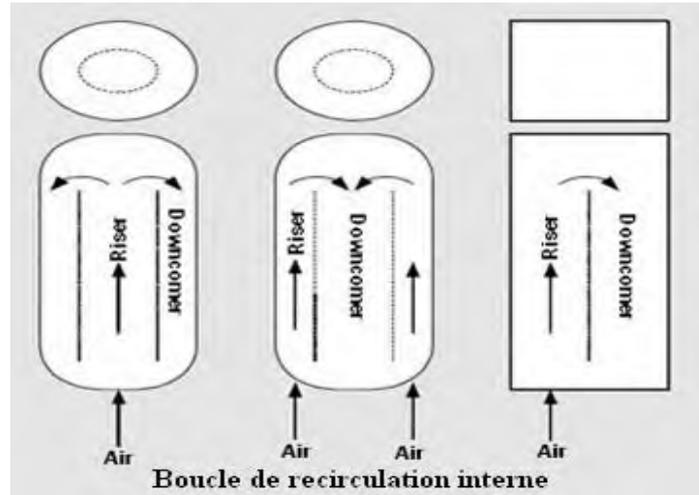
De nombreuses publications traitent du comportement hydrodynamique des réacteurs airlifts (Chisti et al., 1988 ; Chisti, 1989; Chisti et Moon-Yong, 1993 ; Chisti et al., 1995 ; Vial et al., 2000, 2001, 2002, 2005; Zhang et al., 2006; Rujiruttanakul et Pavasant, 2011). Cependant, du fait des variations géométriques et des tâches auxquelles ils sont destinés, le dimensionnement ou la modélisation de ces réacteurs d'une manière efficace et universelle s'avèrent difficile. D'autant plus que ce dimensionnement concerne à la fois le riser et downcomer, puisque les paramètres qui caractérisent chaque zone et qui déterminent la performance du réacteur sont intimement liés. Par exemple, s'agissant du taux de vide, on parle distinctement du taux de vide dans le riser ( $\varepsilon_r$ ) et du taux de vide dans le downcomer ( $\varepsilon_d$ ). Beaucoup de modèles ont été établis en vue de corrélérer les deux taux de vide. Le rapport des sections riser ( $A_r$ ) et downcomer ( $A_d$ ), les vitesses des phases sont autant d'exemples qui peuvent servir d'illustration (Chisti, 1989; Gavrilescu et Tudose, 1995; Vial et al., 2000).

Les réacteurs airlifts se scindent principalement en deux catégories :

- Réacteur airlifts à boucle externe ;
- Réacteurs airlifts à boucle interne.

#### **a. Réacteurs à boucles internes**

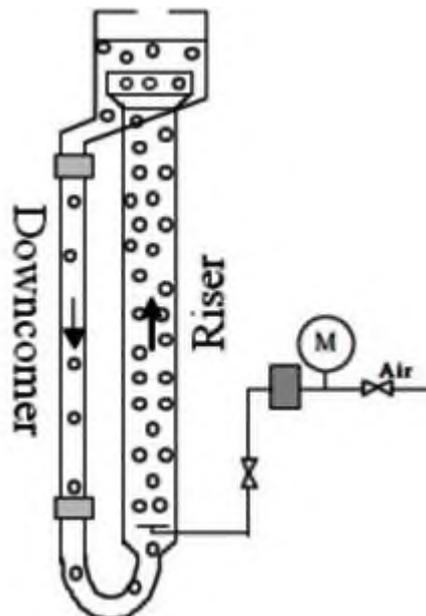
Dans l'enceinte principale, il comporte une paroi jouant le rôle de déflecteur pour former le riser et le downcomer. Ces derniers sont donc séparés par cette paroi. Pour cette catégorie il existe de multiples configurations dont certaines sont schématisées sur la figure la figure (I.6).



**Figure I.6 :** Quelques configurations de réacteurs airlift à boucle interne

### b. Réacteurs à boucles externes

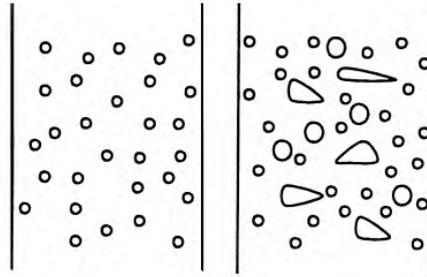
Ils sont constitués de deux colonnes séparées (le riser et le downcomer) mais liées au sommet et à la base par deux jonctions horizontales. Cette partie donne l'avantage de désaérer complètement le downcomer où l'écoulement est descendant. Les configurations sont moins variées mais plusieurs modifications peuvent être introduites au niveau de la jonction riser-downcomer (voir la figure I.7).



**Figure I.7 :** Configuration d'un réacteur airlift à boucle externe (Vial et al. (2000-2005))

## I.7 Régime homogène et régime hétérogène

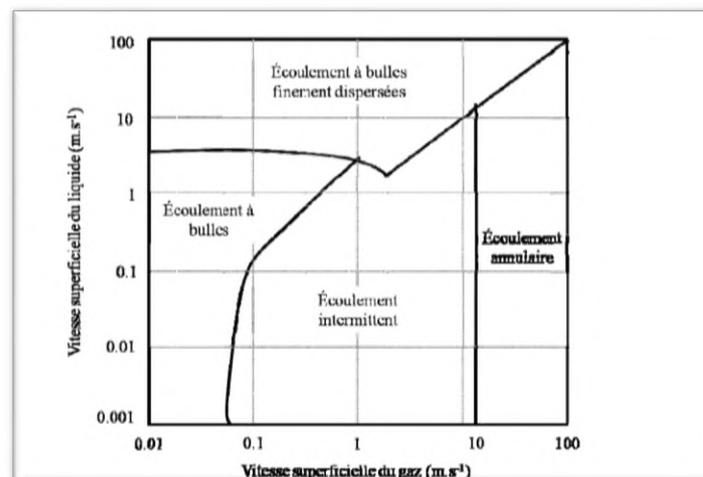
Dans le cas des réacteurs airlifts, pour la désignation des régimes, la structure de l'écoulement diphasique est divisée en deux types formant deux régimes principaux, à savoir le régime homogène et le régime hétérogène. Le régime homogène n'est autre que le régime à bulles défini précédemment. Le régime hétérogène englobe le régime à poches et le turbulent baratté (voir figure I.8), (Vial et al, 2000)



**Figure I.8 :** Régimes d'écoulement dans un réacteur airlift.  
Gauche : régime homogène. Droite : régime hétérogène

## I.8 Cartes d'écoulement

Les cartes d'écoulement sont une autre façon qui permet de situer ou d'identifier graphiquement des régimes d'écoulement en fonction de différents paramètres qui sont placés comme ordonnées et abscisses sur les axes des cartes. Ces paramètres peuvent être : la vitesse (la plupart des temps sur l'axe des abscisses), le taux de vide, les nombres adimensionnels (Reynolds, Froude, Pecklet...etc.), le diamètre de la colonne ou tout simplement un groupement de paramètres.



**Figure I.9 :** Exemple d'une carte d'écoulement

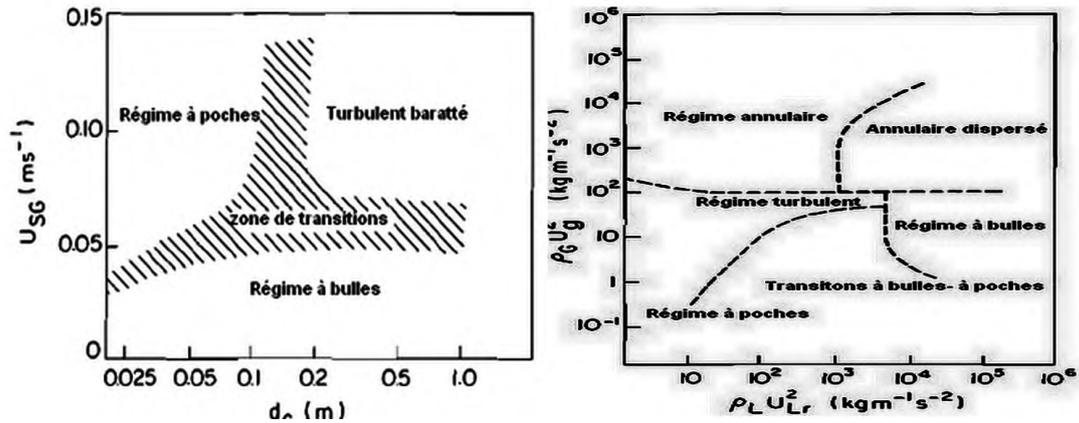


Figure I.10 : Autres exemples de cartes d'écoulements

## I.9 Paramètres caractérisant un système airlift

La performance d'un réacteur airlift ou son efficacité dépendent d'un certain nombre de paramètres géométriques et opérationnels dont les principaux sont énumérés comme suit (Chisti, 1989 ; Caramasa et al., 1999, Ait Baaziz et Barat, 2017) :

- Diamètre de la colonne ;
- Hauteur de la colonne ;
- Nature du disperseur ;
- Jonction riser-downcomer ;
- Débits de la phase gazeuse ;
- Propriétés de la phase liquide ;
- La nature du mélange ;
- Le niveau du liquide dans le réacteur.

Pour les configurations simples, l'influence de la géométrie du réacteur airlift sur l'évolution des principaux paramètres hydrodynamiques, se réduit en général à l'effet du rapport des sections downcomer/Riser ( $A_d/A_r$ ). Lorsque le rapport ( $A_d/A_r$ ) augmente, une diminution de la rétention de gaz dans le riser est observée. En effet, l'augmentation du diamètre du downcomer provoque une diminution des pertes de charge (pertes de charges en haut à l'entrée du downcomer et dans la jonction de base du réacteur) ce qui permet une augmentation de la vitesse de la circulation du liquide (Bennajah, 2007, Ait Baaziz et Barat, 2017).

## I.10 Les avantages d'un système airlift

- ✓ La sûreté, la stabilité et l'efficacité du fonctionnement;
- ✓ Minimum d'énergie requise pour sa maintenance et sa mise en marche;
- ✓ Un fonctionnement durable;
- ✓ Les systèmes type airlift trouvent une utilisation croissante où la fiabilité et le peu d'entretien sont requis quand l'air comprimé ou le gaz est facilement disponible comme source d'énergie verte (Barrut, 2011);
- ✓ Les systèmes airlift occupent peu d'espace;
- ✓ Les systèmes airlift ont l'avantage de ne posséder aucune pièce mécanique en mouvement ceci permet d'éviter les problèmes liés la corrosion, l'abrasion et la lubrification;
- ✓ Sa réalisation ne demande pas des couts élevés;
- ✓ Les airlift ne sont pas disponibles auprès des fournisseurs. Chaque système est conçu et adaptée pour une situation donnée.

## I.11 Différentes applications des systèmes airlift

L'utilisation des systèmes airlift touchent plusieurs domaines :

- Pompage des eaux et du pétrole dans les puits et les mers ;
- Soulever de l'eau chargée de particules (traitement des eaux usées) (Stening et Martin, 1968) ;
- Archéologie marine pour la récupération des objets fragiles (Kassab et al.,2009) ;
- Récupération des minerais dans les mines marines (Stening et Martin, 1968) ;
- Captage de l'eau de mer pour son épuration (Ben Nedjma et Bouchareb., 2018) ;
- Manipulation des matières corrosives, toxiques (Clark et Dabolt (1986) ;
- Entretien et aération des aquariums (Reinemann et al., 1990) ;
- Comme réacteurs chimique pour les réactions mettant en jeu des gaz et des liquides (Chisti, 1989, Gourich, 2006) ;
- En géothermie pour la récupération de la chaleur sous-terrainne (Honegger.,1984). ;
- Pour la remontée des eaux océaniques afin d'alimenter les zones pauvres en nutriments (Fan et al., 2013) ;

- Comme réacteurs ou bioréacteurs pour les bioprocédés (aération, fermentation.) (Chisti et al.,1995).
- Récemment en domaine médical pour certaines applications (aérosolthérapie) (Hanafizadeh et Ghorbani., 2012).

## **I.12 Méthodes d'injections dans les systèmes airlifts**

### **A. Méthode d'injection radiale**

Pour cette méthode d'injection, la phase liquide reçoit l'air comprimé grâce à des orifices situés sur la face latérale tubulaire du disperseur, alors un jet d'air perpendiculaire par rapport au riser qui contient la phase liquide en résulte (Parker, 1980, Khalil et al., 1999, Yousfi & Soualeh, 2018).

### **B. Méthode d'injection axiale**

Cette méthode ne diffère pas trop de la première, cependant la disposition des orifices du disperser se situent sur la surface transversale, ensuite des jets d'air parallèles à l'écoulement de la phase liquide à l'intérieur du tube sont créés (Parker, 1980, Khalil et al., 1999, Yousfi & Soualeh, 2018).

### **C. Méthode de double injection**

La technique de double injection consiste à injecter l'air dans les directions axiale et radiale en même temps, à travers des trous sur la surface latérale et transversale du disperseur (Parker, 1980, Khalil et al., 1999 ; Yousfi & Soualeh, 2018).

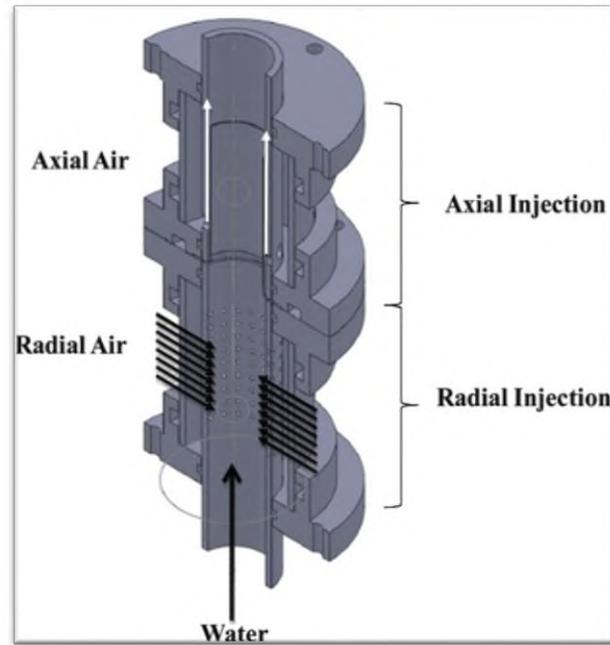


Figure I.11 : Exemple de méthode à double injection (Ahmed et Badr, 2012)

#### D. Méthode d'injection à orifice unique

Le disperser dans cette méthode contient un seul trou, la phase gazeuse injectée est introduite directement dans la colonne d'une façon parallèle à l'écoulement (Parker, 1980, Khalil et al., 1999, Yousfi & Soualeh, 2018).

#### E. Autres méthodes

##### ❖ Injection rotative

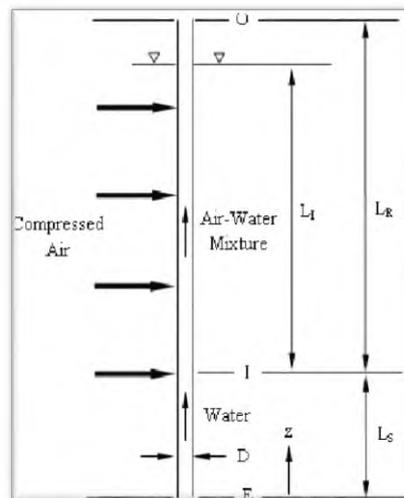
C'est un type d'injection radiale avec une rotation de disperser. Nous l'avons rencontré sous forme d'une étude expérimentale effectuée par Kassab et al. (2010)



**Figure I.12 :** Système d'injection rotatif de (Kassab et al., 2010)

### ❖ Injection multi-étage

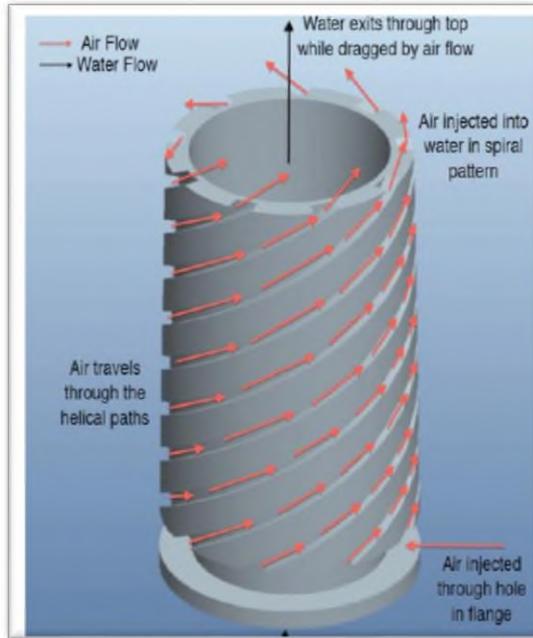
Il s'agit d'une injection d'air dans différents étages de la colonne. A travers l'analyse bibliographique, nous n'avons trouvé aucun cas pratique. Seulement une étude théorique proposée par Mahrous (2014).



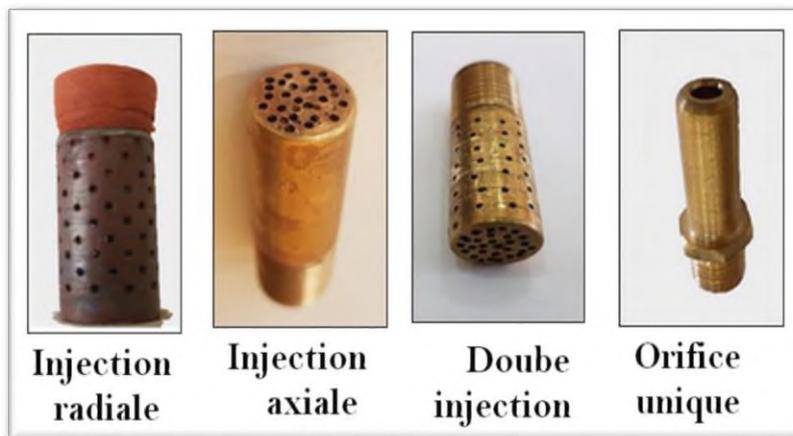
**Figure I.13 :** Schéma représentatif d'une injection multi-étages (Mahrous 2014)

❖ **Injection hélicoïdale**

C'est l'une des méthodes d'injection radiale avec des trous sur le disperseur qui aident à avoir un écoulement de la forme hélicoïdale.



**Figure I.14 :** Injection hélicoïdale (Riglin, 2011)



**Figure I.15 :** Exemple de disperseurs (Yousfi & Soualeh, 2018)

### I.13 Paramètres influençant le fonctionnement d'un système airlift

Lors de l'étude d'un système de pompage de type airlift, plusieurs paramètres peuvent influencer le fonctionnement d'un système airlift. Dans ce qui suit, nous citons les paramètres principaux que nous avons rencontrés dans la littérature.

#### I.13.1 Hauteur de plongée ( $H_p$ )

La hauteur de plongée est le rapport la partie immergée de la colonne (H) et sa hauteur totale (L).

$$H_p = \frac{H}{L} \quad (I.1)$$

Où H, représente la partie immergée et L, la longueur de la colonne.

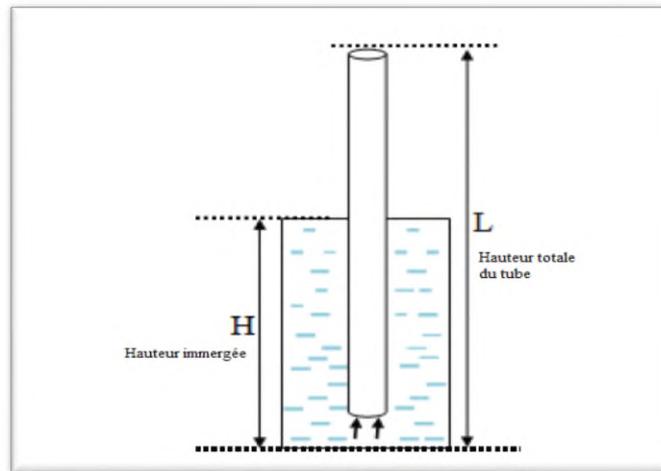


Figure I.16 : Schéma illustrant la hauteur de plongée

### I.13.2 Le Rendement ( $\eta$ )

Dans le cas d'un système conçu pour le pompage, le rendement est calculé par l'équation de Nicklin (1963), Le rendement d'un système de pompage airlift ( $\eta$ ) est le rapport entre travail mécanique nécessaire pour soulever une quantité de liquide ( $Q_l$ ) à une hauteur ( $L - H$ ) et le travail mécanique fourni par le compresseur suivant une détente isotherme de la pression d'injection à la pression atmosphérique.

$$\eta = \frac{\rho_l g Q_l (L-H)}{P_a Q_g \ln \frac{P_{inj}}{P_a}} \quad (I.2)$$

$Q_l$  : Débit de la phase liquide ( $m^3/s$ ) ;

$Q_g$  : Débit d'air injecté à la base de la colonne ( $m^3/s$ ) ;

$P_{inj}$  : Pression de l'air injecté (Pa) ;

$\rho_l$  : Masse volumique de la phase liquide ( $Kg/m^3$ ) ;

$P_a$  : Pression atmosphérique (Pa) ;

$H$  : Hauteur d'entraînement (m) ;

$L$  : Longueur de la colonne (m).

### I.13.3 L'efficacité (E)

Introduite par Parker (1980), l'efficacité est définie comme étant le rapport entre le débit massique de la phase liquide et le débit massique de la phase gazeuse, cette notion est utilisée pour évaluer les performances d'un système airlift.

$$E = \frac{\rho_l Q_l}{\rho_s Q_s} \quad (I.3)$$

### I.13.4 Gradient de pression

On définit le gradient de pression global ( $\Delta P$ ) dans un écoulement diphasique vertical par la somme des trois composants, le gradient de pression lié à la gravitation ( $\Delta P_{grv}$ ), à l'accélération ( $\Delta P_{acc}$ ) et aux frottements entre les deux et la paroi ( $\Delta P_{fr}$ ).

$$\Delta P = \Delta P_{grv} + \Delta P_{acc} + \Delta P_{fr} \quad (I.4)$$

### I.13.5 La masse volumique du mélange diphasique

C'est la masse volumique de chaque phase rapportée à la fraction occupée par chacune de ces phases.

$$\rho_m = \rho_g \varepsilon + \rho_l (1 - \varepsilon) \quad (\text{I.5})$$

### I.13.6 Vitesses des phases et glissement

#### 1. Vitesse superficielle

Elle est définie par le rapport du débit volumique de la phase gazeuse ou liquide à la section transversale de la colonne montante. (Mcmanamey, 2008).

$$U_g = \frac{Q_g}{A} \quad (\text{I.6})$$

$$U_l = \frac{Q_l}{A} \quad (\text{I.7})$$

#### 2. Vitesse interstitielle

C'est le rapport de la vitesse superficielle d'une phase et la fraction occupée par cette phase. (Mcmanamey, 2008)

$$u_g = \frac{U_g}{\varepsilon} \quad (\text{I.8})$$

$$u_l = \frac{U_l}{(1-\varepsilon)} \quad (\text{I.9})$$

#### 3. Vitesse de glissement ( $U_s$ )

C'est la différence entre la vitesse réelle de la phase gazeuse et celle de la phase liquide dans un écoulement diphasique (Hills, 1976, cité par Yousfi et Soualah, 2018)

$$\text{Elle est donnée par : } U_s = \frac{U_g}{\varepsilon} - \frac{U_l}{1-\varepsilon} \quad (\text{I.10})$$

### I.13.7 Rapport de glissement (S)

C'est le rapport de la vitesse superficielle du gaz à celle du liquide son expression est donnée par la relation :

$$S = \frac{U_g}{U_l} \quad (\text{I.11})$$

### I.13.8 Le Taux de vide

On l'appelle aussi *rétenion gazeuse*, le taux de vide est la proportion de la phase gazeuse dans le mélange diphasique. C'est un paramètre dépendant de nombreux facteurs, notamment de la vitesse de circulation du liquide, la pression d'injection, de la taille des bulles et des propriétés physiques des deux phases en présence, comme la densité, la viscosité, la tension de surface, la force ionique et les caractéristiques de coalescence du liquide (Snape et al., 1992 ;1995).

C'est une caractéristique hydrodynamique très importante. Elle contribue à la détermination d'autres paramètres : la nature des régimes d'écoulement, le coefficient de transfert de matière et l'aire interfaciale. On distingue plusieurs notions du taux vide, à savoir :

- **Taux de vide global** : c'est la fraction volumique occupée par le gaz dans le mélange diphasique totale. Il s'exprime comme étant le rapport du volume de gaz au volume occupé par le mélange diphasique. Il est donné par :

$$\varepsilon = \frac{v_g}{v_g + v_l} \quad (\text{I.12})$$

- **Taux de vide surfacique** : c'est le rapport entre l'aire occupée par la phase gazeuse et l'aire totale occupée par le mélange diphasique. Il est défini par :

$$\varepsilon = \frac{A_g}{A_g + A_l} \quad (\text{I.13})$$

- **Taux de vide volumétrique** : c'est le rapport du débit volumique de la phase gazeuse au débit volumique total du mélange diphasique :

$$\beta = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} \quad (\text{I.14})$$

### I.13.9 Techniques de mesure du taux de vide

Etant donné l'importance de la détermination du taux de vide dans l'identification de la structure de l'écoulement, le développement des techniques de mesure du taux de vide à fait le but de plusieurs recherches parmi les plus connues on trouve les suivantes :

**a) Technique de vanne à fermeture rapide**

Cette technique est la plus utilisée et la plus précise, la plus communément utilisée pour mesurer le taux de vide global. Elle consiste à arrêter rapidement l'écoulement circulant dans la colonne entre les deux vannes de fermeture de celle qui coupe l'alimentation en air et celle qui coupe l'alimentation en liquide. Cette technique est convenable pour étalonner les résultats donnés par les autres méthodes de mesure. Le taux de vide est déterminé en mesurant le volume occupé par le gaz sur le volume total compris entre les deux vannes. Le seul inconvénient que présente cette technique est l'arrêt de l'écoulement pour chaque mesure (Pochet., 2012).

**b) Techniques radiatives**

Celle-ci repose sur l'exploitation des propriétés d'absorption des rayonnements de la phase gazeuse et la phase liquide. Les rayonnements utilisés sont les rayons X, gamma,  $\beta$  et les neutrons. En général les plus fréquents sont les rayons X, gamma (Pochet., 2012).

**c) Technique d'anémomètre à fil chaud**

Celle-ci est beaucoup utilisée en monophasique pour les mesures locales de vitesse et de quantités reliées à la turbulence. En diphasique le signal obtenu présente de fortes baisses lors du passage du gaz. Avant de pouvoir calculer les différentes variables, le concepteur sépare la partie du signal correspondant au gaz de celle correspondant au liquide. L'auteur (Utiger, 1998) adopte ici une technique digitale mise au point dans le cadre de son travail. La présente technique permet alors d'obtenir des valeurs locales de taux de vide, de vitesse moyenne du liquide, de fluctuation de vitesse et d'intensité de turbulence.

**d) Technique de sonde électrique**

La technologie des sondes électriques est basée sur les changements d'impédance due à la variation de la conductivité du mélange. Tels que la conductivité du liquide n'est pas identique à celle du gaz. Le taux du vide peut donc être calculé en mesurant la conductivité, la quantité de fluide s'écoulant à l'extrémité de la sonde (Pochet, 2012).

**e) Technique acoustique**

Cette technologie est basée sur la différence de vitesse de propagation des ondes sonores dans l'environnement. Dans ce cas, lorsque les ultrasons sont émis et rencontrent des interfaces gaz-liquide, en raison des différences d'impédance du milieu il y a le

phénomène de réflexion qui est produit. Par conséquent, la mesure du vide est basée sur l'utilisation de caractéristiques acoustiques de deux phases (Pochet, 2012).

#### **f) Technique d'expansion du volume**

Cette technique est utilisée davantage dans les colonnes à bulles de section uniforme sans recirculation de liquide, auquel le vide sera calculé. En mesurant la hauteur du liquide stationnaire et la hauteur du mélange diphasique près expansion, permettent de mesurer la fraction de la phase liquide. L'obtention du taux de vide est accomplie en soustrayant la fraction de liquide de l'appareil. Pour le calcul de ce dernier l'expression suivante est utilisée :

$$\varepsilon = 1 - \frac{H_l}{H_m} \quad (\text{I.15})$$

Où  $H_l$  et  $H_m$  : Sont respectivement les hauteurs du liquide et la hauteur du mélange diphasique.

#### **g) Technique manométrique**

Elle est utilisée pour mesurer le taux de vide global entre deux sections de la colonne séparées par une hauteur  $\Delta H$ . Les deux sections sont dotées de deux prises de pression reliées à un manomètre en U. Le principe de la technologie comprend à exploiter les lois fondamentales de l'hydrostatique (Hills, 1976; Hikita et al., 1973 , 1980; Hunta et al., 1973, 1980. Akita et al., 1988; Chisti,1989; Chisti,1995; Vial et al., 2002; Tigzerth, 2016 Caramasa et al., 1999) : Si la dénivellation lue sur le manomètre est de  $\Delta z$ , le taux de vide global est mesuré par l'expression suivante :

$$\varepsilon = \left( \frac{\rho_m - \rho_l}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{\Delta z}{\Delta H} \quad (\text{I.16})$$

## **CHAPITRE II**

---

### **Dispositif expérimental et techniques de mesure**

Dans ce chapitre nous allons décrire le dispositif expérimental ainsi que les techniques de mesures utilisées. Dans le cadre de notre travail, il a été procédé à une étude expérimentale qui a porté sur l'effet de quelques techniques d'injection du gaz sur quelques paramètres hydrodynamiques et le fonctionnement d'un réacteur airlift à boucle externe.

## II.1 Présentation de l'installation

Comme il s'agit d'étudier l'effet des méthodes d'injection, le dispositif expérimental utilisé est conçu de sorte à ce que le changement du disperseur soit facile. L'installation a été réalisée au sein du laboratoire d'hydrodynamique de l'université A. Mira de Bejaïa. Le choix et les détails de la configuration sont inspirés de la littérature. (Chisti, 1989, Vial et al ;2000-2005).

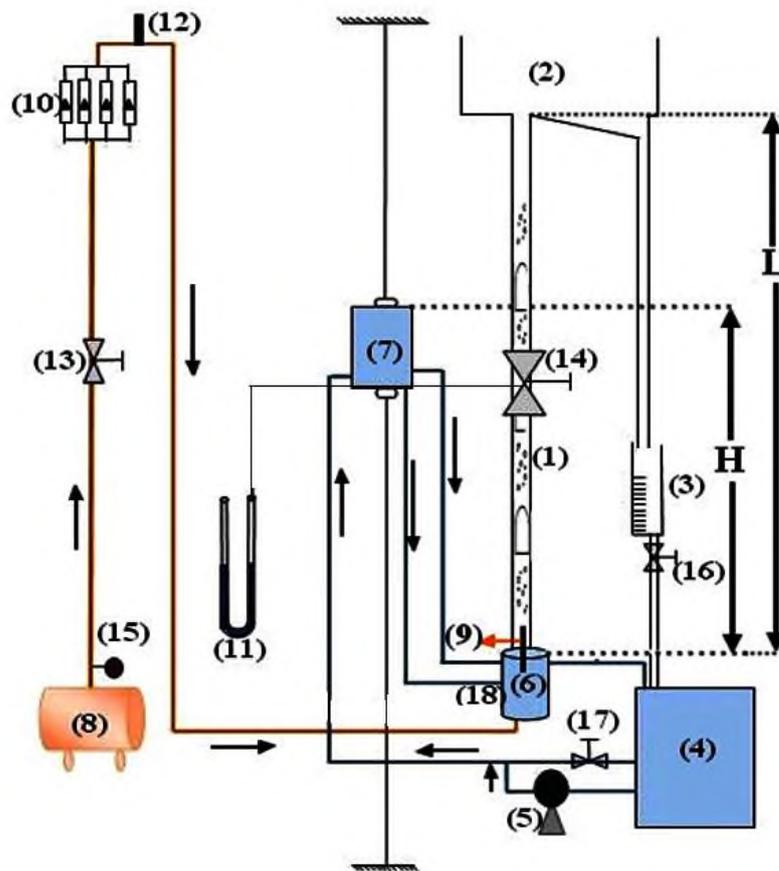


Figure II.1 : Schéma de l'installation expérimental

- (1) : Colonne ; (2) : Séparateur de phases ; (3) : Bac gradué ; (4) : Réservoir d'eau ; (5) : Pompe à eau ; (6) : Section de transit ; (7) : Bac coulissant ; (8) : Compresseur ; (9) : Disperseur ; (10) : Débitmètres à air ; (11) : manomètre ; (12) : Thermomètre ; (13) : Vanne à air ; (14) : Vanne du taux de vide ; (15) : Régulateur de pression ; (16), (17) : Vanne ; (18) : prise de pression

**a. Colonne (riser)**

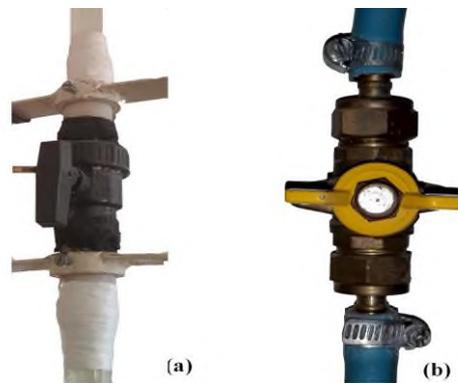
C'est l'élément principal de l'installation. C'est aussi et le siège de l'écoulement diphasique ascendant. La colonne est un tube vertical de forme cylindrique, fabriqué en plexiglas ; cette dernière offre comme avantage la possibilité d'observer l'écoulement et de le suivre visuellement.



**Figure II.2 :** Colonne (riser)

### b. Les vannes du taux de vide

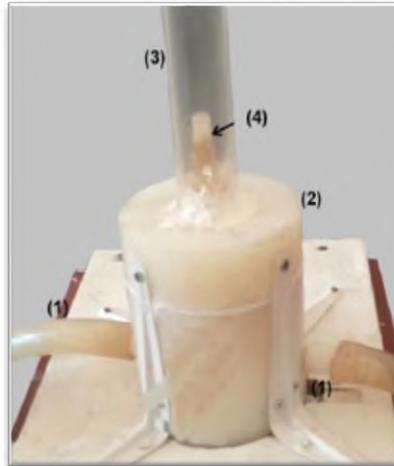
La mesure du taux de vide global par la *technique de vanne à fermeture rapide* consiste à couper simultanément l'alimentation en gaz et en liquide à un point donné de l'écoulement. Donc, pour cela, dans le cas du dispositif expérimental étudié, la vanne coupant l'alimentation en eau sépare la colonne en deux parties de telle sorte que la longueur de la partie supérieure est de 1031 mm. Tandis que la partie inférieure est de 588 mm (voir la figure II.2). La deuxième vanne servant pour la coupure de l'alimentation en air est indiquée par le chiffre (13) sur la figure (II.1). C'est une vanne à gaz qui se ferme aussi à demi-tour.



**Figure II.3** : Vannes du taux de vide.  
(a) : Vanne coupant l'écoulement diphasique  
(b) : Vanne coupant l'alimentation en air

### c. Section de transit

Il s'agit d'un dispositif cylindrique en téflon de diamètre intérieur de 120 mm fixé sur le support de la structure métallique et sur laquelle la colonne est montée (figure II.4). C'est une pièce qui sert de transit pour la phase liquide lors du remplissage de la colonne. Il dispose de trois entrées dont les deux premières sont conçues pour alimenter la colonne en phase liquide provenant du bac coulissant et la troisième, située à sa base, sert à alimenter la colonne en air provenant du compresseur à travers un disperseur. Une sortie est conçue pour la vidange de la colonne et son nettoyage (figure II.4). Sur la surface latérale de la section, une prise de pression est réalisée pour une éventuelle mesure du gradient de pression.



**Figure II.4 :** Emplacement de la section de transit ; (1): Alimentation en phase liquide ; (2) : Section de transit ; (3) : Colonne ; (4) : Disperseur

#### d. Disperseurs et techniques d'injection

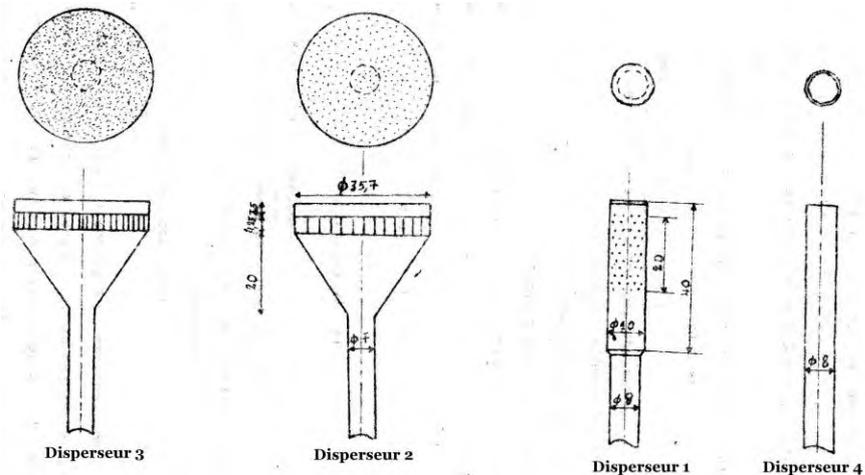
Les quatre types de disperseurs utilisés au cours de ce travail sont schématisés sur la figure (II.5).

**Le disperseur 1 :** c'est un tube cylindrique en cuivre de diamètre intérieur 10 mm. A son extrémité, sur sa surface latérale, 100 trous de 1mm de diamètre sont réalisés d'une façon uniforme. Ainsi, en obstruant l'orifice axial, le mode d'injection assuré avec ce disperseur est radial. Dans la suite de ce travail, nous l'avons noté «DISP 1».

**Le disperseur 2 :** il est fabriqué en bronze. Sa forme est presque conique (voir la figure II.5); 205 trous de diamètre 0,7 mm sont réaliés sur la section transversale permettant ainsi d'assurer une injection en mode axial. Dans la suite de notre travail nous l'avons noté : « DISP 2 ».

**Le disperseur 3 :** il est identique au disperseur 2, à la différence de ce dernier, il dipose de 625 trous de diamètre 0.4 mm. De même, ce disperseur assure un mode d'injection axial. Dans la suite de ce travail, nous l'avons notée : « DISP 3 ».

**Le disperseur 4 :** C'est un tube en cuivre de diamètre intérieur 10 mm à orifice unique. Dans la suite du travail nous l'avons noté : « Disp 4 ».



**Figure II.5 :** Les quatre disperseurs utilisés

### e. Séparateur de phases

Le séparateur de phase est un bac en plexiglas de forme parallélépipédique, ouvert et transparent, monté sur la structure métallique, fixé au plafond et relié à la sortie de la colonne. Le mélange diphasique atteint cette partie et se sépare en deux phases. L'air est évacué vers l'extérieur et la phase liquide est acheminée à travers le donwcomer pour atteindre le bac de mesure du débit du liquide. Le bac est suffisamment profond et fermé par une grille pour éviter l'entraînement du liquide vers l'extérieur.



**Figure II.6 :** Séparateur de phases

**f. Downcomer**

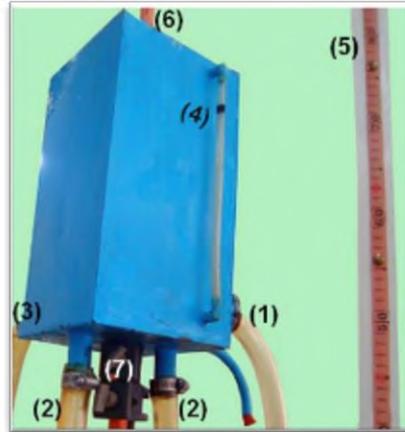
C'est un tube qui fait lier le séparateur de phases avec le bac gradué, il permet de récupérer la phase liquide avec un écoulement dirigé vers le bas.



**Figure II.7 :** Downcomer

**g. Bac coulissant**

C'est un bac en zinc de forme parallélépipédique il sert à varier la hauteur plongée. Le bac est fixé sur une tige métallique verticale sur la structure d'une façon parallèle à une règle graduée. La variation de la hauteur se fait par le glissement de ce bac à la position désirée, la colonne se remplit au même niveau de cette position. Il dispose d'une entrée pour son alimentation en phase liquide et de deux sorties pour alimenter la section de transit et la colonne. Ce bac est muni d'un indicateur de niveau afin de contrôler et ajuster le niveau du liquide dans la colonne et une sortie reliée avec le réservoir principal en cas de débordement du liquide.



**Figure II.8 :** Bac coulissant

- (1) Alimentation en phase liquide Alimentation du bac ; (2) : Alimentation de la colonne  
 (3) : Sortie d'évacuation de l'excès liquide ; (4) : Indicateur de niveau ; (5) : Règle graduée ; (6) : Tige métallique servant de support ; (7) : fixateur du bac

#### **h. Alimentation en eau**

Elle est assurée par une pompe qui aspire de l'eau à partir d'un réservoir. L'eau est refoulée à travers des conduites transparentes jusqu'au bac coulissant pour l'envoyer vers la section de transit. Un by pass est installé à la sortie de la pompe pour éviter le débordement. L'eau traverse le séparateur de phases, le riser, et le downcomer pour finir dans le réservoir du départ formant un circuit fermé. Dans le cadre ce de travail, le système airlift est utilisé comme réacteur à boucle externe, donc la colonne (le riser) est complètement remplie : une hauteur de plongée égale à 100 %.

#### **i. Alimentation en air**

Elle se fait à l'aide d'un compresseur à air de marque Iuowei ayant une capacité de 100 litres et une pression maximale de 8 bars. Le compresseur est équipé d'un manomètre permettant de manipuler facilement la pression opératoire. La pression d'injection a été variée de 0,15 à 0,17 bar. L'air sortant du compresseur circule à travers un tuyau à gaz, traversant quatre débitmètres placés en parallèle. L'air comprimé est donc acheminé vers le disperseur. Afin d'éviter le retour d'eau au compresseur, le tuyau à air est placé au-dessus du séparateur de phases.



**Figure II.9 :** Compresseur utilisé

#### **j. Débitmètres à air**

Le flux d'air comprimé qui alimente la colonne peut être contrôlé par quatre débitmètres à flotteurs de type Krohne installés en parallèles.. Dans le cas de ce travail, un débitmètre a suffi. Le débit d'air a été donc varié de 53 à 620 l/h.



**Figure II.10 :** Débitmètre à air placés en parallèle

## **II.2 Fonctionnement de l'installation**

Le principe de fonctionnement d'un airlift est très simple, c'est une installation qui n'a pas d'organe mobile d'où son principale avantage. Cependant, le fonctionnement de celle-ci requiert un compresseur d'air qui assurera l'injection de l'air qui fera monter le liquide jusqu'au niveau attendu.

Comme nous l'avons mentionné ci-haut, le système airlift étudié est utilisé comme un réacteur airlift à boucle externe. La colonne doit être totalement remplie. Pour cela, on

ajuste le bac coulissant à la position qui correspond au remplissage total. On allume la pompe et ainsi l'eau refoulée jusqu'au bac coulissant est renvoyée à la colonne par le principe des vases communicants. On souligne que dans le fonctionnement de ce système, la pompe n'a servi qu'au maintien d'un niveau d'eau fixe dans le réacteur. Donc avant de mettre le compresseur en marche, aucun écoulement diphasique ne se produit. La phase liquide reste stagnante.

Il est impératif de s'assurer que la quantité débitée par la pompe pendant le fonctionnement est suffisamment supérieure à celle recueillie dans le bac gradué (6). Pour éviter tout débordement ou débit insuffisant au niveau du bac coulissant l'excès d'eau est renvoyé à travers une conduite connectée au réservoir principale (4) et un by-pass est placé à la sortie de la pompe permettant une meilleure alimentation en liquide.

A la mise en marche du compresseur, on procède au réglage de la pression d'injection et au choix du débit d'air. L'écoulement diphasique se manifeste le long de la colonne dès que le flux d'air atteint le disperseur. En fonction du débit d'air injecté, la structure de l'écoulement diphasique se développe et change en passant d'un régime homogène à un régime hétérogène.

Lorsque le mélange atteint le séparateur de phases, le gaz est évacué vers l'extérieur par contre la phase liquide est acheminée vers le bac gradué. A ce niveau, la mesure du débit de la phase liquide peut se faire à l'aide d'un chronomètre (voir ci-après la mesure de ce paramètre).

Pour chacun des quatre disperseurs utilisés, en variant le débit d'air sur une gamme allant de 53 à 620 l/h, des séries de mesures sont effectuées :

- Mesure du débit de la phase liquide ;
- Mesure du taux de vide global ;
- Mesure du gradient de pression au-delà de la vanne du taux de vide.

## **II.3 Techniques de mesures**

### **II.3.1 Mesure du débit de la phase liquide**

C'est la quantité d'eau entraînée à travers la colonne par unité de temps. A l'aide d'un chronomètre on mesure le temps nécessaire pour recueillir un volume d'eau compris entre deux graduations de bac gradué (figure II.11).

$$Q_l = \frac{V}{t} \quad (\text{II.1})$$

Remarque : pour toutes les expériences effectuées, pour d'éventuels besoins de calculs, les températures de l'air et de l'eau utilisée sont notées.



**Figure II.11 :** Bac gradué pour la mesure du débit

### II.3.2 Mesure du taux de vide

On utilise la technique de vannes à fermeture rapide pour mesurer le taux de vide. On a choisi cette méthode en raison de sa disponibilité et sa fiabilité rapportée dans la littérature (Ghajar et Bagawat, 2012 ; Kawanishi et al., 1990 ; Yijun et Rezkallah, 1993 ; Gharjar et Baghawat, 2012).

La technique de vanne à fermeture rapide consiste à fermer les deux vannes (13) et (14) simultanément. A l'instant qui suit la fermeture des deux vannes, le volume retenu dans la colonne est noté.

Le taux de vide est la fraction volumique de la phase gazeuse dans un mélange diphasique, on mesure d'abord la fraction du liquide puis on déduit la fraction du gaz par la relation suivante :

$$\varepsilon = 1 - \frac{H_L}{H_m} \quad (\text{II.2})$$

$H_L$  : Hauteur de la phase liquide (hauteur notée après la fermeture des deux vannes).

$H_m$  : Hauteur mouillée (hauteur occupée par le mélange diphasique).

### II.3.3 Mesure du gradient de pression

Au cours des expériences réalisées, le gradient de pression au-delà de la vanne a été estimé. Pour sa mesure, un manomètre à eau a été utilisé. L'une des branches du manomètre est branchée à une prise de pression située presque au milieu de la vanne (14) et la seconde est laissée ouverte à l'atmosphère. Les différences de pression ont été prises en mmH<sub>2</sub>O et dans les calculs elles sont converties en pascal en prenant comme masse volumique celle de l'eau .

$$\Delta P_v = \rho_e g \Delta H \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$\Delta P_v$  : pertes de pression au-delà de la vanne (14)

$\rho_e$  : masse volumique du mélange diphasique

$\Delta H$  : lecture sur le manomètre

$g$  : Accélération de la pesanteur

# **CHAPITRE III**

---

## **Résultats et discussions**

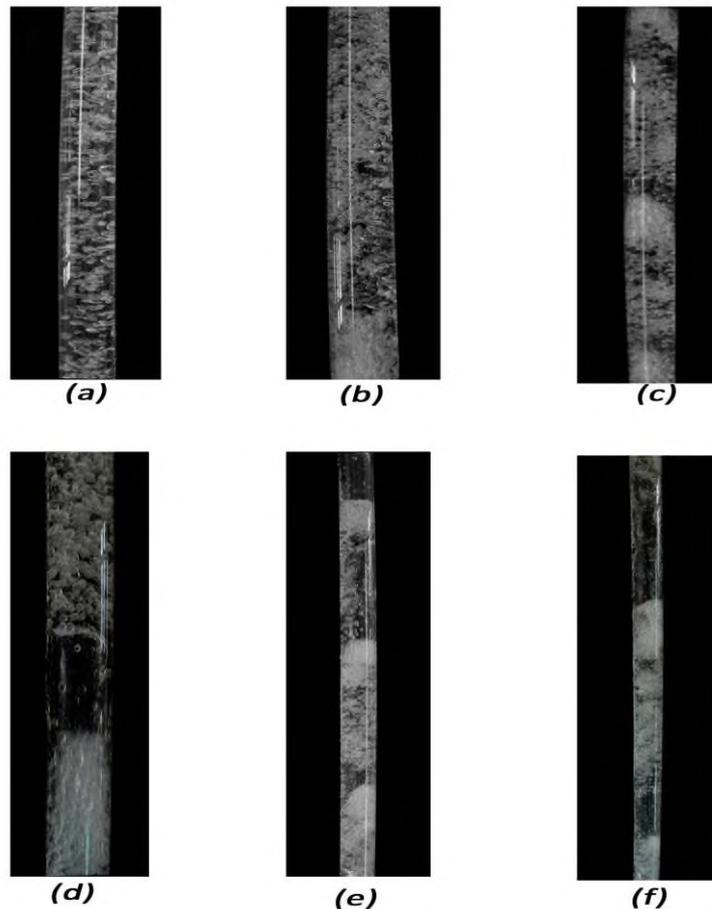
Dans ce chapitre nous allons présenter l'ensemble des résultats que nous avons obtenus après le traitement des données qui nous ont été fournies. Nous présentons le débit de la phase liquide, le taux de vide global et nous allons comparer ce dernier à deux corrélations de la littérature. Nous présentons également le gradient de pression au-delà de la vanne et sa relation avec la masse volumique du mélange diphasique.

### III.1 Régimes d'écoulement obtenus

Tout d'abord, nous présentons les photographies des régimes d'écoulement obtenus. Ces photos ont été prises lors de la réalisation des expériences par les auteurs des données que nous avons traitées. Sur ces photos, il s'agit de plusieurs structures d'écoulement que nous allons réduire uniquement à deux pour pouvoir utiliser le vocabulaire de la littérature dans le cas des réacteurs airlift :

Le régime homogène : c'est-à-dire le régime à bulles.

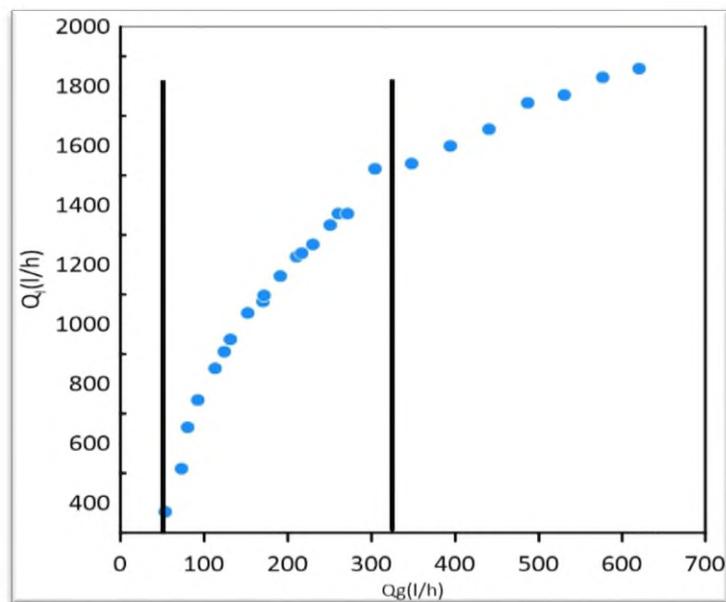
Le régime hétérogène : c'est-à-dire le régime à poches et le turbulent baratté.



**Figure III.1 :** Photographies des régimes d'écoulement obtenus  
(a) : régime homogène ; (b) (c) (d) (e) et (f) : régime hétérogène

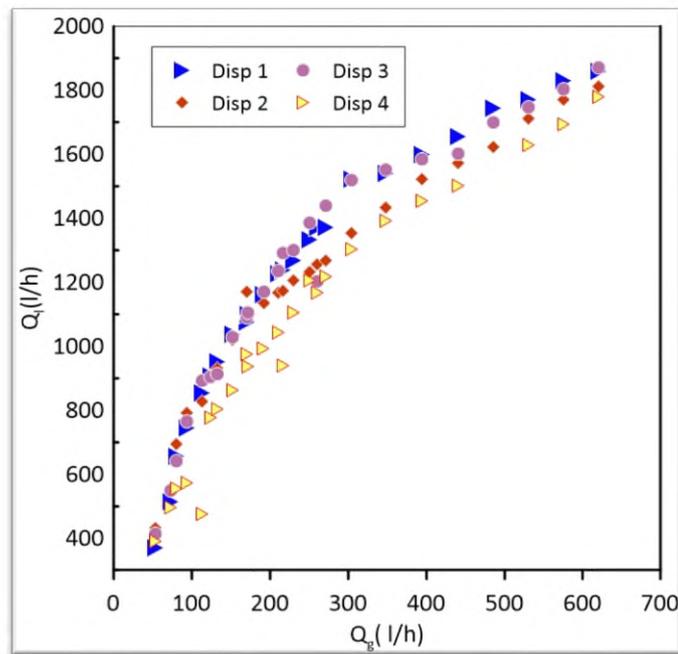
### III.2 Débit de la phase liquide

Sur la figure (III.2) nous avons représenté l'évolution du débit de la phase liquide en fonction du débit d'air injecté pour le disperser 1 pris comme référence. La présente figure montre que l'évolution du débit de la phase liquide se fait suivant trois phases distinctes. La première phase (1) correspond à la gamme des débits d'injection d'air qui n'ont pas produit de recirculation. À ce niveau, la phase liquide est juste parsemée de bulles et le débit injecté n'est pas suffisant pour entrainer la phase liquide jusqu'à l'obtention d'une recirculation. La seconde phase (2), correspond à la gamme des débits



**Figure III.2 :** Evolution du débit de la phase liquide en fonction de  $Q_g$

d'air où la recirculation a eu lieu. Dans cette étape, on constate que le débit de la phase liquide augmente d'une façon assez sensible avec le débit de la phase gazeuse. Il a été constaté visuellement lors des expériences que cette phase est associée au régime homogène (à bulles). A la troisième phase, le débit de la phase liquide continue d'augmenter avec l'augmentation du débit d'air mais d'une façon moins sensible avec une tendance à se stabiliser. Dans ce cas, la structure d'écoulement associée est le régime hétérogène (à poches et le turbulent baratté). Des résultats similaires ont été obtenus par (Chisiti -1988, Vial et al.,2001-2005).



**Figure III.3 :** Evolution du débit de liquide en fonction du débit d'air pour les quatre disperseurs

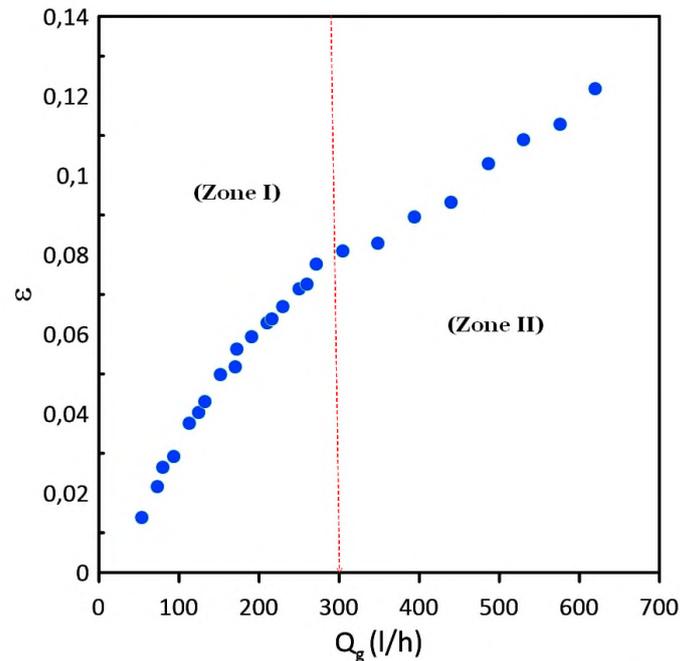
La figure Fig (III.3) représente l'évolution du débit de la phase liquide en fonction du débit de l'air comprimé pour le cas des quatre disperseurs utilisés dans le même repère. Pour les quatre disperseurs on constate de la même façon la présence d'une phase sans recirculation. On remarque que les courbes ont la même allure croissante, le débit de la phase liquide augmente progressivement et sensiblement avec l'augmentation du débit d'air jusqu'à environ  $Q_g=200$  l/h. Jusqu'à cette valeur, notamment avec les disperseurs DISP1, DISP2 et DISP3, les points sont presque confondus. Ce qui signifie que le changement de disperseur n'a produit aucun effet sur le débit de la phase liquide. L'évolution est quasi identique pour les disperseur DISP1 (injection radiale) et DISP3 (injection axiale à 625 trous) le long de toute la gamme du débit d'air utilisée. Pour le disperseur DISP4 (orifice unique) bien que l'aspect d'évolution soit le même, le décalage par rapport aux trois autres disperseurs est bien visible à partir de  $Q_g=100$ l/h. Ce disperseur à orifice unique se caractérise par un débit légèrement faible en comparaison avec le débit de la phase liquide obtenu par les autres disperseurs. On pense que ceci serait dû au régime hétérogène qui apparaît un peu plus tôt par rapport aux autres disperseurs. Pour le disperseur DISP4 les bulles naissent d'une façon différente.

### III.3 Taux de vide global

Le taux de vide global est mesuré en utilisant la méthode de vanne à fermeture rapide. Les auteurs des expériences ont considéré uniquement la partie supérieure de la colonne ayant comme hauteur 1032 mm.

Après l'exploitation des données qui nous ont été fournies, nous avons représenté sur la figure (II.4) l'évolution du taux de vide en fonction du débit de la phase gazeuse pour le disperseur de référence DISP1. La figure montre bien que le taux de vide global augmente avec l'augmentation du débit de la phase gazeuse. Il est relativement faible puisqu'il varie de 0,1 jusqu'à 0,14. Ceci serait dû au fait que le système est utilisé sous la configuration d'un réacteur. Le taux de vide est beaucoup supérieur dans les colonnes à bulles que dans les réacteurs airlift et ce, en raison de la circulation du liquide.

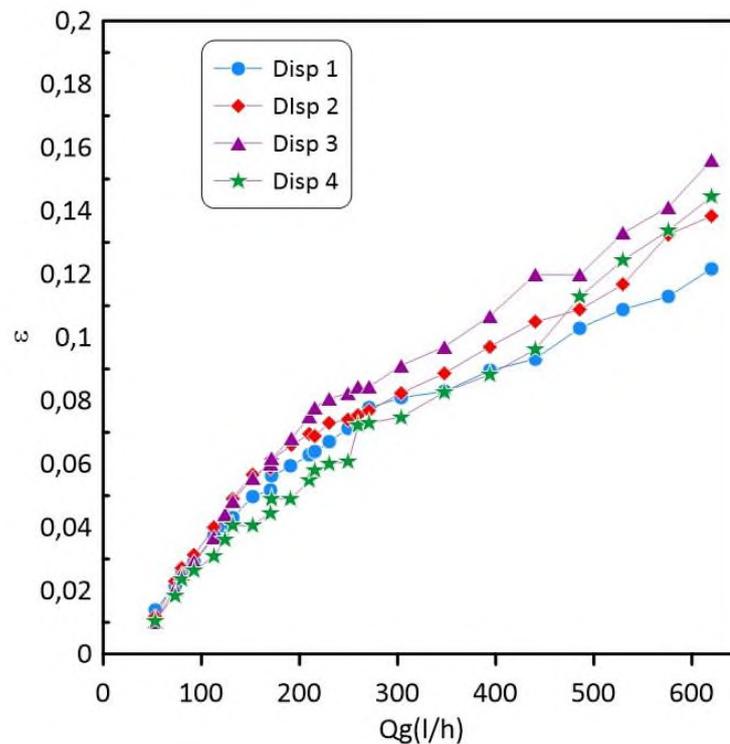
On peut diviser la courbe en deux zones : la zone(I) et la zone (II). La zone (I) se caractérise par une évolution sensible avec un rapprochement des valeurs. Il est possible même de dire que le taux de vide dans cette zone évolue d'une façon presque uniforme.



**Figure III.4 :** Evolution du taux de vide global en fonction du débit d'air pour le disperseur 1

Les auteurs de ces expériences ont noté dans leur carnet d'observations et nous l'avons constaté sur des vidéos que cette zone correspond au régime homogène (à bulles). A la limite de la zone (I) qui coïncide avec le débit  $Q_g=300\text{l/h}$ , une cassure se produit. En se fiant au travaux de Vial et al. (2001) dont les travaux ont porté sur un réacteur airlift à boucle externe, cette cassure correspond à un changement de régime, donc la transition vers le régime hétérogène. Ceci a été retrouvé dans le carnet des observations. Dans la zone (II), la figure(III.4) montre une évolution qui se caractérise toujours avec une croissance du taux de vide mais avec une dispersion de points plus accentuées.

Afin d'évaluer l'effet du disperseur sur l'évolution du taux de vide global, nous avons représenté ce dernier en fonction du débit d'air dans le même repère pour les quatre modes d'injection. L'analyse de la figure (III.5) montre que le taux de vide suit la même allure que celle décrite sur la figure (III.4) et que chaque courbe peut être divisée en deux zones distinctes séparées par une cassure ou une inflexion. La comparaison entre les quatre courbes permet de constater que dans la zone (I) les modes d'injection ont peu d'effet. Cet effet est d'autant plus négligeable que le débit d'air est faible. On voit que jusqu'aux environs de  $Q_g=100\text{l/h}$  les points sont presque confondus. Cette zone a été associée au régime homogène (régime à bulles). Le rapprochement des points se poursuit jusqu'à



**Figure III.5 :** Évolution du taux de vide global pour les quatre disperseurs

$Q_g=250$  l/h, point d'inflexion de la courbe. Cependant le rapprochement devient moins dense bien que cette zone soit également en régime homogène.

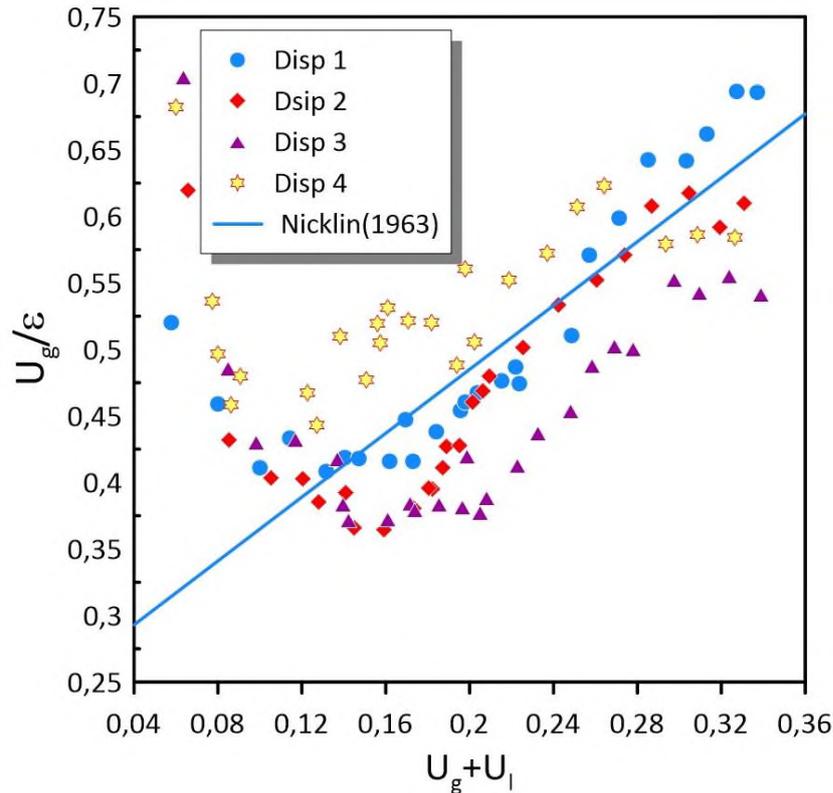
Les inflexions pour le disperseur DISP1, DISP2 et DISP3 se produisent presque au même endroit : aux alentours d'un débit d'air  $Q_g= 250$  l/h. Comme nous l'avons expliqué ci-haut, cette inflexion correspond au changement de régime. C'est-à-dire le passage du régime homogène vers le régime hétérogène. Le disperseur DISP4 (à orifice unique) se distingue des autres par le fait que cette inflexion de la courbe (se produit à un débit plus faible ( $Q_g=225$  l/h environ).

Quant à l'évolution du taux de vide dans la zone (II), c'est-à-dire en régime hétérogène, on voit clairement que le mode d'injection fait la différence. En effet, la figure (III.5) montre que le taux de vide le plus grand est obtenu avec le disperseur DISP3 (injection axiale avec 625 trous) avec un maximum avoisinant 0,16. Par ailleurs l'injection radiale produit le taux de vide le plus faible avec un maximum avoisinant 0,11.

#### III.4 Confrontation du taux vide avec la corrélation de Nicklin(1963)

La corrélation de Nicklin (1963) établie pour un régime à poches est souvent utilisée pour la prédiction du taux de vide global. Elle est donnée par l'équation suivante :  $\frac{U_g}{\varepsilon} = 1,2 (U_g + U_l) + 0,35 \sqrt{gD}$ . En vue de confronter nos résultats expérimentaux avec cette corrélation, nous avons tracé :  $\frac{U_g}{\varepsilon}$  en fonction de  $(U_g + U_l)$  et dans le même repère nous avons également représenté l'équation que nous venons de citer.

La figure (III.6) montre que les points expérimentaux ne concordent pas avec la prédiction de Nicklin (1963). En régime homogène (à bulles) le décalage est assez important. En régime hétérogène, qui correspond à la zone (II) dont nous avons parlé précédemment, on constate un rapprochement non significatif, vers la droite de Nicklin. Le rapprochement apparaît sous forme d'un nuage de point qui fait que le décalage est toujours assez grand. Dans cette configuration de notre système airlift, on conclut que la corrélation de Nicklin(1963) ne peut être utilisée pour la prédiction du taux de vide global.



**Figure III.6 :** Confrontation du taux de vide expérimental avec la corrélation de Nicklin (1963)

### III.5 Confrontation du taux de vide avec la corrélation de Hills(1976)

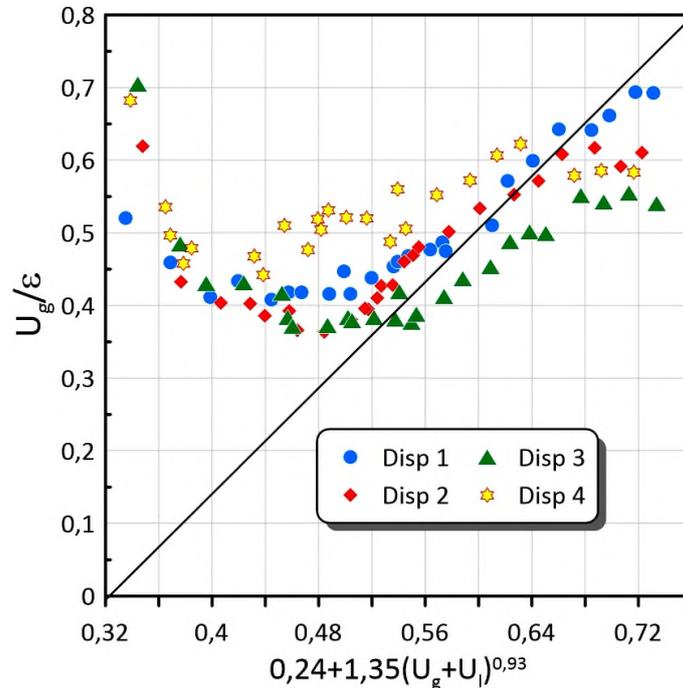
La corrélation de Hills(1976) est largement reprise dans la littérature également. C'est une corrélation issue du modèle à écarts de vitesse (*drift flux model*) établie pour une colonne à bulles. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{U_g}{\varepsilon} = 0,24 + 1,35(U_g + U_l)^{0,93}$$

Pour la confrontation de notre taux de vide expérimental, nous avons représenté pour les quatre disperseurs sur la figure (III.7) le rapport  $\frac{U_g}{\varepsilon}$  en fonction du taux de vide prédit par Hills(1976), à savoir le terme,  $24 + 1,35(U_g + U_l)^{0,93}$ .

La figure (III.7) montre un net décalage entre le taux de vide expérimental et celui prédit par Hills (1976) dans la gamme du débit d'air correspondant au régime homogène ( $Q_g < 250 \text{ l/h}$ ). Néanmoins, le rapprochement est assez satisfaisant dans la zone du régime hétérogène (à poches et turbulent baratté). Nous soulignons que les disperseurs DISP1 (mode radial) et DISP 2 présentent la meilleure concordance avec la corrélation de Hills

(1976). Les points qui leur correspondent sont presque alignés sur la diagonale. La présente corrélation peut être utilisée dans le cas de notre système en régime hétérogène.

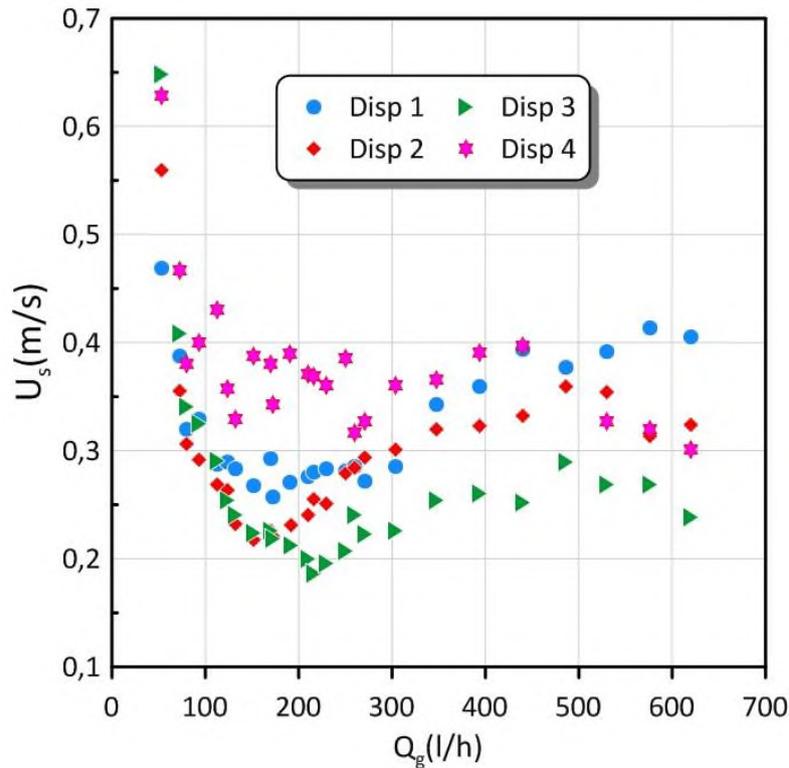


**Figure III.7 :** Confrontation du taux de vide expérimental avec la corrélation de Hills (1976)

### III.6 Vitesse de glissement

La vitesse de glissement représente la vitesse interstitielle (ou réelle) de la vitesse du gaz par rapport à celle du liquide. C'est une vitesse relative. L'expression de cette vitesse est rapportée au chapitre 1 et elle est donnée par :  $U_s = \frac{U_g}{\varepsilon} - \frac{U_l}{1-\varepsilon}$ .

Sur la figure (III.8) nous avons représenté cette vitesse en fonction du débit de l'air comprimé pour les quatre disperseurs utilisés. On remarque que pour les disperseurs DISP1, DISP2 et DISP3, la vitesse de glissement décroît pour la gamme des faibles débits d'air. Cette gamme correspond à la zone (I) décrite précédemment. Elle décroît jusqu'à atteindre un minimum puis elle remonte avec l'augmentation du débit d'air. On constate également que le minimum atteint par la vitesse de glissement est d'autant plus bas que le diamètre des trous est petit. Pour le disperseur à orifice unique, bien que la vitesse de glissement décroisse, elle ne suit pas la même allure. La zone où le minimum est censé se produire se caractérise par une sorte de nuage points. La fréquence des bulles à la naissance et leurs tailles seraient à l'origine de cette situation.



**Figure III.8 :** Variation de la vitesse de glissement en fonction du débit d'air pour les quatre disperseurs

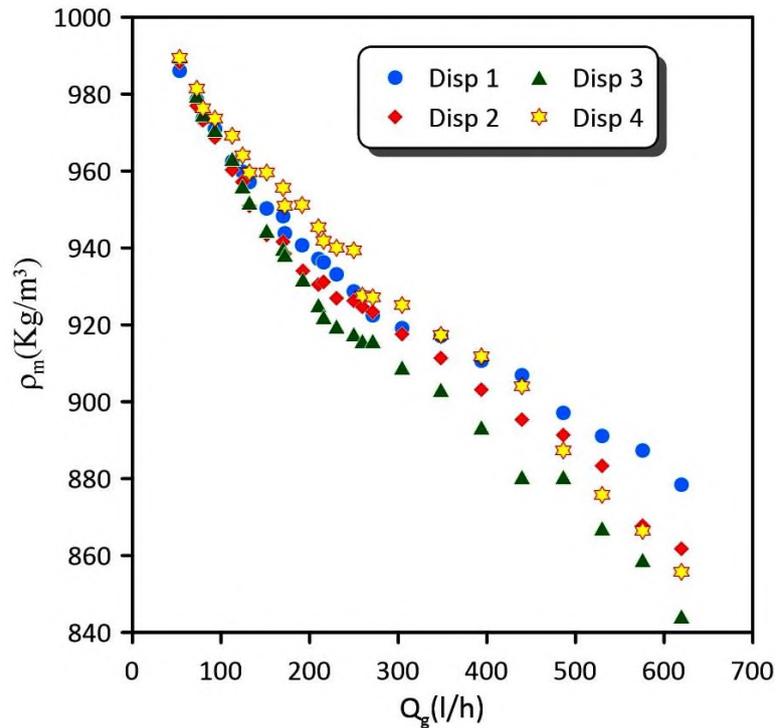
### III.7 Masse volumique du mélange

La figure (III-9) représente l'évolution de la masse volumique du mélange diphasique en fonction du débit d'air  $Q_g$  pour le cas des quatre disperseurs. Le calcul de la masse volumique du mélange diphasique est effectué avec la relation suivante :

$$\rho_m = \varepsilon \rho_g + (1 - \varepsilon) \rho_l.$$

Les courbes ont la même allure décroissante, car plus le débit d'air augmente dans la colonne plus le taux de vide aussi augmente comme le démontre la figure (III-9) donc le mélange a tendance à s'alléger puisqu'il est riche en bulles d'air ce qui provoque une diminution dans sa masse volumique. C'est la clé même du fonctionnement d'un système airlift.

Pour l'effet du mode d'injection, on constate que la masse volumique du mélange suit les variations du taux de vide dont elle dépend. Le mode d'injection ne produit aucun effet à très faibles débits d'air mais en augmentant ce dernier, l'évolution se caractérise par une divergence.

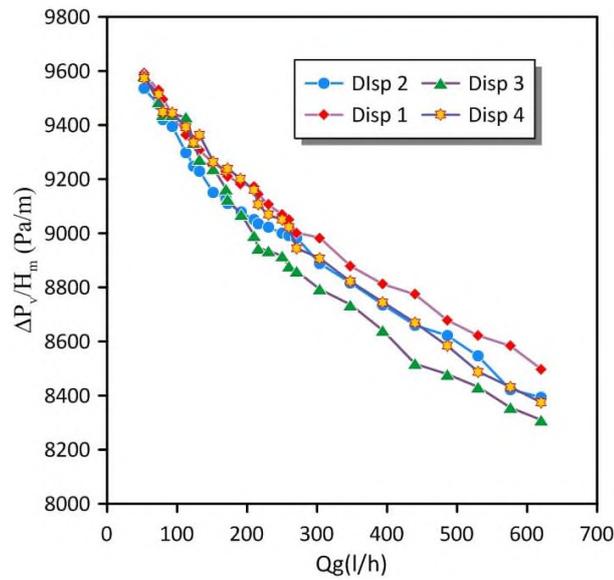


**Figure III.9 :** Evolution de la masse volumique du mélange diphasique en fonction de  $Q_g$  pour les quatre disperseur

### III.8 Gradient de pression au-delà de la vanne

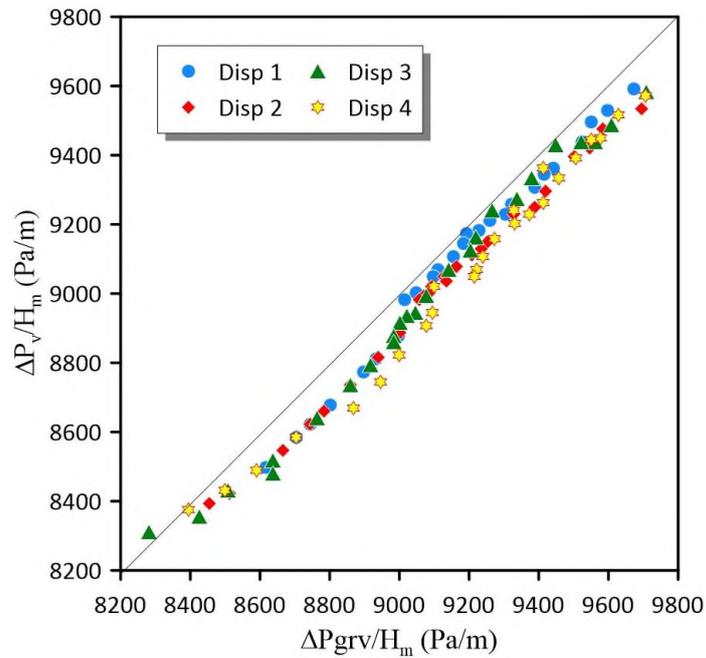
La perte de pression au-delà de la vanne (14) (voir figure II.1) a été mesurée avec un manomètre à eau. Les mesures ont été rapportées à la hauteur mouillée ( $H_m$ ) pour le calcul du gradient de pression  $\Delta P_v \left( \frac{Pa}{m} \right)$ . Le gradient de pression total dans la littérature est donné par :  $\Delta p_{\text{total}} = \Delta p_{\text{frot}} + \Delta p_{\text{grv}} + \Delta p_{\text{acc}}$ .

La figure (III.10) donne l'évolution du gradient de pression en fonction du débit d'air injecté. On constate que le gradient de pression au-delà la vanne diminue avec le débit de la phase gazeuse pour les quatre disperseurs utilisés. Ceci peut être expliqué par l'évolution de la masse volumique du mélange diphasique. Donc le gradient de pression dépend de la masse volumique du mélange. On constate que pour le régime homogène le mode d'injection n'a pas d'influence ; les points expérimentaux sont presque confondus. Mais plus le débit d'air augmente, plus on remarque une légère divergence d'un disperseur à un autre. Il est aussi à retenir que le disperseur DISP1 présente le gradient le plus grand. A l'opposé, on trouve le disperseur DISP3 dont le gradient est le plus faible.



**Figure III.10 :** Evolution du gradient de pression au-delà la vanne en fonction de  $Q_g$  pour les quatre disperseurs

Dans nos calculs, nous avons estimé la perte de pression due à la gravité en la rapportant par rapport à la masse volumique du mélange diphasique. Afin de la comparer au gradient de pression total, nous l'avons confrontée avec ce dernier dans le même repère (Figure III.11).



**Figure III. 11 :** Confrontation du gradient de pression total au gradient gravitaire

La figure (III.11) montre clairement que le gradient de pression total et le gradient de pression gravitaire sont très proches notamment pour la gamme de débits d'air donnant un régime hétérogène. Il est aussi constatable que le mode d'injection n'a aucun effet sur ce gradient. Ceci permet de dire que le gradient de pression total est presque égal à la composante gravitaire pour les quatre modes d'injection étudiés ici.

D'ailleurs, il est clair que la composante de l'accélération des phases  $\Delta p_{acc}$  ne peut être considérée dans notre cas, puisque dans la littérature, elle n'est prise en compte que lorsqu'il y a un changement de phase au sein de l'écoulement diphasique, ce qui n'est pas le cas pour un mélange air-eau à des températures ordinaires. Selon ces résultats, la composante des frottements lors de l'estimation du gradient total peut être négligée et seule celle de la gravité est à considérer.

Comme le gradient total dépend essentiellement de la composante gravitaire qui, elle-même dépend de la masse volumique du mélange, on conclut que le gradient total est directement lié à la masse volumique du mélange diphasique ( $\rho_m$ ). Pour illustrer cette conclusion, sur la figure (III.12), pour chaque disperseur nous avons tracé dans le même repère le gradient de pression et la masse volumique du mélange. La figure montre que le gradient de pression suit la même allure décroissante que la masse volumique. Par ailleurs, cette masse volumique dépend aussi du taux de vide, ceci revient à dire que le gradient de pression est lié au taux de vide global également.

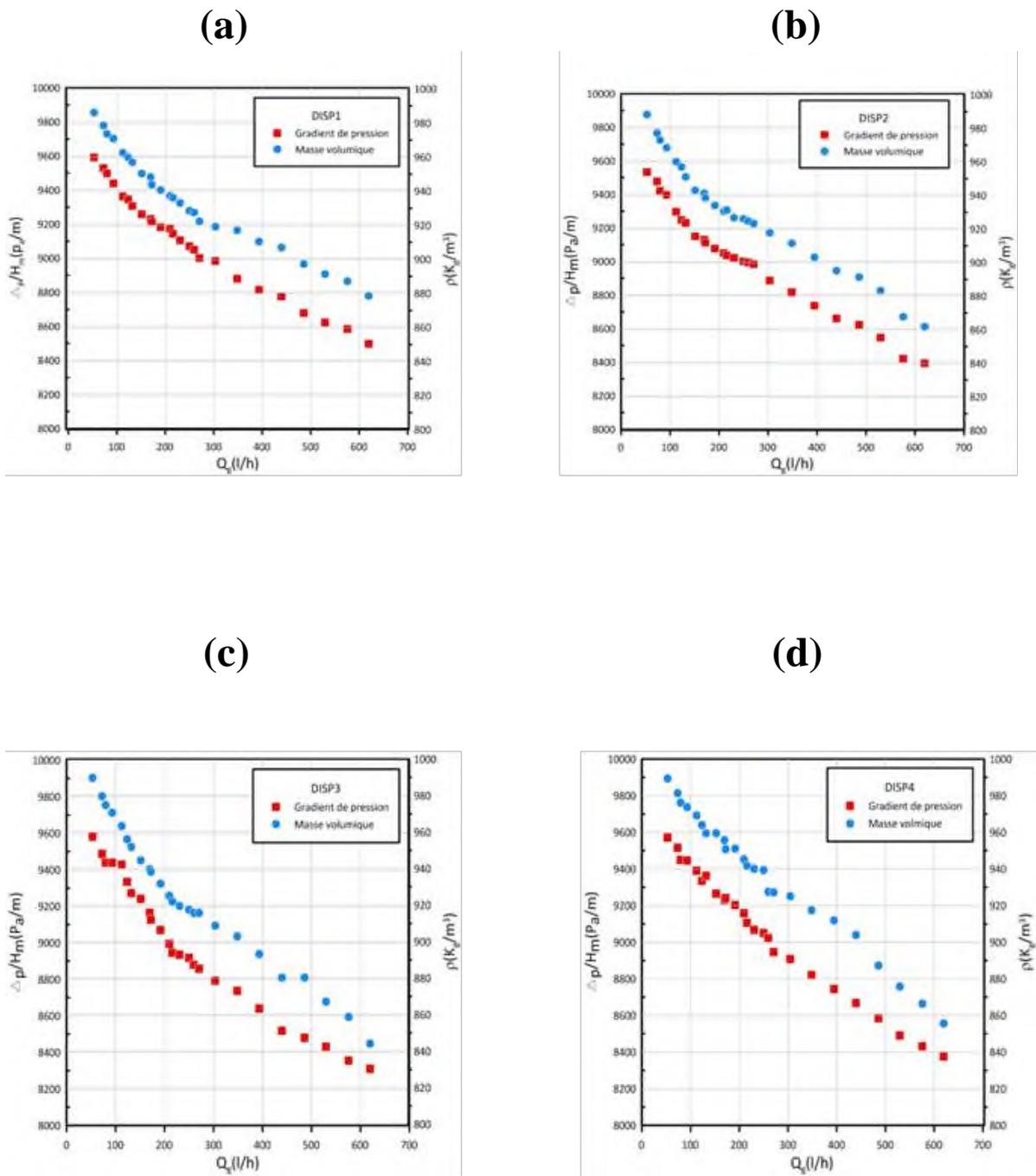


Figure III.12 : Confrontation de la masse volumique du mélange et du gradient de pression pour les quatre disperseurs

# **Conclusion**

---

Le présent travail est relatif à un traitement de données expérimentales obtenues avec un réacteur airlift à boucle externe en utilisant quatre modes d'injection. L'objectif fixé est d'étudier l'effet de ces quatre modes d'injection sur quelques paramètres hydrodynamiques permettant de caractériser ce réacteur, à savoir : le débit de la phase liquide, le taux de vide global, la vitesse de glissement, la masse volumique du mélange et le gradient de pression. Dans ce qui suit, en guise de conclusion, nous nous permettons d'émettre les points suivants :

- L'évolution de la phase liquide est presque identique pour tous les disperseurs à l'exception du disperseur DISP4 (orifice unique) qui présente un léger décalage.
- Les régimes d'écoulement dans ce présent réacteur airlift sont principalement le régime homogène (régime à bulles) et le régime hétérogène (régimes à poches et le turbulent baratté).
- Le taux de vide global augmente avec le débit d'air. En régime homogène, le mode d'injection ne produit aucun effet. En régime hétérogène, une divergence a été constatée. Le disperseur à mode radial (DISP1) donne le plus faible taux de vide.
- L'évolution du taux de vide global se caractérise par une inflexion qui correspond à la transition du régime homogène au régime hétérogène. Cette inflexion coïncide également avec le minimum de la vitesse de glissement.
- La masse volumique du mélange diphasique décroît avec le débit d'air. Elle suit l'allure du taux de vide.
- Le gradient de pression au-delà de la vanne est intimement lié au taux de vide global. Il décroît avec l'augmentation du débit d'air et suit la même allure. En régime homogène il est indépendant du mode d'injection, en régime hétérogène, il présente un décalage similaire à celui du taux de vide.
- Le gradient de pression total dépend essentiellement des pertes de charge gravitaires.
- Le taux de vide semble être le paramètre le plus important pour la caractérisation d'un réacteur airlift.

## **Références bibliographiques**

---

Ahmed., H. M. Badr.2012. *Dual-Injection Airlift Pumps: An Enhanced Performance*. Mechanical Engineering Department, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran, Saudi Arabia.516p.

Ahmed,W.H., Badr, H.M., Al-Qutub, A.M., 2016. *Air injection methods: The key to a better performance of airlift pumps*. Experimental Thermal and Fluid Science 70, 354–365.

Ait baziz, N., Barat, N., 2017. *Conception, réalisation et caractérisation hydrodynamique d'un réacteur airlift à boucle externe*. Université Abderrahmane Mira de Béjaia.

Akita, K., Okazaki, T., Koyama, H., 1988. *Gas holdups and friction factors of gas-liquid two phase flow in an air-lift bubble column*. J. Chem. Eng. Japan 21, 476-482.

Alasadi, A. A. M. H, Habeeb, A. K., 2016. *Analytical and Experimental Investigation for the Effect of Air Injection Angle on the Performance of Airlift Pump*. J.of Engineering 22, 118-137.

Bhagwat, S. M., Ghajar, A. J., 2012. *Similarities and differences in the flow patterns and Void Fraction in vertical upward and downward two phase flow*. Exper. Therm. Fluid Sci. 39, 213–227.

Barrut Bertrand ,2011. *Etude et optimisation du fonctionnement d'une colonne airlift à dépression - Application à l'aquaculture*.

Bennajah. M., 2007. *Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électrolocation en réacteur airlift*. Thèse de doctorat en Génie des procédés et de l'environnement. Institut national polytechnique de Toulouse (France).

Ben Nedjma Ishaq, Bouchareb Ahmed ,2017-2018. *Contribution à l'étude expérimentale d'un système d'AIR LIFT*.

Berg Dan.*Shipwreck Diving*.2010.Disponible sur : <https://ScubaBoard.com>

Bouchaib Gourich , 2006. *Analyse et étude comparative des performances hydrodynamiques et de transfert gaz-liquide dans trois types de réacteurs polyphasiques colonne à bulles, air-lift rectangulaire et emulsair*.

Camarasa, E.,Vial, Ch., Poncin, S., Wild, G., Midoux, N., Bouillard, J., 1999. *Influence of coalescence behavior of the liquid and of gas sparging on hydrodynamics and bubble characteristics in a bubble column*. Chem. Eng. Process 38, 329–344.

Chisti, M.Y., 1989. *Airlift Bioreactors*. Elsevier Applied Science, London and New York.

Chisti, Y.Moo-Yong, M., 1993. *Improve the performance of airlift reactors*. Chem. Eng. Progress 89, 38-45.

Chisti, Y., Wenge, F., Moo-Yong, M., 1995. *Relationship between riser and downcomer gas hold-up in internal loop airlift reactors without gas-liquid separators*. The chem. Eng. J. 57, B7-B13.

Clark, N.N., Dabolt, R.J., 1986. *A general design equation for airlift pumps operating in slug flow*. Aiche J. 32, 56-63.

De Cachard ,1986. *Etude théorique et expérimental des instabilités des systèmes de pompage par air-lift*.

Fan, W., Chen J., Pan, Y. C., Huang, H., Chen, C. A., Chen, Y., 2013. *Experimental study On the performance of an airlift pump for artificial upwelling*. Ocean Engineering 59, 47–57.

François.O., Gilmore.T., Pinto.M.J., Gorelick.M.S., 1996. *A physically based model for airlift pumping*. Water resources research, 32, 2383-2399.

Fujimoto, H., Murakami, S., Omura, A., Takuda, H., 2004. *Effect of local pipe bends on pump performance of a small air-lift system in transporting solid particles*. Int. J. Heat and Fluid Flow 25, 996-1005.

Gavrilescu, M., Tudose, R.Z., 1995. *Study of the liquid circulation velocity in external-loop airlift bioreactors*. Bioprocess Engineering 14, 33-39.

Hanafizadeh, P., Ghorbani, B., 2012. *Review study on airlift pumping systems*. Multiphase Science and Technology 24, 323-362.

Hikita H., Kikukawa, H., 1973. *Gas hold-up in bubble columns*. Bull. Univ. Osaka Prefect.,Ser.A., 22 151.

Hills, J. H., 1976. *The operation of a bubble column at high throughputs. I. Gas hold-up measurements*. Chem. Eng. J. 12, 89-99.

Hongger J.L, 1984. *Activation De Puits Géothermiques Par Gaz-Lift Continu*. Rapport du B.R.G.M 84 Service Géologie National 195 Institut Mixte De Recherche Géothermique.

Kantarci, N., Borak, F., Ulgen, K. O., 2005. Bubble column reactors. *Process Biochemistry* 40, 2263–2283. *Performance*. *J. Eng. Power Trans. ASME* 90, 106-110.

Kawanishi, K., Hirao, Y., Tsuge, A., 1990. *An experimental study on drift flux parameters for two phase flow in vertical round tubes*. *Nuclear Eng. and Design* 120, 447-458.

Kassab, S. Z., Adam, I. G., El Gohary, H. A., *Influence of the air injection method on the performance of an air lift pump*. Proceedings of ICFD 10th International Congress of Fluid Dynamics Dec 16-19, 2010, Egypt.

Kumar, E. A., Kumar, K. R.V., Ramayya, A. V., 2003. *Augmentation of airlift pump performance with Tapered riser pipe : An experimental study*. *J. Inst. Eng.* 84, 114–119.

Korichi Massouda ,2015-2016.*Exploration fonctionnelle d'un modèle de la pompe Air lift* .Université Mouhamed Boudiaf M'sila .

Lemonnier Hervé, 2006.*Une Introduction aux écoulements diphasiques*. CEA/Grenoble.245p.

Mahrous Abdel-Fattah , *Experimental Study of Airlift Pump Performance with S-Shaped Riser Tube Bend*, *I.J. Engineering and Manufacturing*, 2013, 1, 1-12.

Nicklin, D. J., 1963. *The air-lift pump theory and optimization*. *Int. Chem. Eng.* 4, 29-39.

Parker, G. J., 1980. *The effect of footpiece design on the performance of a small air lift pump*. *Inter. J. Heat Fluid Flow* 2, 245-252.

Pochet, S., 2012. *Développement d'un système pour la mesure du taux de vide dans un écoulement diphasique par une méthode utilisant des micro-ondes*. Mémoire de maitrise en Sciences Appliquées. Université de Montréal (Canada).

Rekibi Saliha. *Système de pompage par la technique Air lift*. Hydraulique. Alger, École Nationale Polytechnique .2011.

Reinemann, D. J., Patrlange, J.Y., Timmons, M.B., 1990. *Theory of small diameter airlift pump*. *Int. J. Multiph. flow* 16, 113-122.

Riglin Jacob ., 2011 . *Performance characteristics of airlift pumps with vortex induced tangential fluid injection*. Bucknell University , Pennsylvania

Ronald F. Malone and Sripavani Gudipati. *Airlift-PolyGeysers Combination Facilitates Decentralized Water Treatment in Recirculating Marine Hatchery Systems*. Civil and Environmental Engineering. Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana 70803-6405.2005.

Saidi,S.,Yahiaoui,F.,2016. *Effet de la viscosité de la phase liquide sur quelques caractéristiques hydrodynamiques d'un système airlift*. . Université Abderrahmane Mira de Béjaia.

Snape, J. B., Fialovaz, M., Zahradnik., J., Thomas, N.H., 1992. *Hydrodynamic studies in an external loop airlift reactor containing aqueous electrolyte and sugar solution*. Chem. Eng. Sci. 47, 3387-3394.

Stenning, A.H., Martin, C.B., 1968. *Analytical and experimental studies of air lift pump performance*. J. Eng. Power Trans. ASME 90, 106-110.

Tighzert, H., 2016. *Contribution à l'étude expérimentale de la structure d'un écoulement diphasique de type airlift*. Thèse de doctorat en science. Université Abderrahmane Mira de Béjaia.

Utiger.M., 1998. *Etude de l'hydrodynamique locale d'un réacteur airlift à boucle externe par Anémométrie à film chaud*. Thèse de maîtrise en science appliquée. Ecole Polytechnique de Montréal (Canada).

Vial C., Camarasa E., Poncin, S., Midoux, N., Wild G., 2000. *Study of the hydrodynamic behavior in bubble columns and external loop air-lift reactors through analysis of pressure fluctuations*. Chem. Eng. Sci. 55, 2957-2973.

Vial, C., Poncin, S., Wild, G., Midoux, N., 2001. *Simple method of regime identification and flow characterization in bubble column and air-lift reactors*. Chem. Ing. Process. 40, 135-151.

Vial, C., Poncin, S., Wild, G., Midoux, N., 2002. *Experimental and theoretical analysis of the hydrodynamic in the riser of an external loop air-lift reactors*. Chem. Eng. Process. 57, 4547-4762.

Vial, C., Poncin, S., Wild, G., Midoux, N., 2005. *Experimental and theoretical analysis of axial dispersion in the liquid phase in external loop reactors*. Chem. Ing. Sc. 60, 5945 - 5954.

Victor Fuses, Navarra, *Noves aplicacions de la trompa d'aigua o trompa dels pirineus: elevació d'aigua, aire comprimit i generació d'electricitat*, Barcelone. Université polytechnique de Catalogne, juin 2010 (ISBN 9788469377031, p. 62-67.

William J. McManamey, D. A. John Wase, Sugat Raymahasay and Kuganakathan Thayanithy, *The Influence of Gas Inlet Design on Gas Hold-up Values for Water and Various Solutions in a Loop-type Air-lift Fermenter*, J. Chem. Tech. Biotechnol. 1984,348, 151-164.

Yijun, J., Kameil, S., Rezkallah, K., 1993. *A study on void fraction in vertical co-current upward and downward two-phase gas-liquid flow*. Chem. Eng. Communication 126, 221-243.

Yousfi.A, Soualah,S , 2018. *Etude expérimentale de l'effet de quelques méthodes d'injection sur les performances d'un système de pompage de type airlift*. Université Abderrahmane Mira de Béjaia.

Zhang, T. Wang, T. Wang, J., 2006. *Analysis and measurement of mass transfer in airlift loop reactors*. Chinese J. Chem. Eng. 14, 604 - 610.

**Résumé :** Dans ce travail on a étudié l'effet de quelques modes d'injections sur l'hydrodynamique d'un réacteur airlift à boucle externe constitué d'une colonne 50 mm de diamètre et de 1,6 m de hauteur. La mesure du débit de la phase liquide, la mesure du taux de vide par la technique de vanne à fermeture rapide et la mesure du gradient de pression ont permis de calculer la masse volumique du mélange diphasique, la vitesse de glissement et le gradient de pression au-delà de la vanne. Les résultats ont montré que le changement de disperseurs n'a produit aucun effet notamment dans le régime homogène (régime à bulles). L'évolution du taux de vide global se caractérise par une inflexion qui correspond à la transition du régime homogène au régime hétérogène. Cette inflexion coïncide également avec le minimum de la vitesse de glissement. La masse volumique du mélange diphasique décroît avec le débit d'air. Elle suit l'allure du taux de vide, Le gradient de pression total dépend essentiellement des pertes de charge gravitaires qui, elles-mêmes dépendent du taux de vide. Les résultats sont confrontés à quelques travaux de la littérature, à savoir la corrélation de Nicklin(1963) et la corrélation de Hills (1976)).

**Mots-clés :** Réacteur airlift, Ecoulement diphasique, Boucle externe, Taux de vide, pertes de pression.

**Abstract :** In this work, the effect of some injection modes on the hydrodynamics of an external loop airlift reactor consisting of a 50 mm diameter column 1.6 m high, was investigated. By measuring the flow rate of the liquid phase, measuring the void fraction using the quick-closing valve technique and measuring the pressure gradient, it was possible to determine the density of the two-phase mixture, the slip velocity and the pressure gradient above the valve. The results showed that the change of dispersers had no effect especially in the homogeneous regime (bubble regime). The evolution of the void fraction is characterized by an inflection which corresponds to the transition from the homogeneous to the heterogeneous regime. This inflection also coincides with the minimum sliding speed. The density of the two-phase mixture decreases with the air flow rate. The total pressure gradient depends essentially on the gravitational pressure losses, which in turn depends on the void fraction. The results are compared with some works in the literature, as the Nicklin (1963) correlation and the Hills(1976) correlation.

**Keywords:** Airlift Reactor, Two-phase flow, External loop, Void fraction, Pressure drop.