

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université a. Mira de Bejaia



Faculté de Technologie Département de Génie des procédés
Laboratoire de Génie de l'Environnement

Mémoire

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER**

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Présenté par

MOUSSAOUI Samira et HAMADOU Zahia

Thème

**Étude expérimentale de l'effet de la technique
d'injection multi-étage sur les performances d'un
système de pompage de type airlift**

Soutenu le 27/09/2022

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mme HAMAIDI Nassima	MCA	Université de Béjaia	Présidente
Mme BELAID Taous	MCA	Université de Béjaia	Examinatrice
M. TIGHZERT Hamid	MCA	Université de Béjaia	Encadrant
Mme KECHROUD Nassima	MCA	Université de Béjaia	Co- Encadrante

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire d'Hydrodynamique du département de Génie des Procédés, Université A. Mira de Béjaïa, sous la direction de M. Tighzert Hamid.

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre promoteur M. Tighzert Hamid qui nous a accordé sa confiance. Nous le remercions pour sa patience, son sens d'appréciation scientifique, ses suggestions pertinentes et ses conseils précieux qui nous ont servi de guide pour l'aboutissement de ce travail. Nous tenons également à remercier notre co-promotrice madame KECHROUD Nassima pour nous avoir aidées et orientées le long de la période que nous avons mises pour la réalisation de ce travail

Nous adressons nos respectueux remerciements à Madame HAMAIDI Nassima pour avoir accepté de présider le jury de notre soutenance.

Nous remercions également Madame BELAID Taous d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Enfin, On adresse nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.



- Samira & Zahia -

Dédicace

Je dédie ce modeste travail...

*A mon père et ma mère en témoignage de leurs
précieux sacrifices.*

A mon frère le plus cher au monde Amar

A mes sœurs

Samíha, Souad, Cherífa

A mon mari Habib

A ma belle famille

A mes amies

Sília, Sara, Díhía, Awícha et Radía

A ma binôme Zahía Hamadou

A tous ceux qui me sont chers....

 *Samíra -*

Dédicace

Je dédie ce modeste Travail.

*A mon père et ma mère En témoignage de leurs
Précieus sacrifices.*

A mes chères sœurs

Lahna, Meriam, Thilelli, Nouara.

A mes deux frères

Weghlis et Adem

A mes deux petites nièces adorés

Hadjer et Thanina

A mon neveu adoré : Samad

A mes amies et connaissances

A ma chère binome

Samira



Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Nomenclature

Liste des figures

Introduction Générale..... 1

Chapitre I

Généralités sur les systèmes airlift et les techniques d'injection

I.1. Définition et principe de fonctionnement d'un système airlift	4
I.2. Types de systèmes airlifts	4
I.2.1. Colonnes à bulles	4
I.2.2. Réacteurs airlifts.....	5
I.2.3. Système de pompage airlift	6
I.3. Domaines d'applications des systèmes airlift.....	6
I.4. Les méthodes d'injections rencontrées dans la littérature.....	8
I.4.1. Mode d'injection axiale.....	8
I.4.2. La méthode d'injection radiale.....	9
I.4.3. La méthode d'injection double.....	9
I.4.4. La méthode d'injection à orifice unique.....	10
I.4.5. Autres méthodes.....	10
I.5. Régimes d'écoulement diphasique	11
I.5.1. Régime à bulle (bubble flow).....	11
I.5.2. Régime à poches (slug flow).....	12
I.5.3. Régime turbulent baratté (churn flow)	12
I.5.4. Régime annulaire (annular flow).....	12
I.5.5. Autres classifications de régimes	12
I.6. Les travaux relatifs aux méthodes d'injections	13

Chapitre II

Dispositif expérimental et technique de mesures

Introduction	21
II.1. Présentation de l'installation.....	21
II.2. Eléments constituant l'installation	21
II.2.1. Colonne (riser)	21
II.2.2. Section de transit.....	21

Sommaire

II.2.3. Séparateur de phases	23
II.2.4. Bac coulissant	24
II.2.5. Alimentation en phase liquide.....	24
II.2.6. Alimentation en phase gazeuse	25
II.2.7. Compresseur	25
II.2.8. Débitmètres à air et vannes	26
II.3. Modes d'injection et disperseurs utilisés	26
II.3.1. Disperseur de l'injection simple.....	26
II.3.2. Disperseur de la double injection.....	27
II.3.3. Mode d'injection en série.....	28
II.3.4. Mode d'injection en parallèle	28
II.4. Fonctionnement de l'installation.....	29
II.5. Techniques de mesures	29
II.5.1. Mesure du débit minimum d'injection.....	30
II.5.2. Mesure du débit de la phase liquide.....	30
II.5.3. Mesure du taux de vide	30
II.5.4. Caractérisation des régimes	31

Chapitre III

Résultats et discussions

Introduction	33
III.1. Caractérisation des régimes	33
III.2. Débit de la phase liquide.....	34
III.2.1. Effet de l'injection double	35
III.2.2. La confrontation avec Mahrous (2014)	37
III.3. Débit minimum d'injection.....	38
III.4. Le rendement du système	39
III.5. Le rapport de glissement.....	43
III.6. Taux de vide global	46
Conclusion générale.....	49
Références bibliographiques.....	51

Nomenclature

Nomenclature

Lettres latines

g : Gravité.....	(m/s ²)
H : Partie émergée de la colonne.....	(m)
Hl : Hauteur de la phase liquide.....	(m)
Hm : Hauteur du mélange diphasique dans la colonne ou la hauteur mouillée.....	(m)
Hp : Hauteur de plongée	(m)
L : Longueur de la colonne	(m)
Pa : Pression atmosphérique	(Pa)
Pinj : Pression d'injection d'air	(Pa)
Qg : Débit volumique de la phase gazeuse	(m ³ /s)
Ql : Débit volumique de la phase liquide.....	(m ³ /s)
S : Rapport de glissement.....	(-)
Ug : Vitesse superficielle de la phase gazeuse	(m/s)
Ul : Vitesse superficielle de la phase liquide	(m/s)

Lettres grecques

ρ_l : Masse volumique de la phase liquide	(Kg/m ³)
η : Rendement d'un système de pompage airlift	(-)
ε : Taux de vide global	(-)

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma d'une colonne à bulles.....	5
Figure I.2 : Schéma simplifié des types de réacteur airlift (CHISHI ;1989).....	5
Figure I.3 : Schéma de quelques configurations de systèmes de pompage airlift (a) Système ordinaire ; (b) : Système à élargissement brusque ; (c) : Système à élargissement progressif ; (d) : Système avec déformation en forme S	7
Figure I.4 : Schéma d'un disperseur à injection axiale (Yousfi et Saidani, 2018).....	9
Figure I.5 : Schéma d'un disperseur à injection radial (Yousfi et Saidani, 2018).	9
Figure I.6 : schéma d'un disperseur avec injection radiale et axiale (Yousfi et Saidani, 2018).	10
Figure I.7 : schéma d'un disperseur à orifice unique (Yousfi et Saidani 2018).....	10
Figure I.8 : Régime d'un écoulement diphasique vertical. (a) Régime à bulles, (b) Régime à poches, (c) Régime turbulent baratté, (d) Régime annulaire.....	11
Figure I.9 : Régime d'écoulement dans un réacteur airlift (Vial et al., 2005).....	13
Figure I.10 : Schéma des disperseurs utilisés par Parker (1980).....	14
Figure I.11 : Schéma du disperseur utilisé par Ahmed et Badr (2012).....	15
Figure I.12 : Modèle d'injection de Mahrous (2014)	16
Figure I.13 : Dispositif de disperseur utilisé Ahmed et al.,(2016)	17
Figure I.14 : Schéma du disperseur utilisé par Taleb et Al Jarrah (2017).....	18
Figure I. 15 : schéma des modes d'injection utilisés par kassab et al.,(2022).....	19
Figure II.1 : Schéma de l'installation expérimentale	22
Figure II.2 : Section de transit.....	23
Figure II.3 : Séparateur de phases	23
Figure II.4 . Bac coulissant.....	24
Figure II.5 : Système alimentation de la phase liquide	25
Figure II.6 : Compresseur utilisé.....	25
Figure II.7 : Les débitmètres à air et les vannes utilisés.....	26
Figure II.8 : Disperseur de l'injection simple.....	27
Figure II.9 : Disperseur du milieu.....	27
Figure II.10 : Disperseur de la double injection monté au milieu de la colonne.....	27
Figure II.11 : Schéma du mode d'injection en série	28
Figure II.12 : Schéma du mode d'injection en parallèle.....	28
Figure II.13 : Bac gradué pour la mesure du débit.....	30

Liste des figures

Figure III.1 : Photographies des régimes d'écoulement observés.....	34
Figure III.2 : Evolution de la phase liquide en fonction de la phase gazeuse dans le cas de la simple injection.....	35
Figure III.3 : Evolution de la phase liquide en fonction de la phase gazeuse dans le cas de la double injection	35
Figure III.4 : Evolution de la phase liquide en fonction de la phase gazeuse pour la double injection dans le cas de $H_p=0,5$	36
Figure III.5 : Evolution de la phase liquide en fonction de la phase gazeuse pour la double injection dans le cas de $H_p=0,6$	37
Figure III.6 : Evolution de la phase liquide en fonction de la phase gazeuse pour la double injection dans le cas de $H_p=0,7$	37
Figure III.7 : Evolution du débit minimum d'injection pour les deux modes d'injection	38
Figure III.8 : Evolution du rendement du système en fonction du débit d'air dans le cas d'une injection simple.....	40
Figure III.9 : Confrontation du rendement avec le débit de la phase liquide pour le mode simple injection avec $H_p=0,6$	40
Figure III.10 : Evolution du rendement du système en fonction du débit d'air dans le cas d'une injection double	41
Figure III.11 : Confrontation du rendement avec le débit de la phase liquide pour le mode double injection avec $H_p=0,5$	41
Figure III.12 : Comparaison du rendement entre les deux modes d'injection dans le cas	42
Figure III.13 : Comparaison du rendement entre deux modes d'injection dans le cas de $H_p=0,6$	42
Figure III.14 : Comparaison du rendement entre les deux modes d'injection dans le cas de $H_p=0,7$	42
Figure III.15 : Évolution du rapport de glissement pour le mode d'injection simple avec les trois hauteurs de plongée	44
Figure III.16 : Evolution du rapport de glissement pour le mode d'injection simple avec les trois hauteurs de plongée	44
Figure III.17 : Confrontation des rapports de glissement des deux modes pour $H_p=0,5$..	45
Figure III.18 : Confrontation des rapports de glissement des deux modes pour $H_p=0,6$..	45

Liste des figures

Figure III.19 : Confrontation du rendement et du rapport de glissement pour le Mode d'injection simple et $H_p=0,7$	45
Figure III.20 : Confrontation du rendement et du rapport de glissement pour le Mode d'injection double et $H_p=0,7$	46
Figure III.21 : Effet de la hauteur de plongée sur le taux de vide global dans le cas d'une injection simple.....	47
Figure III.22 : Effet de la hauteur de plongée sur le taux de vide global dans le cas d'une injection double	47
Figure III.23 : Confrontation du taux de vide entre les deux modes dans le cas de la plongée $H_p=0,5$	47
Figure III. 24 : Confrontation du taux de vide global global entre les eux modes dans le cas de la hauteur de hauteur de plongée $H_p=0,6$	47
Figure III.25 : Confrontation du taux de vide global entre les deux modes dans le cas de la hauteur de plongée $H_p=0,7$	48

Introducción General

Introduction Générale

Les systèmes airlifts ne cessent de gagner de plus en plus du terrain en termes d'applications. Le système airlift utilisé pour la fonction du pompage est d'une grande importance dans divers domaines, allant de la récupération du pétrole jusqu'aux applications nucléaires en passant par l'aquaculture, l'archéologie marine, le traitement des eaux, application géothermique et encore d'autres.

Toute fois, la conception ou la configuration de tels dispositifs n'est jamais fixe. Au contraire, parmi les avantages dont ils disposent, c'est cette souplesse qui leur permet de s'adapter à une application donnée pour atteindre un objectif précis.

Le souci récurrent et principal lors de la conception d'un système de pompage de type airlift est le rendement. De tels systèmes, malgré les nombreux avantages qu'ils offrent, ils sont toujours caractérisés par un rendement faible. De ce fait, tous les travaux de la littérature sont orientés dans le sens d'optimiser le fonctionnement et d'augmenter ce rendement. Souvent, le chemin qui mène vers ces objectifs repose sur l'étude et l'analyse des paramètres opératoires tels que le débit de la phase gazeuse, la pression d'injection ou les paramètres géométriques comme le diamètre, la hauteur de la colonne, la hauteur de plongée ou les techniques d'injection.

Les techniques d'injection ont fait l'objet de diverses études ces dernières décennies. Beaucoup d'aspects sont abordés expérimentalement (Parker(1980), Khalil et al.,(1999), Kassab et al., (2010) Ahmed et al., (2012 et 2016), Yousfi et Soualah (2018)). Néanmoins, à l'exception du travail théorique de Mahrous (2014) aucune trace d'un travail expérimental ou numérique n'a été effectué en ce qui concerne la technique d'injection multi-étage.

C'est pour cette raison que nous nous proposons dans ce présent travail d'aborder expérimentalement d'une façon originale cette technique.

Pour cela, nous avons envisagé dans ce qui va suivre, de concevoir et d'adapter notre système à une technique d'injection double-étage. Les détails de notre étude seront exposés dans la suite de ce mémoire.

Le présent mémoire est donc élaboré en adoptant le plan suivant :

Le premier chapitre comporte les notions fondamentales et les généralités concernant de pompage de type airlifts et les techniques d'injection.

Introduction Générale

Dans le second chapitre, nous avons présenté le dispositif expérimental ainsi que les techniques de mesure utilisées.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats et leurs discussions.

I. Chapitre I

Généralités sur les systèmes airlift et les techniques d'injection

I.1. Définition et principe de fonctionnement d'un système airlift

Les systèmes airlifts sont des systèmes qui soulèvent des liquides et/ou des mélanges liquide-solide à travers des colonnes verticales partiellement ou entièrement immergées dans le liquide en injectant de l'air comprimé au bas de la colonne. L'injection d'air comprimé produit un mélange gaz-liquide plus léger que la phase liquide du départ (liquide ou liquide-solide). Ceci conduit au transport du mélange vers le haut en raison de l'effet de flottaison et du gradient de pression créé entre le haut et le bas de la colonne. Ainsi, il est possible de récupérer la phase liquide transportée comme c'est le cas des applications de pompage, ou la faire circuler comme c'est le cas des réacteurs utilisés pour divers procédés biologiques ou chimiques) (Kassab et al., 2009, Hanafizadeh et al., (2011)).

I.2. Types de systèmes airlifts

Concernant les systèmes airlifts, selon la configuration géométrique, on distingue trois types principaux : les colonnes à bulles, les systèmes destinés au pompage et les systèmes destinés aux procédés chimiques ou biologiques appelés *réacteurs airlift*.

I.2.1. Colonnes à bulles

Une colonne à bulles est un dispositif constitué d'un tube vertical rempli de liquide et à sa base de l'air comprimé est introduite à travers un système de distribution de gaz qui assure la dispersion de bulles d'air dans la phase liquide. Ce dernier est généralement stagnant où se déplaçant à une vitesse assez faible. Au cours du procédé, le gaz peut être évacué ou réintroduit selon la tâche envisagée (Barrut, 2011 ; Kantarci et al., 2005). Les colonnes à bulles ont des applications dans divers domaines tels que le génie chimique (pour réaliser des réactions chimiques) ou le domaine biologique en tant que siège de bioprocédés comme la fermentation, l'aération ou la culture de micro-organismes. Elles sont également utilisées dans le secteur pétrochimique et l'industrie métallurgique (Hills, 1976 ; Akita et al., 1988 ; Chisti, 1989 ; Vial et al., 2000 ; Kantarci et al., 2005). (Voir la figure I.1).

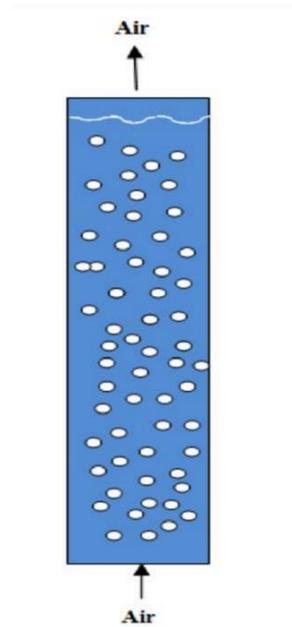


Figure I.1 : Schéma d'une colonne à bulles

I.2.2. Réacteurs airlifts

Un réacteur airlift, appelé aussi *gazosiphone* ou *réacteur pneumatique* n'est autre qu'une colonne à bulles modifiée. En comparaison avec la colonne à bulles, le réacteur airlift est constitué de deux tubes séparés, appelés respectivement le tube montant (riser) et le tube descendant (downcomer) (Vial et al., 2000-2005 ; Bennajah, 2007 ; Merchuk et Gluz, 1999). (Voir la figure I.2).

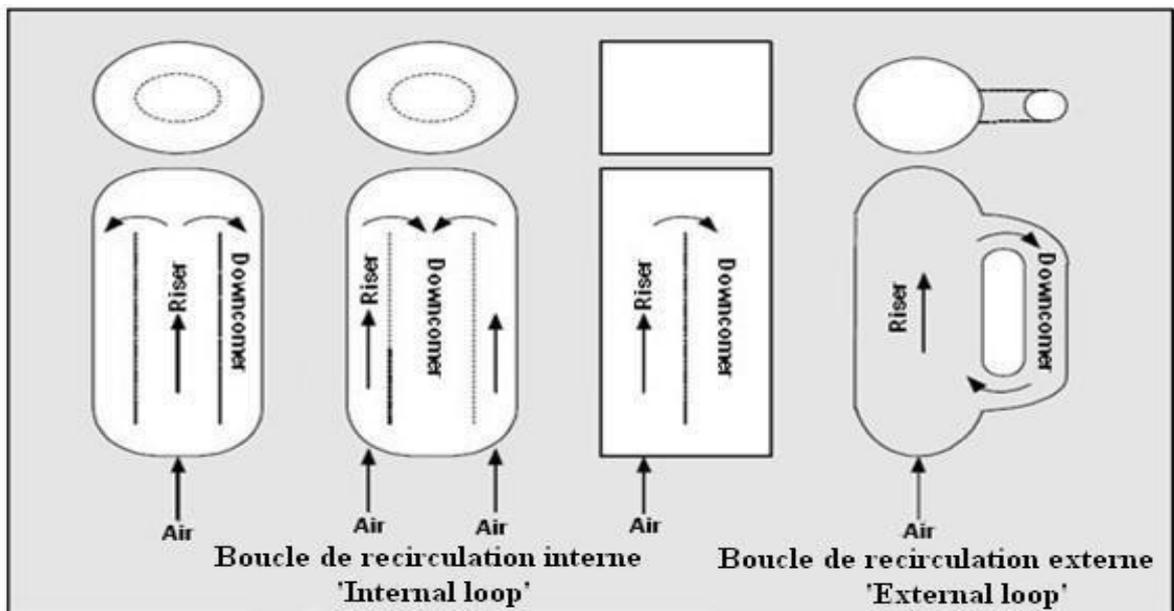


Figure I.2 : Schéma simplifié des types de réacteur airlift (CHISHI ;1989)

I.2.3. Système de pompage airlift

Dans le cas des systèmes airlift destinés à la fonction du pompage, la phase liquide (ou liquide-solide) est récupérée à la sortie du système. Pour ce type de système, on peut trouver diverses configurations basées sur la géométrie de la colonne telle que les systèmes à élargissements brusques ou système conique, voire dans certains cas des colonnes en forme de S. (Khalil et al., 1999; Kassab et al., 2007,2009 ; Hanafizadeh et al., 2011 ; Mahrous, 2013 ; Ahmed et al., 2016 ; Hanafizadeh et Ghorban, 2012). (Voir la figure I.3).

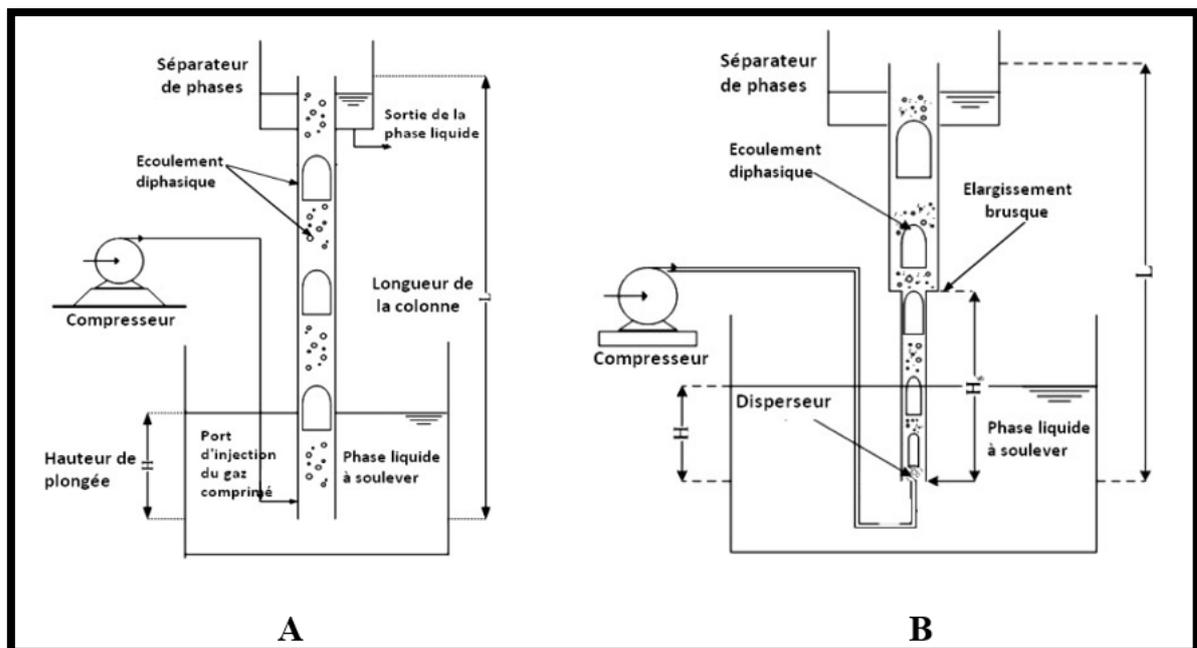
I.3. Domaines d'applications des systèmes airlift

A. Domaine pétrolier

Dans ce domaine, de tels systèmes sont connus sous le nom de la technique *gazlift*, il est utilisé pour la récupération du pétrole dans les puits en état d'épuisement ou des puits en formes géométrique irrégulière.

B. Domaine d'aquaculture

Il est utilisé comme système de pompage dans les fermes aquacoles ventilations environnementales, changement de l'eau, facilitant ainsi le transfert de substances, telles que l'oxygène ou désorption de CO₂, et dans des photobioréacteurs pour la culture des algues à haute valeurs ajoutées (García Camacho et al., 1999 ; Sanchez Miron et al., 2000, 2002; Acién Fernandez et al., 2001).



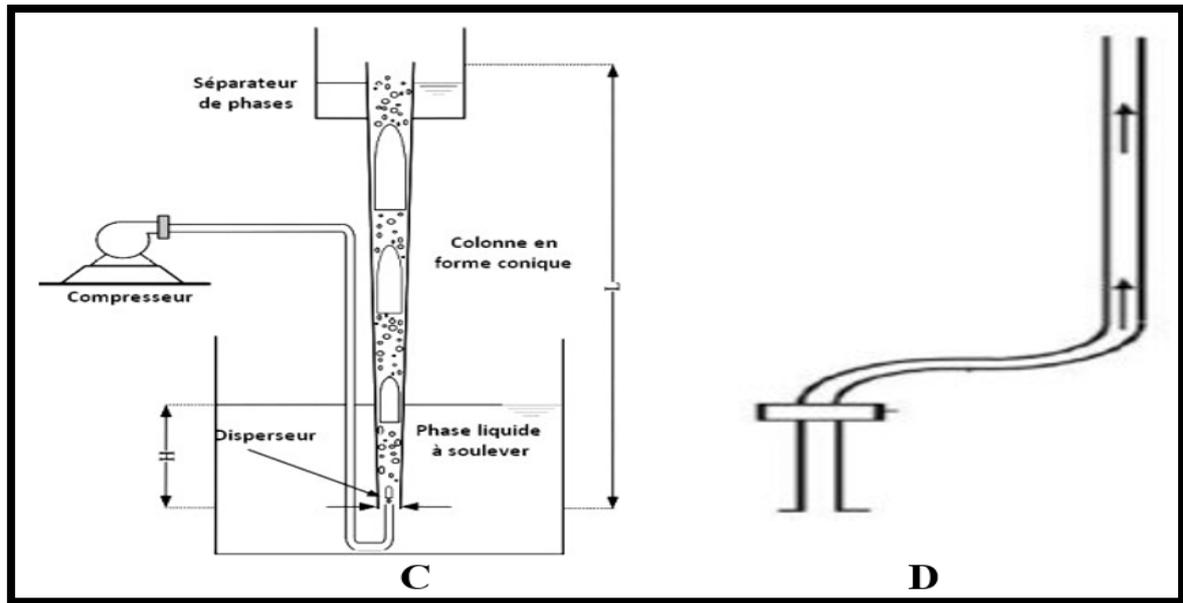


Figure I.3 : Schéma de quelques configurations de systèmes de pompage airlift (a) Système ordinaire ; (b) : Système à élargissement brusque ; (c) : Système à élargissement progressif ; (d) : Système avec déformation en forme S

C. Domaine archéologique et miniers marine

Ce type de système est utilisé pour les explorations archéologiques sous-marines ou pour soulever des suspensions de particules grossières dans les estuaires et les ports fluviaux. Il est aussi rencontrés dans l'industrie minière ou ils assurent avec facilités l'extraction de minéraux des fonds marins et la récupération du charbon à partir des puits profonds. (Kassab et al., 2007, 2009), il est utilisé comme unité de flottaison dans la décontamination de gaz comme l'absorption du monoxyde d'azote (Sada et al., 1979), etc.

D. Domaine géothermie

Des travaux récents ont montré qu'il est possible d'exploiter le système de pompage airlift pour la récupération de la chaleur souterraine pour l'alimentation en chauffage les zones froides. (Menmarson, 2015).

E. Domaine traitement des eaux

Ce type de pompage est utilisé dans certaines stations d'épuration, notamment recyclage des déchets industriels, sont aussi utilisés dans les procédés de lavage des gaz en vue de décontamination des effluents gazeux toxiques (H_2S , NO_x) (Nagase et al., 1998; Park et al., et 2005) et des composés organiques volatils (COV) (Lo et Hwang, 2004).

F. Domaine océanographique

Il sert à provoquer artificiellement la remontée et la recirculation des eaux aquatiques elle est utilisée comme unité de flottaison, dans la décontamination de gaz comme l'absorption du monoxyde d'azote (Sada et al., 1979).

G. Applications médicales

Utilisé comme méthode pour préserver par perfusion des organes en attente d'une transplantation, et des fermentations (Nakao et al., 1997; Al-Qodah et lafi, 2001), de la culture cellulaire (Ouyang et al., 2005).

I.4. Les méthodes d'injections rencontrées dans la littérature

L'ensemble des travaux de littérature a englobé toutes les méthodes d'injections qu'on peut rencontrer selon le type du disperseur utilisé. Ses derniers assurent la dispersion de l'air dans une phase liquide.

Disperseur : c'est un système d'injection qui permet de disperser le liquide à travers des orifices disposés dans une configuration donnée. La forme du disperseur peut avoir diverses formes géométriques (tube cylindriques, plaques perforées, formes hélicoïdales, ...).

Concernant les méthodes d'injections on distingue quatre modes principaux :

- Le mode radial ;
- Le mode axial ;
- Le mode mixte (radial et axial) ;
- Le mode à orifice unique ;

I.4.1. Mode d'injection axiale

Cette technique est basée sur l'injection d'air de manière verticale et parallèle à l'écoulement et cela est à travers de nombreux trous dans la section transversale de l'extrémité du disperseur. (Voir la figure I.5) :

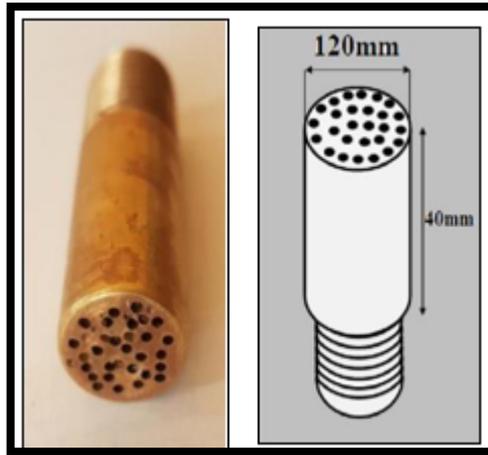


Figure I.4: Schéma d'un disperser à injection axiale (Yousfi et Saidani, 2018).

I.4.2. La méthode d'injection radiale

Pour méthode, l'air est injecté d'une façon perpendiculaire à l'écoulement principale. La phase liquide est aérée au moyen des trous situés sur la surface latérale du tube qui constitue le corps du disperser. (Voir la figure I.6).

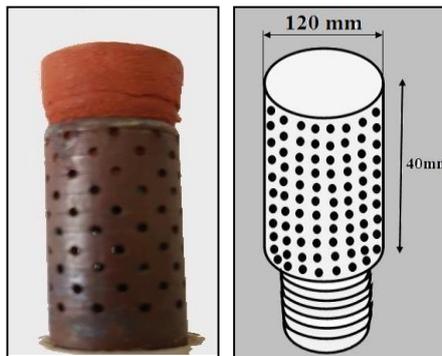


Figure I.5: Schéma d'un disperser à injection radial (Yousfi et Saidani, 2018).

I.4.3. La méthode d'injection double

La double injection consiste à introduire de l'air comprimé à la fois dans les directions radiales et axiales à travers les deux surfaces latérale et transversale du tube qui constitue le corps du disperser. (Voir la figure I.7).

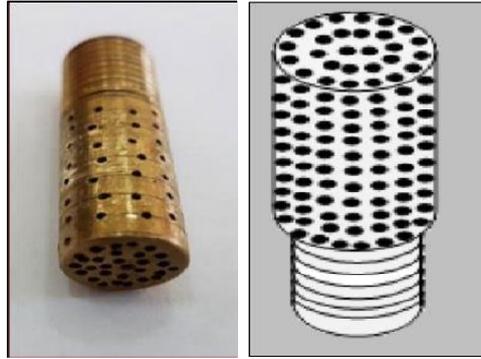


Figure I.6: schéma d'un disperseur avec injection radiale et axiale (Yousfi et Saidani, 2018).

I.4.4. La méthode d'injection à orifice unique

Dans ce cas d'injection, la phase gazeuse est introduite dans le riser à travers la section circulaire supérieure du disperseur disposant uniquement d'un seul trou de diamètre relativement grand. L'écoulement d'air est parallèle à l'écoulement principal. L'orifice est réalisé sur la surface transversale, donc c'est un mode axial avec un seul trou. (Voir la figure I.8).

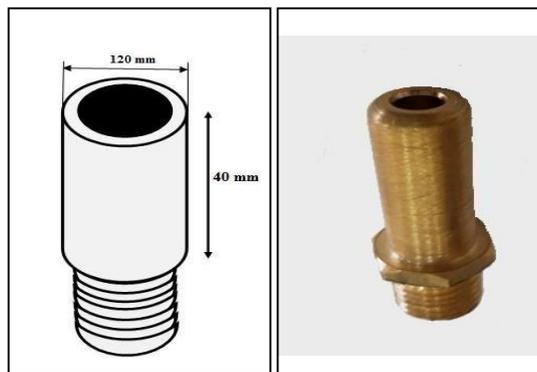


Figure I.7: schéma d'un disperseur à orifice unique (Yousfi et Saidani 2018).

I.4.5. Autres méthodes

A travers la recherche bibliographique nous avons rencontré d'autres modes d'injection qui ont fait l'objet, soit d'une étude expérimentale soit d'une étude théorique (Kassab et al., 2010, Ahmed et al- 2012,2016 ; Mahrous, 2014).

-Injection avec rotation: Dans ce cas il s'agit d'une injection radiale avec la mise en rotation du disperseur.

-Injection hélicoïdale: C'est l'injection radiale avec des trous disposés d'une façon à donner un sens d'écoulement de forme hélicoïdale

-Injection avec changement d'angle: Il s'agit d'une injection radiale avec un changement d'angle.

-Injection multi-étage : Il s'agit d'une méthode d'injection qui se fait à des niveaux différents le long de la colonne.

I.5. Régimes d'écoulement diphasique

Lors d'un écoulement diphasique gaz-liquide, l'interface entre les deux phases peut prendre plusieurs formes, cela dépend du débit de chaque phase, la pression, le sens de l'écoulement (ascendant, descendant, co-courant, contre-courant), des propriétés du fluide et de la géométrie du système. Ces régimes d'écoulement ont une forte influence sur les paramètres hydrodynamiques, les transferts de matière et de chaleur. Pour l'identification des régimes et leur caractérisation, en général on utilise : la méthode visuelle, la méthode graphique et le traitement des signaux. Les régimes les plus fréquents s'enchainent de la manière suivante : le régime à bulles (bubbly flow), le régime à poches (slug flow), le régime turbulent baratté (churnflow) et le régime annulaire (annular flow). (Voir la figure I.9).

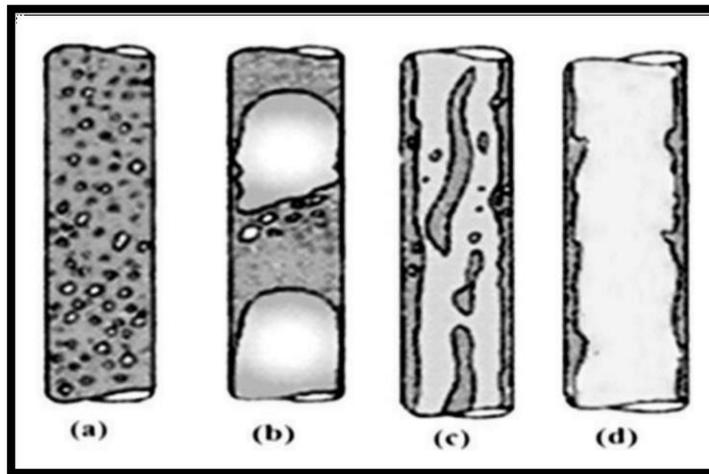


Figure I.8 : Régime d'un écoulement diphasique vertical. (a) Régime à bulles, (b) Régime à poches, (c) Régime turbulent baratté, (d) Régime annulaire

I.5.1. Régime à bulle (bubble flow)

Ce régime est caractérisé par une dispersion de petites bulles d'une façon assez dense et homogène le long de toute la colonne et s'observe à faible débit de gaz. Il est le plus fréquent en pratique lorsque le système est utilisé comme technique d'aération. Ce dernier se rencontre dans les colonnes à bulles et les réacteurs airlifts.

Le diamètre des bulles est toujours très inférieur au diamètre de la colonne (Pochet, 2012 ; Utiger, 1998)... voir la figure I.9).

I.5.2. Régime à poches (slug flow)

Ce type de régime est observé à grand débit de gaz, les bulles coalescents pour donner lieu à des poches séparées par des bouchons de liquide de sections voisines de celle de la conduite. Les poches de gaz se caractérisent par une forme de calotte sphérique en aval et une forme aplatie en amont. Ce type de régime est recommandé notamment dans la fonction de pompage (Kassab et al., 2009 ; Nokaryakov et al., 1986, Taitel et al., 1980, Clark et Dabolt, 1986 ; Mahrous, 2014). La longueur des poches varie en fonction du débit de l'air (voir la figure I.9).

I.5.3. Régime turbulent baratté (churn flow)

L'écoulement à poches peut mener à des instabilités. Dans cette situation la forme du bouchon est très irrégulière et avec une interface instable et allongée. Le liquide s'écoule dans les deux sens, vers le haut et vers le bas, ce qui fait que la structure de l'écoulement devient anarchique et désordonnée. Il se produit à l'établissement du régime à poche : l'augmentation de la vitesse du gaz au-delà d'une valeur critique provoque la destruction des poches (Brauner et Barnea, 1986 ; Arthur et al., 2012 ; Azzopardi et Wrent, 2004). (voir la figure I.9).

I.5.4. Régime annulaire (annular flow)

La phase liquide circule comme un film mince près des parois de la colonne sous forme d'un tube occupant le milieu de la colonne. Ce type de régime est déconseillé dans la fonction du pompage (Kassab et al., 2001 ; Mahrous 2013). On le rencontre en général dans les échangeurs thermiques, les générateurs de vapeur et les systèmes de réfrigération. (Voir la figure I.9).

I.5.5. Autres classifications de régimes

Dans le cas où les systèmes airlifts sont utilisés comme des réacteurs, la dénomination des régimes d'écoulement change. Les quatre régimes décrits ci-haut se réduisent à deux structures principales : le régime homogène et le régime hétérogène

-Le régime homogène

Il est caractérisé par une population uniforme de petites bulles qui montent verticalement dans la colonne, sans interagir entre elles et avec une faible dispersion axiale. Le régime homogène n'existe que dans le cas d'une distribution uniforme des bulles à la sortie du distributeur qui ne peut être obtenue que si celui-ci est efficace comme c'est le cas des multiorifices (Camarasa, 1999; Vial et al., 2001,2005). Dans un distributeur à orifice unique peu efficace, l'écoulement est toujours en régime hétérogène (Camarasa et al., 1999; Vial et al., 2000).

-Le régime hétérogène

Le régime hétérogène apparaissant aux grands débits de gaz. Dans ce cas, le régime homogène ne peut pas être maintenu et un écoulement instable apparaît. On observe la formation de bulles de grandes tailles. Si le diamètre de la colonne est petit, ces grosses bulles atteignent la taille de la colonne et on obtient le régime à poches, le turbulent baratté voire le régime annulaire. Ces trois derniers régimes sont regroupés sous une même appellation : *régime hétérogène*

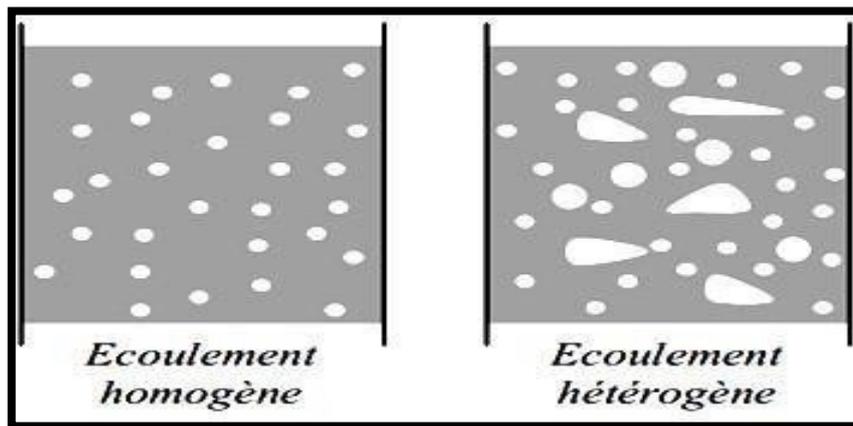


Figure I.9: Régime d'écoulement dans un réacteur airlift (Vial et al., 2005).

I.6. Les travaux relatifs aux méthodes d'injections

De nombreuses recherches ont été menées sur les techniques d'injections utilisés dans les systèmes airlifts et leur impact sur leur fonctionnement et leur performance.

Parker (1980) est considéré comme étant le premier auteur ayant rédigé un travail concernant l'impact de types d'injection sur les systèmes de pompage airlifts. L'auteur a réalisé deux dispositifs sous forme de tubes cylindriques en cuivre afin de mener une recherche expérimentale sur deux méthodes d'injections différentes tout en variant les

configurations des disperseurs à utiliser (à savoir, le diamètre et le nombre de trous). La première méthode, consistait à réaliser une injection radiale en injectant de l'air sur la surface latérale du tube. La deuxième méthode, de l'air est injecté à partir des trous réalisés à l'extrémité de la surface plate du deuxième tube réalisant ainsi une injection axiale. A l'issue de son étude, Parker a constaté que :

- La variation du nombre de trous et le type de méthode n'ont aucun effet sur le type de régime d'écoulement.
- Concernant la méthode radiale, le changement de configuration des disperseurs n'a pas d'influence sur la performance du système.
- Par contre, pour la méthode axiale pour des trous à diamètres très petits, la performance du réacteur change.
- Pour en finir, la recherche a montré que la dispersion axiale est plus performante que la radiale.

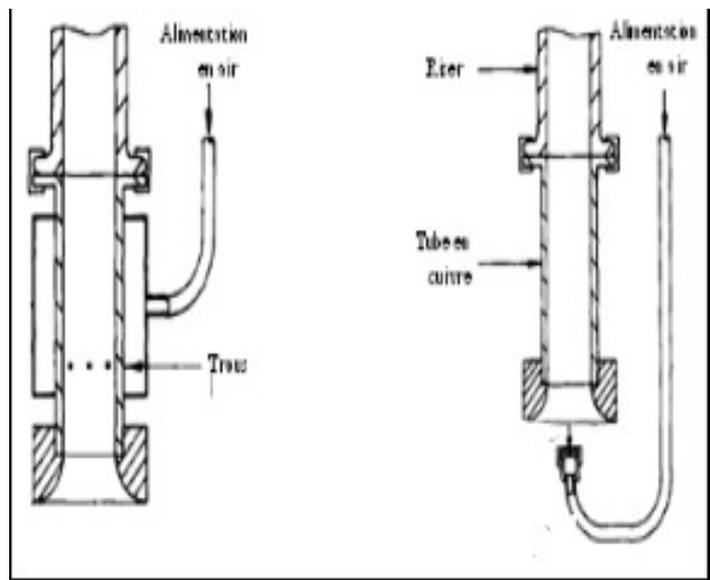


Figure I.10 : Schéma des disperseurs utilisés par Parker (1980)

Khalil et al., (1999) ont mené une étude sur l'effet du nombre de trous d'un disperseur sur la performance d'un système de pompage de type airlift, pour cela ils ont opté pour une injection de type axiale. Les auteurs ont conçu un dispositif d'injection constitué : d'une colonne de 2 m et d'un diamètre d'environ 24 mm, un disque plat perforé à son extrémité.

Khalil et al., 1999 ont fixé la surface perforée à 10mm^2 , varié aussi le nombre de trous ainsi que les diamètres des trous. A travers leur étude, les auteurs ont constaté que :

- En changeant la configuration du disperseur, la performance du système change ;
- Plus le nombre d'orifices est grand, plus on obtient un rendement meilleur ;
- La hauteurde plongée peut aussi avoir une certaine influence.

Ahmed et Badr (2012) ont construit et testé un nouveau système de pompage de type airliftutilisant à la fois les modes d'injection axiale et radiale comme illustré sur la figure (I.12).

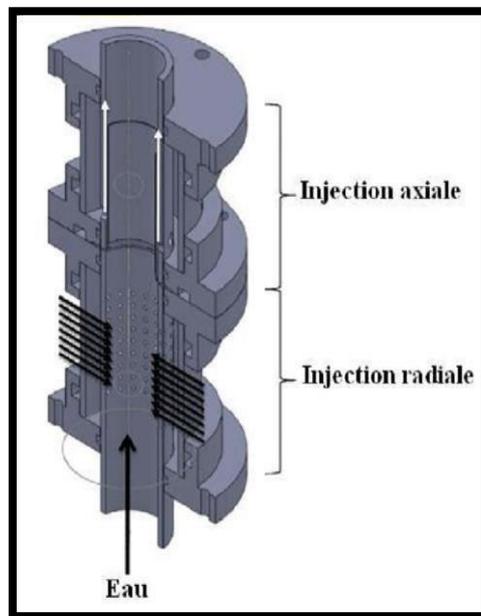


Figure I.11: Schéma du disperseur utilisé par Ahmed et Badr (2012)

Pour les trois hauteurs de plongée (0,25 ; 0,5 ; 0,75), les auteurs ont effectué des mesures sur deux méthodes d'injection à savoir axiale et radiale et les deux méthodes en même temps afin de faire une comparaison. D'après cette étude expérimentale, appuyée sur un modèle analytique, les auteurs ont conclu que l'injection mixte (radiale et axiale) rend le rendement meilleur en l'améliorant de 30% jusqu'à 90% comparé aux injections radiale et double séparément.

Mahrous (2014) a proposé une étude théorique qui a pour objet principal l'étude numérique des effets de l'injection d'air à plusieurs étages sur les performances d'un système de type airlift. L'auteur s'est basé sur les principes de traitement théorique, les différentes méthodes de calculs des pompes airlifts, ainsi que sur des modèles et des analyses théoriques

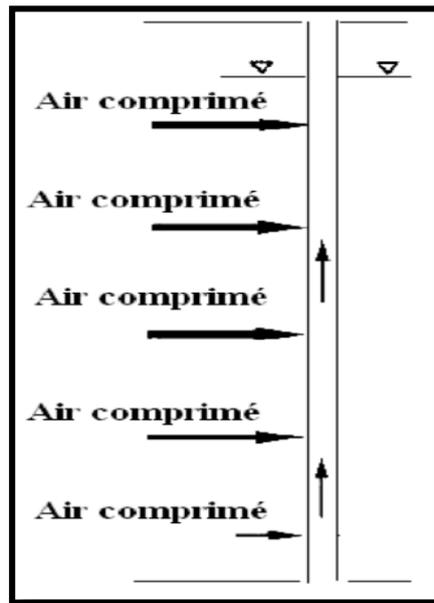


Figure I.12 : Modèle d'injection de Mahrous (2014)

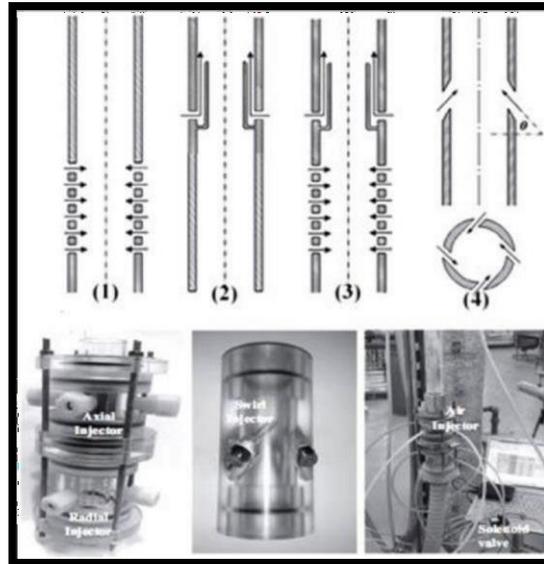
L'étude a montré que l'augmentation du nombre niveau d'injection permet d'élargir la gamme du régime à bulles et du régime à poches ce qui permet d'augmenter le rendement du système.

Les auteurs ont opté pour trois hauteurs de plongée (0,25 ; 0,5 et 0,75). Pour le besoin d'une comparaison, les mesures ont été effectuées d'une façon indépendante pour le mode axial seul, ensuite le mode radial seul et enfin les deux modes combinés. Les auteurs ont expliqué leur choix par le fait que la combinaison des deux modes serait en mesure de réduire la force frottement avec la paroi et aussi la force de cisaillement qui deviennent dominantes à de très grandes vitesses d'air.

Ahmed et Badr (2012) ont constaté à l'issue de leur étude expérimentale, appuyée par un modèle analytique, que la technique à double injection (radiale et axiale) produit une amélioration du rendement allant de 30 à 90 % en comparaison avec les modes d'injection conventionnels.

Le travail de Ahmed et Badr (2012) a été complété par une étude expérimentale effectuée par Ahmed et al., (2016) sur un système de pompage constitué d'une colonne de 2m et d'un diamètre intérieure de 31.75mm avec une hauteur de plongée fixée à 0.5.

Cette étude, en plus de l'injection radiale, axiale, et la double injection, un disperseur de type hélicoïdal est utilisé. Pour les quatre disperseurs cités, les auteurs ont opté pour deux dynamiques différentes, à savoir, l'injection dite « stable » et l'injection à « pulsations ». Les auteurs ont constaté que le disperseur hélicoïdal à l'état stable n'apporte aucune amélioration



par rapport aux méthodes d'injection conventionnelle (radiale et axiale). Cependant, le mode de double injection améliore la performance avec 24 % en comparaison avec les méthodes d'injection conventionnelles.

Figure I.13: Dispositif de disperseur utilisé Ahmed et al.,(2016)

(1) Mode axial ; (2) : Mode radial ; (3) : Double injection ; (4) : mode hélicoïdal.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec le mode d'injection axiale pulsatoire (1Hz) où les performances sont améliorées de 60 %. Ils ont, à l'issue de leur étude suggèrent d'enrichir ce travail par l'étude d'une double injection avec pulsations.

Taleb et Al-Jarrah (2017) ont abordé une étude expérimentale sur l'effet de la technique d'injection sur les performances d'un système de pompage airlift. Pour cette étude les auteurs ont utilisé trois disperseurs, et pour chaque expérience, les auteurs ont changé le nombre de trous sur la surface latérale des disperseurs qui est sous forme de

Ligne et de colonnes ainsi que son diamètre et cela tout en gardant la même surface d'injection. L'étude expérimentale a été réalisée pour cinq hauteurs de plongée variées de

0,1 jusqu'à 0,5. Taleb et Al-Jarrah (2017) ont conclu que : le disperseur aux trous de 4 mm est associé aux meilleures performances avec toutes les hauteurs de plongée.

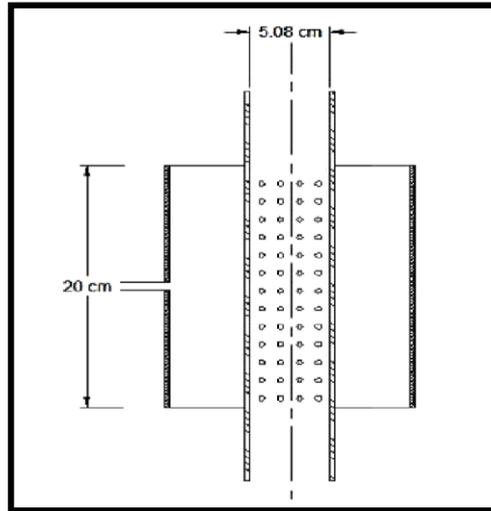


Figure I.14: Schéma du disperser utilisé par Taleb et Al Jarrah (2017)

Alasadi et Khalid (2016) en restant toujours dans le cadre des paramètres influençant la performance du système airlift, Hassan Alasadi et Khalid Habeeb(2016) ont étudié analytiquement et expérimentalement l'impact de l'angle d'injection radiale. Pour ce faire, avec un dispositif de pompage de type airlift, constitué de d'une colonne de 42 mm et de hauteur 2,2m et en optant pour trois hauteurs de plongée (0,5 ; 0,6 et 0,75) les auteurs ont utilisé des techniques différentes, à savoir le mode radial conventionnel (90°), l'injection radiale avec angle modifié (45°) et l'injection radiale avec angle modifié ($22,5^\circ$). Il résulte de cette étude que l'injection avec l'angle ($22,5^\circ$) améliore les performances du système de 11 % alors que l'injection avec (45°) l'améliore de 8 %.

Kassab et al., (2022) ont récemment effectué une étude expérimentale sur l'effet des méthodes d'injection sur les performances d'un système airlift. Dans cette étude, les types d'injections abordés sont le mode ascendant, le mode descendant et le mode latéral. Le dispositif expérimental utilisé comporte une colonne de 4 m de longueur et 24 mm de diamètre fonctionnant en boucle externe. A l'issue de leur étude, les auteurs ont conclu que le mode d'inection ascendent donne un rendement meilleur. Soit 34,7 % contre 29,7% et 28,9% obtenus avec respectivement avec le mode d'injection descendant et le mode latéral.

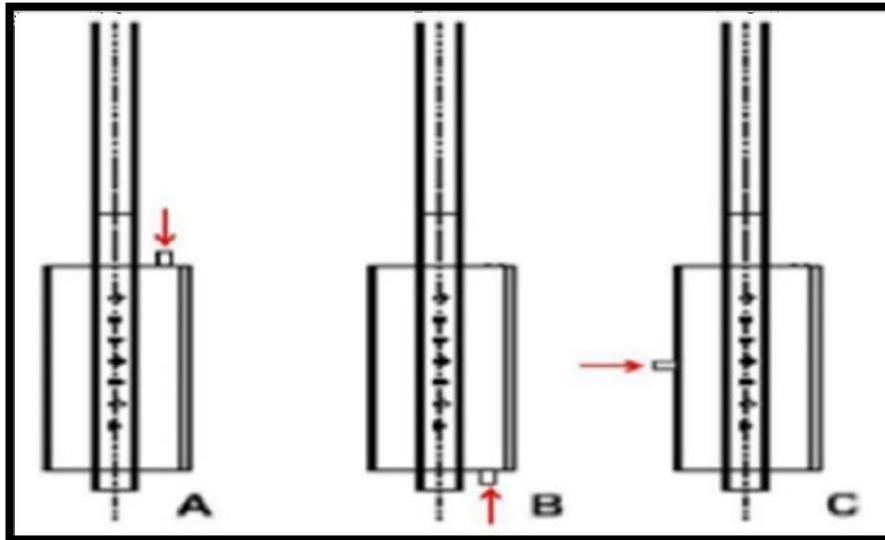


Figure I. 15 : schéma des modes d'injection utilisés par Kassab et al.,(2022)

II. Chapitre II

Dispositif expérimental et technique de mesures

Dans cette partie, nous présentons l'installation expérimentale ainsi que les différentes techniques de mesures utilisées.

III.1 Présentation de l'installation

Le présent travail est réalisé au niveau du laboratoire d'Hydrodynamique à l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa. Le dispositif expérimental en place consiste au préalable en un système de pompage de type airlift dit « ordinaire ». C'est-à-dire un système composé d'une colonne de diamètre uniforme (33 mm). Pour répondre aux objectifs fixés dans cette étude, nous avons procédé à la modification de la colonne pour en faire un système non-ordinaire, comportant un élargissement brusque. Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure (III.1).

Le dispositif expérimental utilisé a dû répondre à deux critères, à savoir la possibilité de visualiser l'écoulement et la possibilité de pouvoir varier à notre gré la hauteur de plongée. Le dispositif est monté sur une structure métallique rigide fixée par des chevilles au sol et au plafond. L'ensemble des éléments qui le constituent sont détaillés ci-après comme suit :

a. Colonne (riser)

C'est une colonne verticale d'une longueur totale de 3 m (comptée à partir du disperseur jusqu'au séparateur de phases) d'une forme cylindrique en plexiglas dont la transparence permet la visualisation de l'écoulement. Elle est composée de deux tubes de diamètres différents (33mm et 64 mm). Les deux tubes sont reliés entre eux par des pièces en téflon ; ces pièces comportent un diamètre d'entrée permettant l'insertion du tube de 33 mm et un diamètre de sortie permettant l'insertion du tube de 64 mm. C'est une jonction en téflon qui se présente sous forme d'un élargissement brusque placé au milieu de la colonne (voir figure III.2).

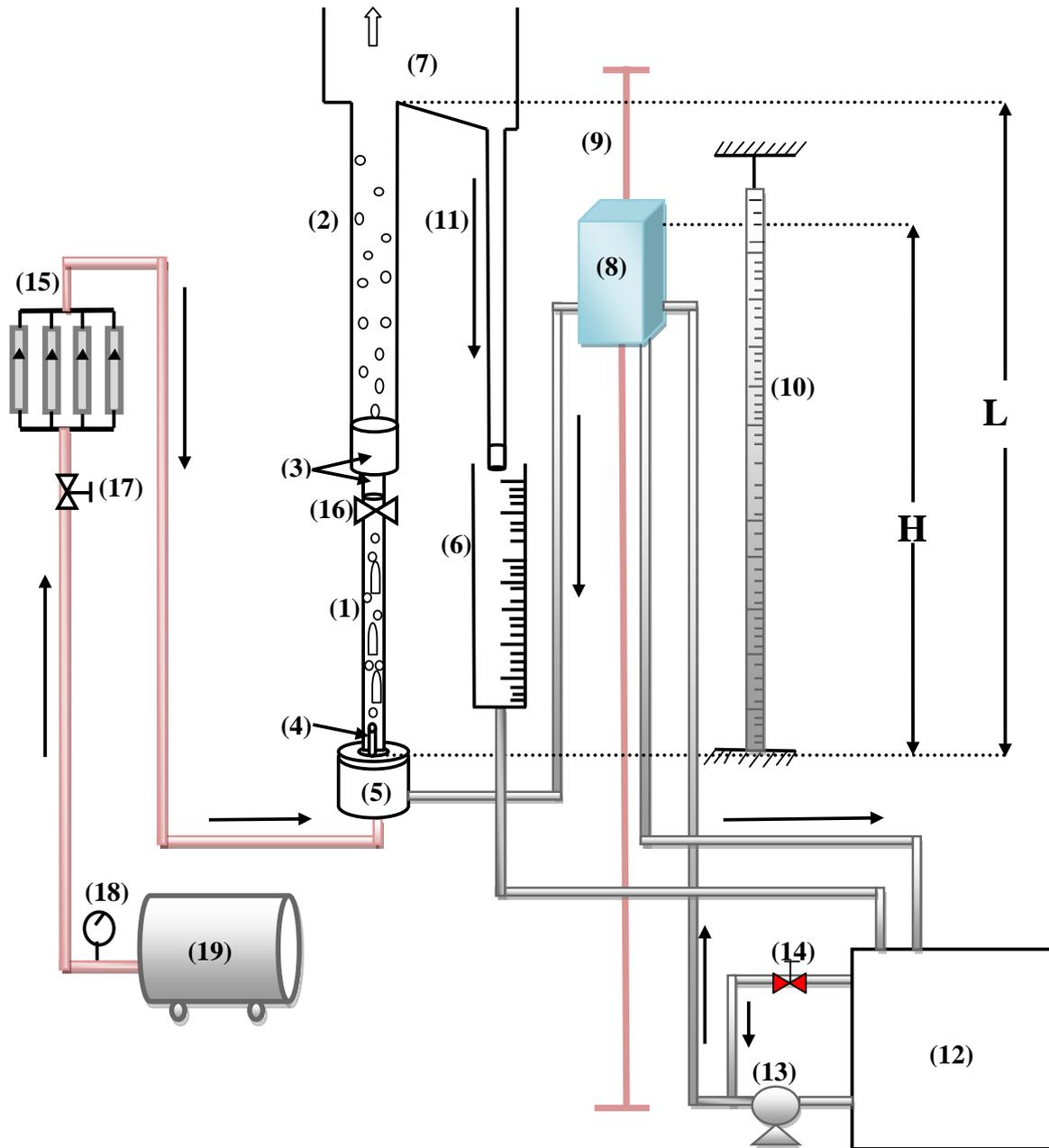


Figure III.1 : Schéma de l'installation expérimental.

(1): Tube (33mm) ; (2): Tube (64mm) ; (3): Elargissement brusque ; (4): Disperser ; (5): Section de transit ; (6): Bac gradué ; (7): Séparateur de phases ; (8): Bac coulissant ; (9): Support ; (10): Règle graduée ; (11): Downcomer ; (12): Réservoir d'eau ; (13): Pompe à eau ; (14): By pass ; (15): Débitmètres à air ; (16): Vanne du taux de vide ; (17): Vanne à air ; (18): Régulateur de pression ; (19): Compresseur.

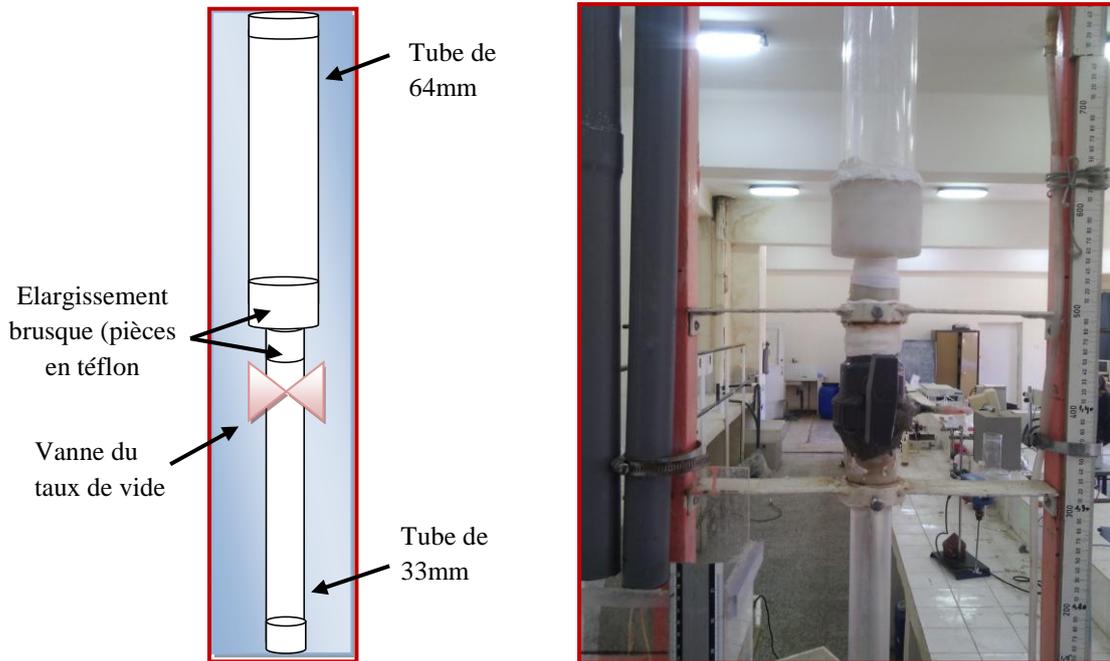


Figure III.2 : Colonne (riser) du dispositif expérimental

b. Vannes du taux de vide

La mesure du taux de vide global par la technique de vanne à fermeture rapide consiste à fermer simultanément et instantanément la vanne d'alimentation en air (17) et la vanne installée au milieu de la colonne (16). Les deux vannes se ferment à demi-tour (voir figure III.1 et Figure III.3).



Figure III.3: Vannes du taux de vide

(a): Vanne coupant l'écoulement diphasique ; (b): Vanne coupant l'alimentation en air

c. Section de transit

C'est un dispositif cylindrique en téflon de diamètre extérieur 12 mm et un diamètre intérieur 10 mm installé sur le support de la structure métallique sur laquelle la colonne est montée (figure III.5). C'est une pièce qui sert de transit pour la phase liquide lors de remplissage de la colonne. Il se compose 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 la base, sert à alimenter la colonne en air provenant du compresseur à travers le disperseur. Une sortie est conçue pour la vidange de la colonne et son nettoyage.

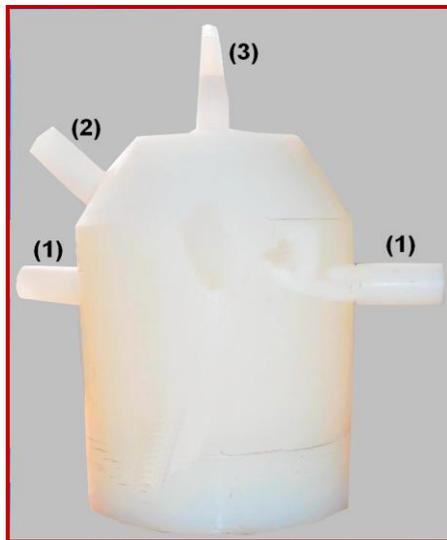


Figure III.4 : Section de transit.

(1) : Alimentation en phase liquide ; (2) : Vidange ; (3) : Alimentation en air

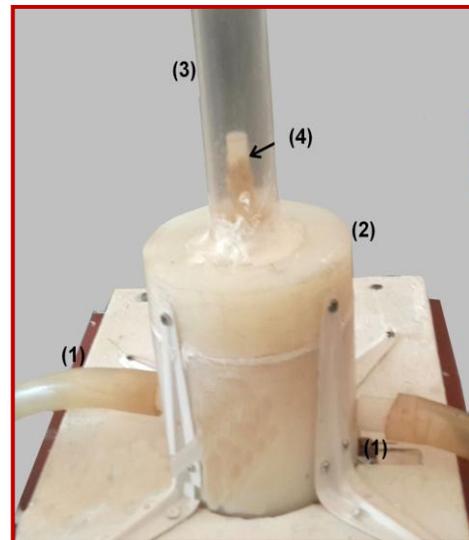


Figure III.5 : Emplacement de la section de transit.

(1): Alimentation en phase liquide ; (2) : Section de transit ; (3) : Colonne ; (4) : Disperseur

d. Disperseur

C'est un tube cylindrique en téflon de 10 mm de diamètre et 22 cm de longueur, placé au fond de la section de transit et relié au compresseur par un tuyau à gaz. L'extrémité du tube est fermée et sur sa surface latérale on a réalisé 54 trous de 1 mm de diamètre moyen. Le même disperseur a été utilisé par Saidi et Yahiaoui (2016) dont les résultats seront utilisés pour la comparaison avec la présente étude (figure III.6).



Figure III.6: Disperseur utilisé dans la présente étude.

e. Séparateur de phases

C'est un bac parallélépipédique transparent, fabriqué en plexiglas, disposé à la sortie de la colonne où les deux phases se séparent avec l'évacuation de l'air vers l'extérieur. Il est doté d'un fond incliné pour éviter l'entraînement du liquide vers l'extérieur et pour faciliter le drainage du liquide à travers un tube (downcomer) qui l'achemine au bac conçu pour la mesure du débit de la phase liquide (Figure III.7).



Figure III.7: Séparateur de phases

f. Downcomer

C'est le tube lié au séparateur de phases qui permet de récupérer la phase liquide (11). Le sens de l'écoulement dans cet élément est vers le bas.

g. Bac coulissant

C'est un bac de forme parallélépipédique, fabriqué en zinc et utilisé pour varier la hauteur de plongée. Le bac est fixé sur une tige métallique verticale sur la structure d'une façon parallèle à une règle graduée (10). La variation de la hauteur de plongée se fait par le glissement du bac à la position choisie. La colonne se remplit au même niveau que cette position. Le bac dispose d'une entrée pour son alimentation en phase liquide et deux sorties pour alimenter la section de transit et la colonne. Le niveau du liquide dans la colonne est contrôlé et ajusté par un indicateur de niveau qui accompagne le bac coulissant. Pour immobiliser le bac un système de fixation est attaché à la tige métallique (voir figure III.8)

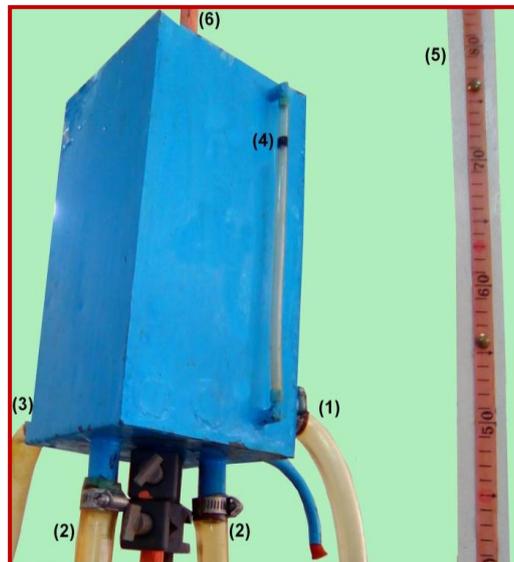


Figure III.8 : Bac coulissant

(1) : Alimentation de bac coulissant ; (2) : Alimentation de la colonne ; (3) : Evacuation de l'excès du liquide ; (4) : Indicateur de niveau ; (5) : Règle graduée ; (6) : Tige servant comme support.

h. Alimentation en phase liquide

Une pompe aspire de l'eau à partir d'un réservoir. L'eau est refoulée à travers des conduites jusqu'au bac coulissant et l'envoie vers la section de transit (5). A la sortie de la pompe un by pass (14) est installé pour éviter à un éventuel excès de débit d'alimentation. Au niveau du bac coulissant, une sortie est prévue pour le renvoi de l'eau au réservoir sous forme de trop-plein. L'eau circule en boucle, traversant le riser

jusqu'au séparateur de phases et le downcomer pour finir dans le réservoir du départ de sorte à ce qu'elle forme un circuit fermé.

i. Alimentation en air

Elle se fait par le biais d'un compresseur à air de marque Iuowei, ayant une capacité de 100 litres et une pression maximale de 8 bars. Le compresseur est muni d'un manomètre permettant de manipuler facilement la pression opératoire. Durant nos expériences la pression d'injection a été variée de 1,2 à 2,5 bars. L'air sortant du compresseur est acheminé à travers un tuyau à gaz, traversant quatre débitmètres pour alimenter le disperseur. Nous avons veillé à ce que la conduite à air soit au-dessus du séparateur de phases afin d'éviter le retour d'eau au compresseur.

j. Débitmètres à air

Quatre débitmètres à flotteurs de type Krohne sont installés en parallèle. Le débit total d'air qui alimente la colonne est contrôlé par ces quatre débitmètres en faisant la somme des valeurs affichées par chaque débitmètre.



Figure III.9 : Débitmètres à air placés en parallèle

k. Hauteur de plongée

C'est la fraction immergée de la colonne. La hauteur de plongée est donnée par le rapport (H) à la longueur totale (L). La variation de ce paramètre est réalisée par la variation de la position du bac coulissant sur la tige verticale.

III.2 Principe de fonctionnement de l'installation

La première étape consiste à allumer la pompe (13). L'eau commence à remplir la colonne jusqu'au niveau de la hauteur de plongée fixée par la hauteur du bac coulissant (8) (principe de vase communications). Dans ce travail la pompe permet seulement de remplir la colonne et d'assurer un fonctionnement en continu. Une fois la colonne est remplie jusqu' à la hauteur statique désirée, la phase liquide reste stagnante et aucun écoulement ne se produit dans la colonne puisque nous n'avons pas encore injecté de l'air. L'excès l'eau dans le bac coulissant est renvoyé à travers une conduite vers le réservoir principal. L'étape suivante est la mise en marche du compresseur. Une fois le compresseur (19) est chargé on fixe la pression d'injection d'air et on ajuste le débit avec les quatre débitmètres à gaz (15). A partir d'un certain débit d'air, on obtient un écoulement diphasique qui se développe le long de la colonne jusqu'à l'entraînement de la phase liquide. L'augmentation du débit d'air en fonction de la hauteur de plongée fait que l'écoulement diphasique atteint le séparateur de phases et que la phase liquide y est entraînée et peut être récupérée. C'est à ce niveau qu'on parle de la fonction du pompage avec la possibilité de mesurer le débit son débit. Au cours du fonctionnement, il faut s'assurer que la quantité débitée par la pompe soit suffisamment supérieure à celle recueillie dans le bac gradué (6). Pour éviter tout débordement ou débit insuffisant au niveau du bac coulissant un by-pass est placé à la sortie de la pompe permettant une meilleure alimentation en liquide.

Pendant nos expériences, nous avons mesuré le débit minimum d'air injection, le débit de la phase liquide, le taux de vide global et on a procédé à la caractérisation visuellement des régimes d'écoulement pour différentes hauteurs de plongées.

III.3 Techniques de mesures

III.3.1 Mesure du débit minimum d'injection

Le débit minimum d'injection consiste à déterminer le débit d'air qui correspond à l'arrivée des premières gouttes au bac gradué. Les débits sont mesurés pour une gamme de la hauteur de plongée variée de 0,3 jusqu'à 0,9.

III.3.2 Mesure du débit de la phase liquide

C'est la quantité d'eau entraînée à travers la colonne par unité de temps. Pour cette mesure nous avons utilisé un bac gradué (6) relié au downcomer. Le bac a une capacité assez large pour couvrir le maximum du débit d'air.

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

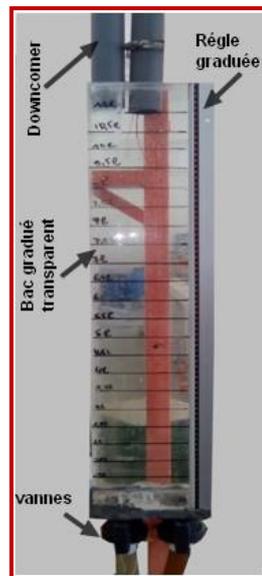


Figure III.10 : Bac gradué pour la mesure du débit

III.3.3 Mesure du taux de vide

Pour la mesure du taux de vide global, on a utilisé la technique de vanne à fermeture rapide. En raison de sa disponibilité et vue la fiabilité rapportée dans la littérature (Kawanishi et al. (1990) ; Yijun et Rezkallah, (1993) (cités par Ghajar et Bagawat, 2012). Cette technique de vanne à fermeture rapide consiste donc à fermer les deux vannes (a) et (b) (figure III.3) simultanément. A l'instant qui suit la fermeture des deux vannes, le volume retenu dans la colonne en amont est noté. La mesure du taux de vide a concerné uniquement la partie inférieure de la colonne (en amont).

Comme le taux de vide correspond à la fraction volumique de la phase gazeuse dans le mélange diphasique à l'intérieur de la colonne, on a mesuré d'abord la fraction

liquide puis on déduit la fraction du gaz dans le mélange en la calculant par la relation suivante :

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

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).

III.4 Caractérisation visuelle

Pendant nos expériences, nous avons caractérisé visuellement les régimes de l'écoulement pour chaque hauteur de plongée et chaque débit d'air. Cette observation visuelle est menée par des photographies et des vidéos.

III.5 Contraintes expérimentales

- ❖ Pour ne pas courir le risque d'endommager le dispositif et aussi en raison des problèmes de débordement, nous avons opté pour une gamme de débit d'air variée de 50 à 5000 l/h.
- ❖ En raison de non la disponibilité des fluides, il n'a été possible que d'étudier le cas de la phase liquide eau dans la présente étude.
- ❖ Pour la caractérisation des régimes il aurait fallu utiliser une caméra ultra rapide pour une qualité meilleure. Les appareils standards utilisés nous ont fourni uniquement des images et des vidéos de faible qualité insuffisante pour l'analyse.



Figure III.11: Photographie de l'installation expérimentale utilisée

III. Chapitre III

Résultats et discussions

Dans ce chapitre nous présentons l'ensemble de nos résultats et discussions obtenus avec un système de pompage airlift non-ordinaire tel qu'il a été présenté dans le chapitre II. Nous rappelons que la déformation géométrique dans notre cas consiste en un élargissement brusque réalisé au milieu de la colonne avec un rapport de diamètre avoisinant 2, soit 64/33.

Dans la suite de cette partie, il s'agira de présenter l'évolution du débit de la phase liquide, le rendement, l'analyse du taux de vide global et sa confrontation avec le modèle à écart de vitesses (*drift flux model*), l'efficacité ainsi que le rapport de glissement pour diverses hauteurs de plongée. L'ensemble de ces résultats seront discutés et confrontés à un système ordinaire approprié à la comparaison. Il s'agit des résultats de Saidi et Yahiaoui (2016) issus d'un travail expérimental réalisé avec le même dispositif de la présente étude mais avec une colonne à diamètre constant (33 mm). L'ensemble des mesures ont été effectuées dans les mêmes conditions opératoires (hauteur de plongée, disperseur, bac coulissant, pompe, vannes, bac du débit de la phase liquide, débitmètres à air... etc.).

IV.1 Caractérisation des régimes d'écoulement

En vue de caractériser les régimes de l'écoulement, au cours de l'ensemble des expériences nous avons suivi visuellement l'écoulement diphasique obtenu le long de la colonne. Nous avons également procédé à la prise de plusieurs photographies et plusieurs vidéos. Ceci nous a permis de constater que la structure de l'écoulement est affectée par la modification géométrique introduite au milieu de la colonne sous forme d'un élargissement brusque. Les structures de l'écoulement sont nettement différentes dans la partie inférieure (33 mm) et la partie supérieure de la colonne (64 mm). Dans la partie inférieure, trois régimes ont été observés : le régime à bulles, le régime à poches et le turbulent baratté avec les transitions qui leur sont associées. Il est important de dire que nous avons noté l'absence du régime à poches dans la partie supérieure (64 mm).

a. Régime à bulles

Pour cette partie de la colonne, le régime à bulles apparaît à de faibles débits d'air et ceci pour toutes les hauteurs de plongées. Mais il est à noter que ce régime apparaît d'autant plus tôt que la hauteur de plongée augmente. A titre d'exemple, aux

hauteurs de plongée $H_p = 0,4$ et $0,8$ le régime à bulles apparaît à des débits d'air égaux respectivement à 150 et 200 l/h .

Pendant la visualisation de ce régime (voir la figure IV.1), on a constaté que ce régime change d'aspect et se développe le long de la moitié de la colonne. Au fur et à mesure que les bulles s'éloignent du disperser elles entrent en collision et le phénomène de la coalescence fait que des petites poches aux contours irréguliers commencent à se former avec de petites bulles dispersées toujours dans le bouchon liquide : c'est la transition vers le régime à poches. A la traversée de la jonction de l'élargissement brusque, nous avons constaté que la structure de l'écoulement change. Quoique le régime à bulles soit toujours là, son aspect diffère de celui en amont. En effet, la dispersion des bulles devient plus dense et plus fine.

Il est à noter que la transition est observée sur une gamme du débit d'air allant de 200 jusqu'à 400 l/h pour les hauteurs de plongées $H_p = 0,4 ; 0,6$ et $0,8$.



Moitié supérieure de la colonne
en amont (**33 mm**)



Moitié inférieure de la
colonne (**64 mm**)

Figure IV.1 : Photographie de la visualisation du régime à bulles

b. Régime à poches

Dans la moitié inférieure de la colonne ($D = 33 \text{ mm}$), c'est-à-dire celle qui précède l'élargissement brusque, avec l'augmentation de débit d'air, la coalescence s'accroît et favorise la formation des poches. Les poches sont de géométrie relativement régulière. Elles se caractérisent par une forme de calotte sphérique en aval et une queue plus au moins aplatie en amont. Cette dernière est siège d'une zone tourbillonnaire, formant un sillage qui suit cette poche long de son déplacement vers le haut. Entre la paroi et la poche un film liquide s'écoule vers le bas. Nous avons remarqué que la taille des poches dépend du débit d'air. Les poches s'allongent et s'élargissent avec l'augmentation du débit d'air jusqu'à ce qu'elles occupent presque la totalité du diamètre de la colonne. Concernant l'effet de la hauteur de plongée, il nous est apparu que les dimensions des poches deviennent plus importantes avec la diminution de la hauteur de plongée. Nous avons constaté que les poches les plus longues correspondent aux hauteurs de plongée les plus faibles.

A la traversée de la jonction de l'élargissement brusque (3), la structure de l'écoulement change. Les poches formées en amont se détruisent et le régime à poches disparaît pour donner naissance un régime à bulles finement dispersées. Le phénomène de coalescence moins accentué par rapport à la partie aval, fait apparaître de grosses bulles ayant une forme de calotte sphérique en aval et plates en amont appelées dans la littérature *les chapeaux de Taylor*. Ces grosses bulles dont les dimensions sont relativement loin du diamètre de la colonne se déplacent d'une façon presque ondulatoire.

L'augmentation du débit d'air fait que les chapeaux de Taylor tentent se transformer en poches. Mais La formation des poches n'aboutit pas. Les pseudo-poches formées sont de géométries irrégulièrement différentes à celles qu'on a définies dans le cas de moitié inférieure. Le régime à poches ne s'établit pas donc. Nous avons constaté que quelque soit le débit d'air, leur dimensions restent relativement faible, ne dépassant pas 10 cm environ et sans aucune régularité. En outre, nous avons constaté que ces poches sont, sporadiques, instables et sont éloignées les unes des autres d'une façon assez considérable. L'espace entre elles est caractérisé par des bouchons liquides parsemés de bulles fines.

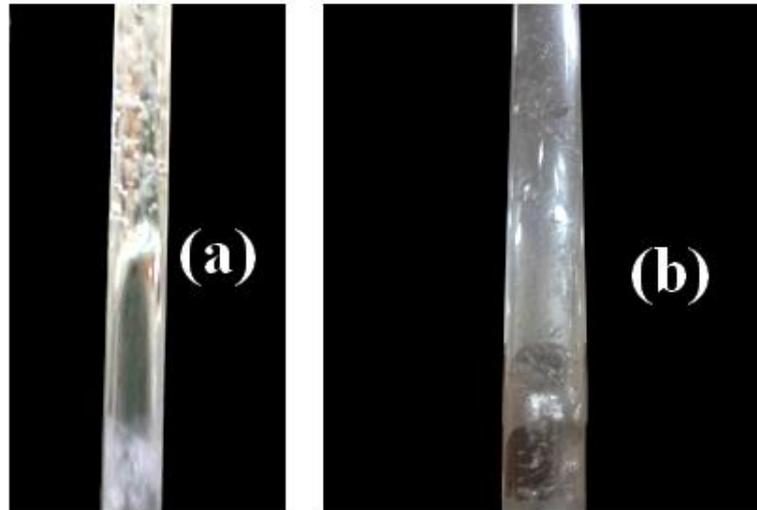


Figure IV.2 : Visualisation du régime à poches dans la moitié inférieure de la colonne

c. Régime turbulent baratté

Dans la partie inférieure de la colonne ($D = 33 \text{ mm}$) après l'établissement du régime à poches, l'augmentation du débit d'air détruit les poches et l'écoulement devient complètement désorganisé et aléatoire (figure IV.3-a). L'aspect aléatoire s'accroît au fur et à mesure que le débit d'air augmente. Dans la partie supérieure de la colonne (64 mm) le régime turbulent baratté se produit au même temps que la partie inférieure avec la même configuration et un aspect plus écumeux (figure IV.3-b).

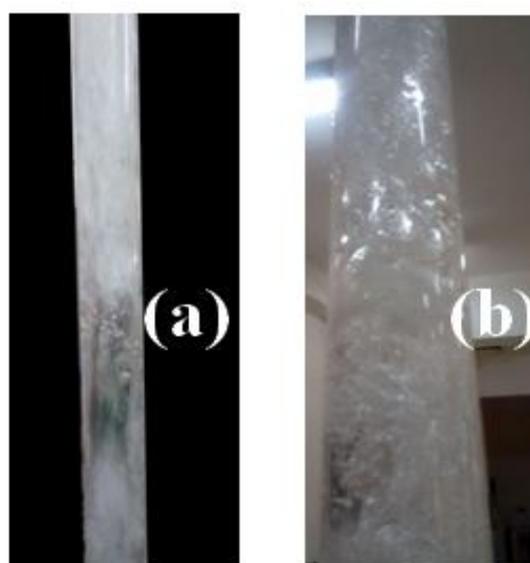


Figure IV.3 : Visualisation du régime turbulent baratté (a): En amont ; (b) : En aval

Remarque : le régime annulaire n'a pas été atteint. Il aurait fallu utiliser de très grands débits d'air ce qui risque d'endommager le dispositif.

IV.2 Débit de la phase liquide

IV.2.1 Analyse pour la hauteur de plongée $H_p = 0,7$

Sur la figure (IV.4) nous avons représenté l'évolution du débit de la phase liquide en fonction du débit d'air injecté pour la hauteur de plongée $H_p = 0,7$. 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 pompage. Dans cette phase, la phase liquide n'atteint pas le séparateur de phases. La seconde (2), correspond à la gamme des débits d'air où le pompage 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. Nous avons constaté visuellement que cette phase est associée au régime à bulles et au régime à poches. A la troisième phase, le débit de la phase liquide continue de augmenter avec l'augmentation du débit d'air mais d'une façon moins sensible avec une tendance à se stabiliser.

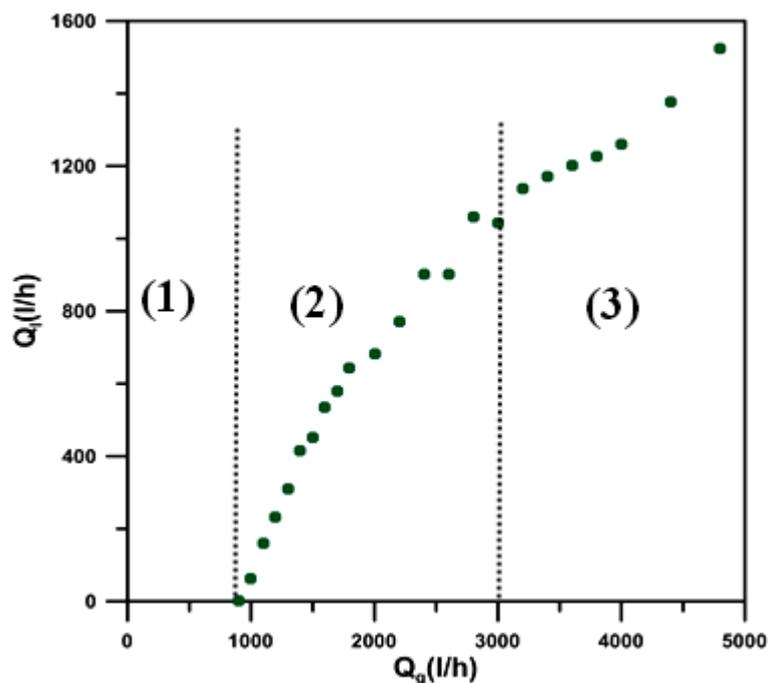


Figure IV.4: Evolution du débit de la phase liquide en fonction du débit de la phase gazeuse pour $H_p = 0,7$

IV.2.2 Reproductibilité des résultats

En vue de vérifier la reproductibilité de nos mesures expérimentales, nous avons procédé à plusieurs séries de mesures pour des hauteurs de plongées identiques. Sur la figure (IV.5), nous avons représenté les quatre séries de mesures du débit de la phase liquide obtenues avec la hauteur de plongée $H_p = 0,7$. La présente figure met globalement en clair la reproductibilité des résultats. Les valeurs sont presque identiques notamment pour la gamme des débits d'air faibles. Cependant, pour la gamme des débits d'air importants, quelques écarts insignifiants sont enregistrés. Ceci est dû au fait qu'à grands débits d'air, le bac (6) se remplit si rapidement que la mesure du débit (volume/temps) s'avère d'une certaine manière difficile par rapport au reste des mesures.

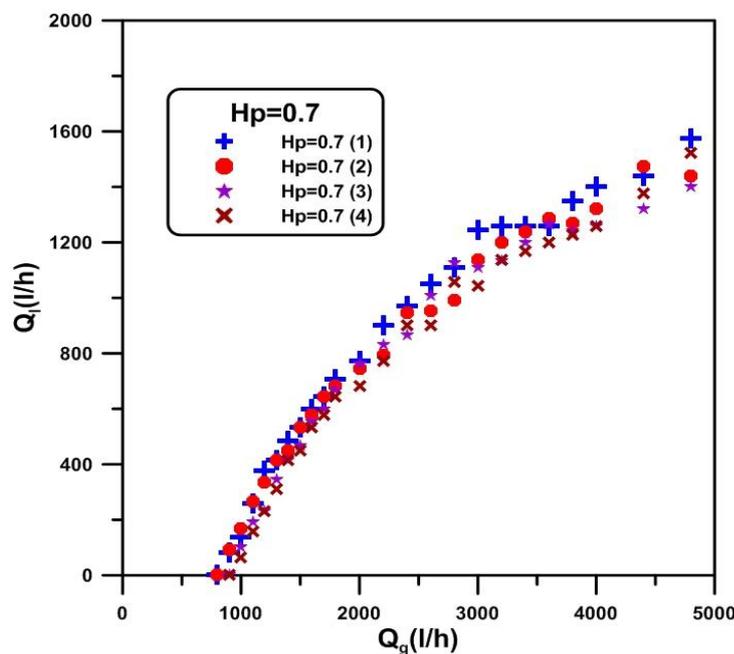


Figure IV.5: Reproductibilité des résultats expérimentaux pour $H_p = 0,7$

IV.2.3 Effet de la hauteur de plongée

Pour l'étude de l'effet de la hauteur de plongée nous avons représenté sur la figure (IV.6) l'évolution du débit de la phase liquide en fonction du débit d'air pour une gamme allant de $H_p = 0,4$ à $H_p = 0,9$. La figure montre qu'en plus de l'allure qui est similaire à celle de $H_p = 0,7$, la hauteur de plongée produit un effet positif sur le débit de la phase liquide. Plus la hauteur de plongée augmente, plus le débit de la phase liquide augmente. Le présent résultat concorde avec les travaux de la littérature (Kassab

et al., 2009 ; Hanafizadeh et al., 2011, Tighzert et al., 2013). Nous soulignons que des expériences ont été également effectuées pour des hauteurs de plongée inférieures à 0,4 cependant pour cette gamme, le pompage se produit à des débits d'air relativement très grands ($> 6000 \text{ l/h}$).

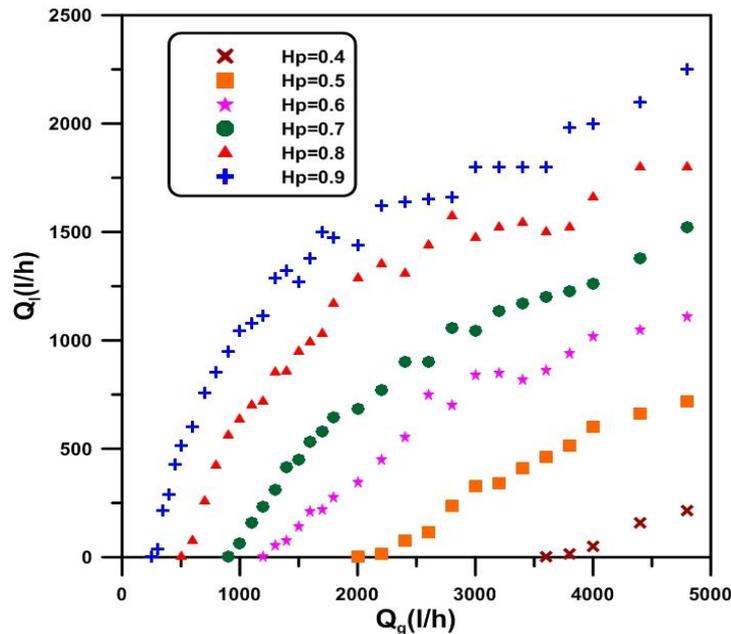


Figure IV.6 : Evolution du débit de la phase liquide en fonction du débit d'air pour diverses hauteurs de plongée

IV.2.4 Comparaison avec un système ordinaire

Il s'agit de confronter l'évolution du débit de la phase liquide obtenu dans la présente étude avec les résultats de Saidi et Yahiaoui (2016) obtenus avec un système ordinaire de diamètre uniforme (33 mm). Pour cela, pour les mêmes hauteurs de plongées (0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7) nous avons représenté sur la figure (IV.7) l'évolution de du débit de la phase liquide en fonction du débit d'air. On constate que les courbes des deux études ont des allures similaires : c'est-à-dire que le débit d'eau augmente avec l'augmentation du débit d'air d'une façon progressive avec les étapes que nous avons décrites précédemment. La différence est à noter au niveau de l'ordre d grandeur du débit. En effet, les quatre figures montrent que le débit obtenu avec le système ordinaire est nettement supérieur à celui obtenu dans la présente étude. Cette différence serait due à l'absence du régime à poches dans la partie supérieure de la colonne. A titre illustratif,

nous reproduisons dans le tableau (IV.1) quelques valeurs pour situer les ordres de grandeurs des études.

Tableau IV.1: Quelques valeurs illustratives pour la comparaison entre les deux systèmes

Q_g (l/h)	H_p	Q_l (l/h)	Résultats de Saidi et Yahiaoui Q_l (l/h)
4000	0,4	51.43	545.806
2000	0,5	0	490,909
1800	0,6	273,91	932,142
2800	0,7	1107,7	1311,111

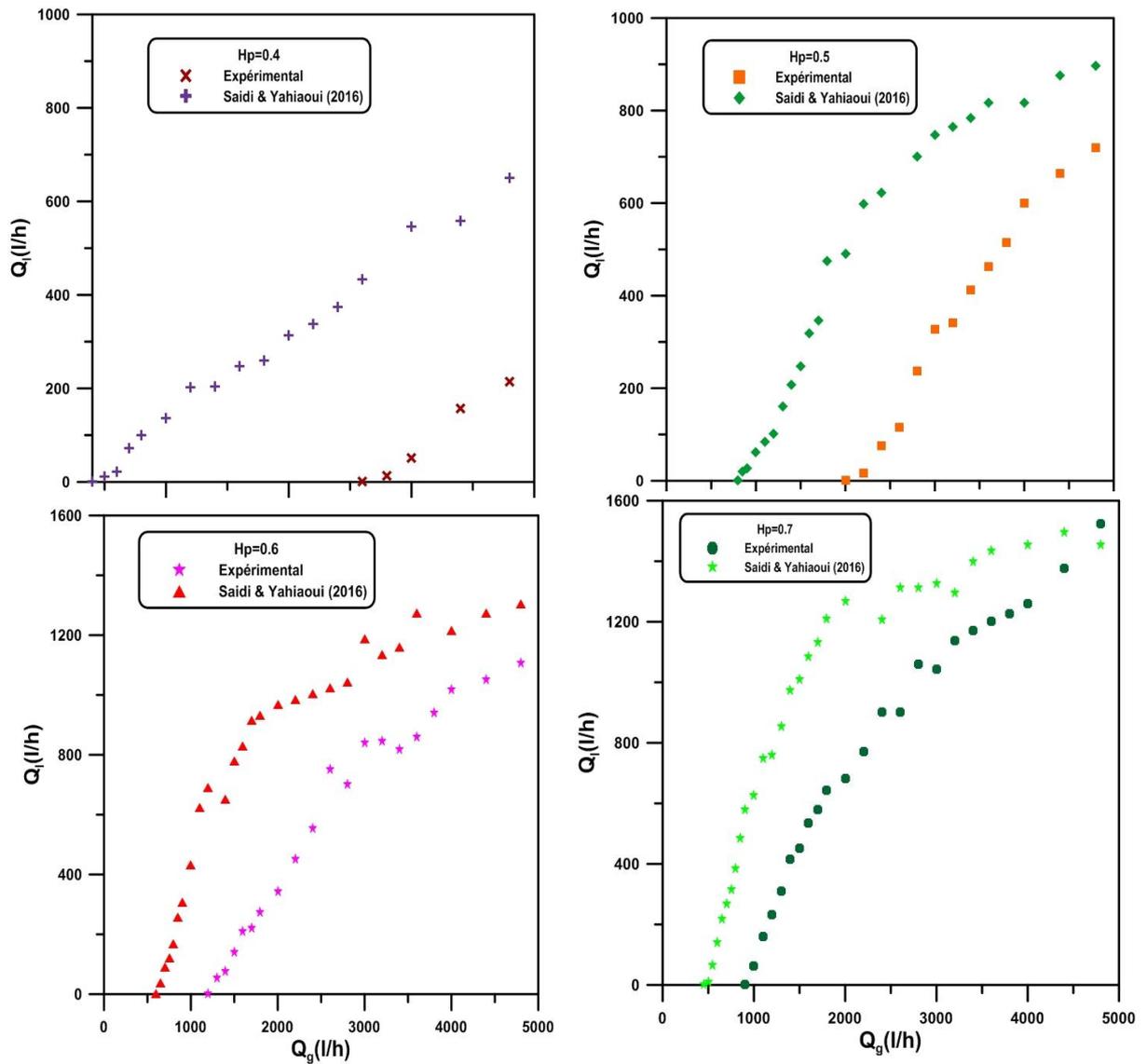


Figure IV.7: Confrontation du débit de la phase liquide de la présente étude avec celui d'un système ordinaire

IV.3 Débit minimum d'injection

IV.3.1 Débit minimum d'injection de la présente étude

Nous rappelons que le débit minimum d'injection est défini comme étant le débit du gaz qui correspond à la récupération des premières gouttes de la phase liquide passant du séparateur de phases au bac (6). Sur la figure (IV.8) nous présentons l'évolution du débit minimum d'injection en fonction de la hauteur de plongée variée de 0,4 à 0,9 avec un pas de 0,1. La présente figure montre que l'évolution du débit minimum nécessaire pour amorcer le pompage se présente sous forme de deux étapes différentes. La première s'étale de 0,4 jusqu'à 0,53. La seconde s'étale au-delà de 0,53. Concernant la première étape le débit minimum évolue d'une façon relativement sensible. Par exemple pour les hauteurs de plongée 0,3 et 0,4 la valeur du débit minimum passe respectivement de 6000 à 3800 l/h. Au cours de la deuxième étape, l'évolution présente un aspect presque linéaire avec rapprochement des valeurs qui s'accroît avec l'augmentation de H_p .

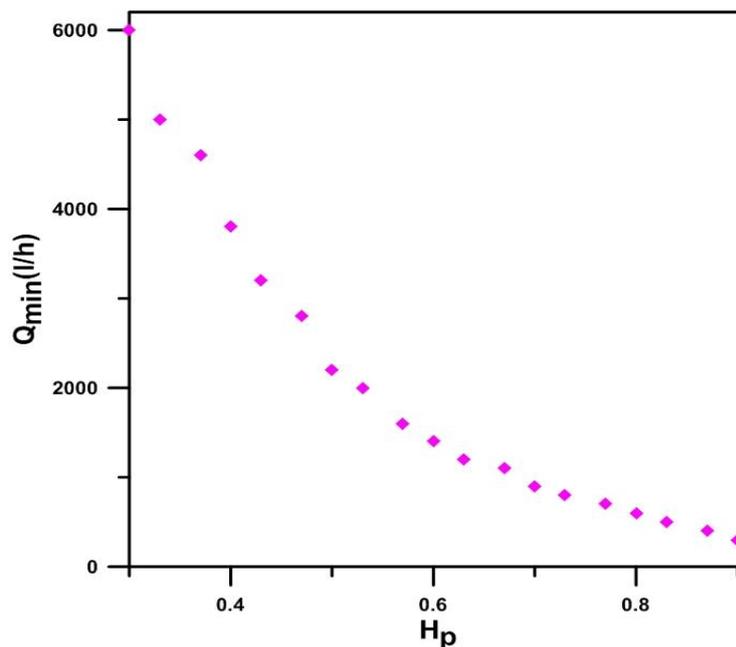


Figure IV.8: Evolution du débit minimum d'injection en fonction des hauteurs de plongée.

IV.3.2 Comparaison avec un système ordinaire

La confrontation du débit minimum d'injection avec celui obtenu avec un système ordinaire par Saidi et Yahiaoui (2016) est présentée sur la figure (IV.9). La figure montre que ce paramètre évolue d'une façon similaire. C'est-à-dire avec une allure identique en termes de variation. La figure (IV.9) montre que pour les faibles hauteurs de plongée, notamment la gamme correspondant à $H_p < 0,5$, pour une hauteur de plongée identique le débit minimum d'injection est nettement différent. Les valeurs sont d'autant plus éloignées que la hauteur de plongée est faible. A titre d'exemple, dans le cas de la présente étude, pour $H_p = 0,4$, le débit minimum d'injection est de 3800 l/h. Pour la même hauteur, ce débit est de 1150 l/h, dans le cas du système ordinaire de Saidi et Yahiaoui (2016).

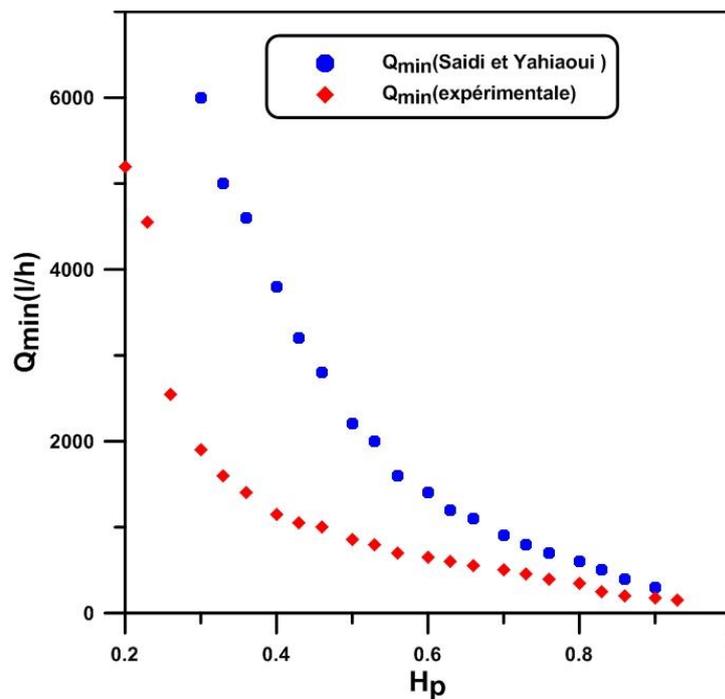


Figure IV.9: Comparaison entre le débit minimum d'injection expérimentale avec celui de Saidi et Yahiaoui

La même représentation montre qu'avec l'augmentation de la hauteur de plongée, les débits minimums d'injections ont tendance à se rapprocher. Ce rapprochement qui devient visible aux alentours de $H_p = 0,6$ s'accroît au fur et à mesure que la hauteur de plongée augmente. Nous pensons que pour la gamme ($H_p < 0,5$), la hauteur statique de la colonne remplie, ne dépassant pas le point de la

déformation géométrique (l'élargissement brusque) et pour cette raison, l'arrivée de la phase liquide dans le grand diamètre fait qu'il faut plus d'énergie pour soulever le liquide. D'où la nécessité d'atteindre de plus forts débits d'air pour amorcer le pompage. Concernant la gamme ($H_p > 0,5$), la hauteur statique dépasse l'élargissement brusque, c'est-à-dire la partie située en aval de la vanne du taux de vide ($D = 64 \text{ mm}$) est partiellement occupée par la phase liquide, d'où, le travail mécanique nécessaire pour soulever le liquide est moins important que dans le premier cas. Donc le pompage est atteint à des débits inférieurs.

IV. 4 Rendement

IV.4.1 Analyse du rendement pour $H_p = 0,6$

Nous rappelons que le rendement du système airlift utilisé est calculé par la formule de Nicklin (1963) qui le définit comme étant le rapport du travail mécanique nécessaire pour soulever la quantité du liquide à une hauteur égale à $(L - H)$ au travail mécanique développé par le compresseur suivant une détente isotherme allant de la pression d'injection à la pression atmosphérique :

$$\eta = \frac{\rho_l g Q_l (L-H)}{P_a Q_g \ln\left(\frac{P_{inj}}{P_a}\right)} \quad (\text{IV.1})$$

Sur la figure IV.10, nous avons représenté l'évolution de rendement (η) en fonction du débit d'air pour une hauteur de plongée égale à $H_p = 0,6$. On constate que l'évolution du rendement passe par trois phases distinctes. Dans la première étape, le rendement augmente sensiblement en fonction du débit d'air injecté jusqu'à atteindre un maximum de 19,23%. La deuxième étape commence à partir de ce maximum et elle s'étale sur une gamme de débit d'air (allant de 3200 à 4800 l/h). Cette phase est associée au fonctionnement optimal du système avec un régime à poches et la transition vers le turbulent baratté. Ceci concorde fort bien avec ce qui a été rapporté dans la littérature (Kassab et al., 2009, Khalil et al., 1999). Une fois la gamme optimale est atteinte, l'augmentation du débit d'air fait décroître le rendement d'une manière brusque pour atteindre des valeurs assez faibles (2,83%). Le maximum du rendement ne correspond jamais au maximum du débit de la phase liquide. La figure (IV.11) illustre bien ce constat.

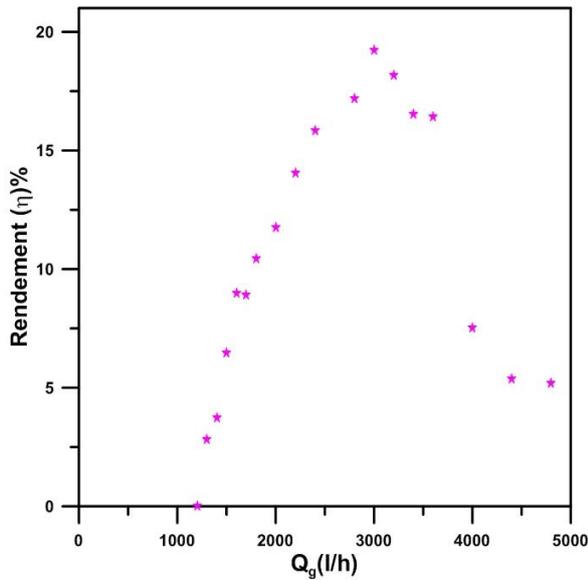


Figure IV.10: Evolution du rendement en fonction du débit d'air pour $H_p = 0,6$

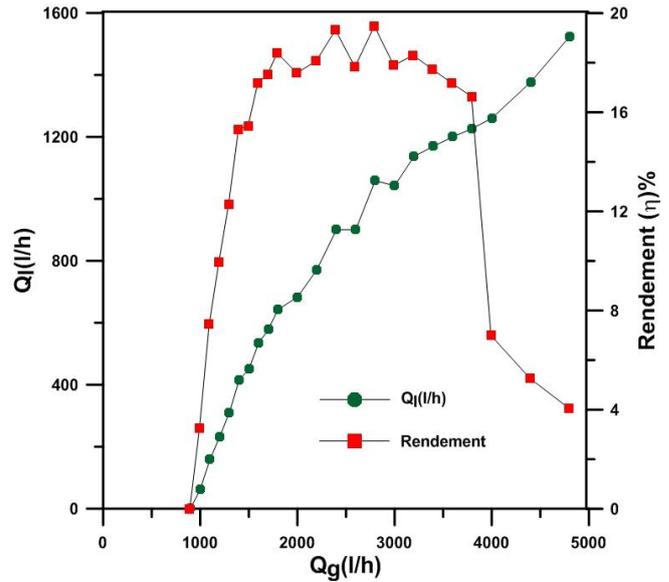


Figure IV.11: Confrontation du rendement et du débit de la phase liquide pour une hauteur de plongée identique.

IV.4.2 Effet de la hauteur de plongée

Sur la figure IV.12, on a représenté l'évolution de rendement en fonction du débit d'air pour différentes hauteurs de plongée allant de 0,4 jusqu'à 0,9 avec un pas de 0,1. Le rendement augmente avec l'augmentation de débit d'air d'une façon significative jusqu'à atteindre un maximum de 22,52% pour la hauteur de plongée 0,8. Lorsque le maximum est atteint le rendement s'étale sur un certain nombre de points : c'est la zone optimale du fonctionnement du système. La même figure montre que l'augmentation du débit d'air fait décroître le rendement d'une manière assez sensible. La confrontation du rendement avec le débit de la phase liquide dans le même repère (figure IV.11) montre clairement que le maximum du rendement ne correspond pas au maximum du débit de la phase liquide. La figure IV.12 nous confirme aussi qu'au-delà d'une certaine hauteur de plongée qui avoisine $H_p = 0.8$ que l'ordre de grandeur du rendement diminue avec l'augmentation de la hauteur de plongée ; ce ci confirme ce qui a été rapporté dans les travaux de Tighzert et al. (2013).

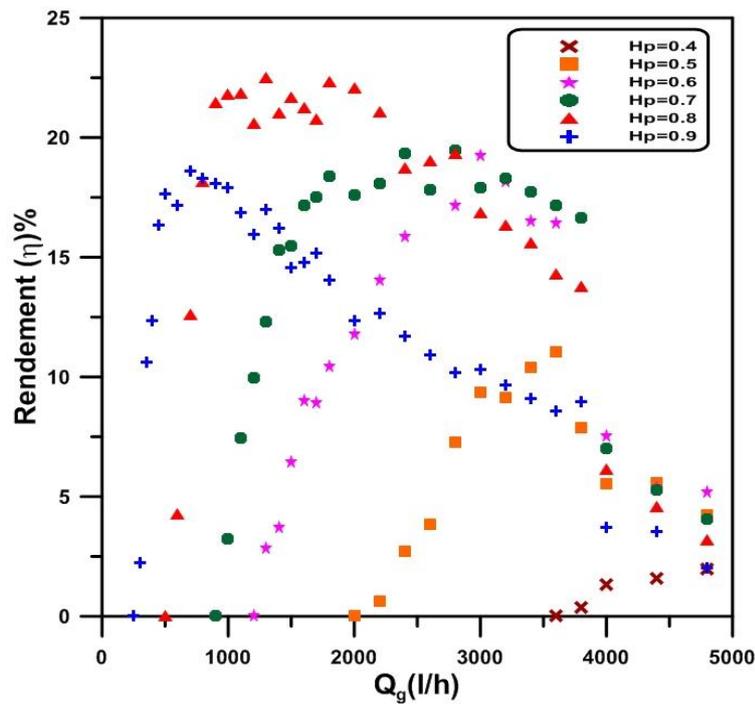


Figure IV.12: Evolution du rendement en fonction du débit d'air pour diverses hauteurs de plongée

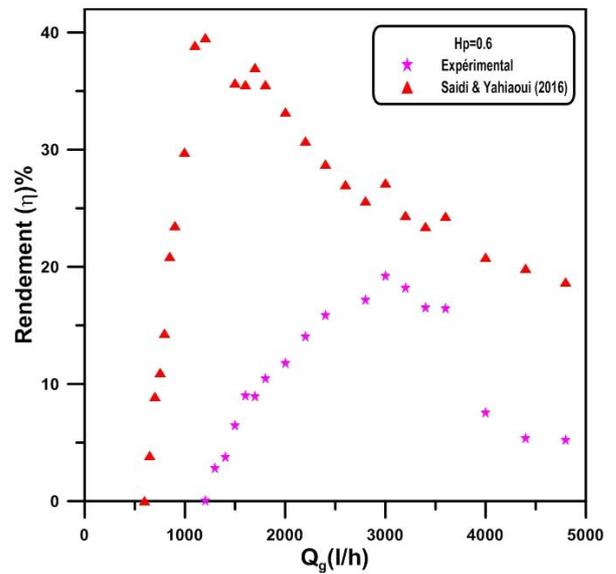
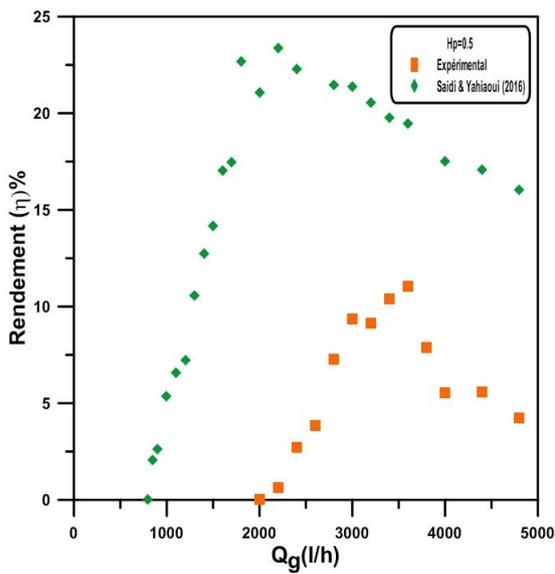
IV.4.3 Comparaison avec un système ordinaire

La confrontation de nos résultats avec ceux de Saidi et Yahiaoui (2016) pour les mêmes hauteurs de plongées : 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 présentées sur la figure (IV.13) fait état d'un écart significatif en termes d'ordre de grandeurs. Avec les deux dispositifs, l'allure de l'évolution du rendement est similaire. De même, comme nous l'avons souligné avec le débit de la phase liquide, le rendement obtenu avec le dispositif expérimental de type ordinaire est nettement supérieur à celui de la présente étude avec élargissement brusque. A titre illustratif, nous donnons dans le tableau (IV.2) quelques valeurs pour quantifier la différence. Dans la littérature certains auteurs (Mahrous et al., 2013 ; Kumar et al., 2003 ; Zakari et al., 2016) se sont proposées d'augmenter la performance du système avec la réalisation de déformations au niveau de la colonne (forme conique, élargissement brusque et la forme S). Toutefois, la présente étude ne va pas dans le même sillage que les conclusions de ces auteurs qui stipulent l'amélioration des performances lorsque les déformations sont apportées. Nos expériences réalisées avec un élargissement brusque introduit au milieu de la colonne, avec un rapport de diamètres avoisinant 2, montre que la performance diminue en comparaison avec un

système ordinaire. La dégradation du rendement serait due l'absence du régime à poches constatée dans la partie supérieure de la colonne. Les pertes de charges créées au niveau de la jonction qui sépare les deux diamètres seraient en partie responsables de la diminution du rendement enregistrée.

Tableau IV.2: Quelques valeurs illustratives pour la comparaison entre les deux systèmes.

Hp	Elargissement brusque	Système ordinaire
0,5	11,03%	23,34%
0,6	19,23%	39,53%
0,7	19,47%	35,72%
0,8	22,52%	34%



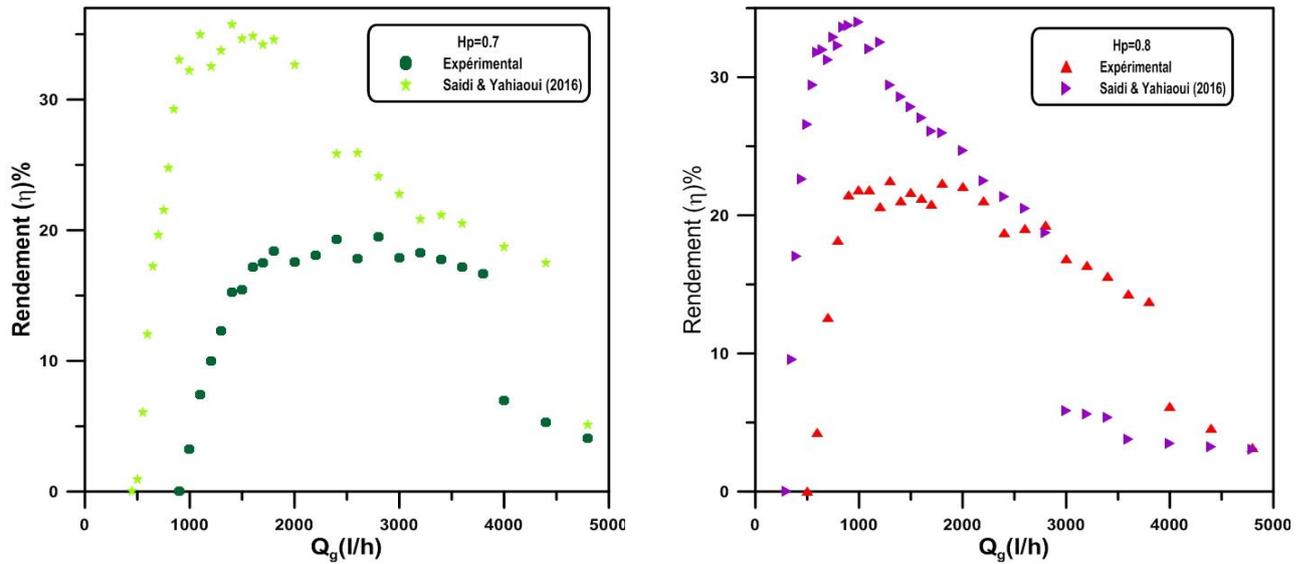


Figure IV.13: Confrontation du rendement de la présente étude avec celui d'un système ordinaire

IV.5 Efficacité

IV.5.1 Analyse pour la hauteur de plongée $H_p = 0,7$

L'efficacité est l'un des paramètres utilisé souvent pour évaluer les performances d'un système de pompage airlift. Elle est définie comme étant le rapport du débit massique de la phase liquide et le débit massique de la phase gazeuse.

$$E = \frac{\rho_l Q_l}{\rho_g Q_g} \tag{IV.2}$$

Sur la figure (IV.14) nous avons représenté l'évolution de l'efficacité en fonction du débit d'air pour la hauteur de plongée $H_p = 0,7$. Avant le pompage l'efficacité est nulle. Mais dès que le pompage s'amorce, l'efficacité augmente d'une façon sensible jusqu'à atteindre une valeur maximale de 317,23. Après ce maximum, l'efficacité diminue progressivement. La phase de progression a été associée visuellement au régime à poches et au régime à bulles. La gamme du débit d'air où l'efficacité augmente coïncide avec celle du rendement dans sa phase de progression. L'aspect d'évolution de l'efficacité est similaire à celui du rendement.

Conclusion

Dans ce présent travail nous avons abordé expérimentalement l'étude d'un système de pompage airlift de type non-ordinaire comportant un élargissement brusque au milieu de colonne avec un rapport de diamètre (33/64). L'ensemble du travail effectué consiste en la mesure du débit de la phase liquide, le débit minimum d'injection, le taux de vide tout en variant la hauteur de plongée de 0,4 à 0,9. Le calcul du rendement, l'efficacité, et le rapport de glissement. Les résultats obtenus sont ensuite confrontés à ceux d'un système ordinaire de diamètre 33 *mm*.

Au terme de cette étude, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La modification géométrique apportée modifie la structure de l'écoulement. Si le régime à bulles et le turbulent baratté sont les deux régimes communs pour les deux parties de la colonne, le régime à poches n'a pas été observé dans la partie supérieure de diamètre 64 *mm*.
- Le débit d'air injecté et la hauteur de plongée produisent le même effet sur le débit de la phase liquide qu'un système ordinaire. Toutefois en termes d'ordre de grandeurs, avec le système non-ordinaire de la présente étude, le débit de la phase liquide diminue sensiblement par rapport au système ordinaire.
- Pour les faibles hauteurs de plongée le débit minimum d'injection est affecté. L'effet de la hauteur de plongée sur ce paramètre diminue avec l'augmentation de cette dernière.
- Le fonctionnement optimal a été associé visuellement au régime à poches et à la transition vers le turbulent baratté. En termes de valeur, le rendement obtenu avec un système ordinaire est meilleur que celui de la présente étude.
- L'efficacité du système ordinaire utilisée comme référence est supérieure à celle de la présente étude.
- La comparaison du taux de vide global obtenu par un système non ordinaire avec celui d'un système ordinaire étudié par Saidi et Yahiaoui (2016) montre que la déformation

III Références

bibliographiques

et de l'environnement. Institut national polytechnique de Toulouse(France).

14. 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.

15. Camarasa, E., Vial, C., Poncin, S., Wild, G., Midoux, N., Bouillard, J., 1999. Influence of the coalescence behaviour of the liquid and of gas sparging on hydrodynamics and bubble characteristics in a bubble column. *Chemical Engineering and Processing* 38, 329-344

16. Chisti, M.Y., 1989. *Airlift Bioreactors*. Elsevier Applied Science, London and New York. Clark, N.N., Dabolt, R.J., 1986. A general design equation for air lift pumps operating inslug flow. *Aiche J.* 32, 56-63.

17. García Camacho, F., Contreras GÚmez, A., Ación Fernandez, F. G., Fernandez Sevilla, J., Molina Grima, E., 1999. Use of concentric-tube airlift photobioreactors for microalgal out door mass cultures. *Enzyme and Microbial Technology* 24, 164-172

18. Hanafizadeh, P., Ghanbarzadeh, S., Saidi, M. H., 2011a. Visual technique for detection of gas-liquid two-phase flow regime in the air -lift pump. *J. of Petroleum Sci. Eng.* 75, 327–335.

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

20. Hanafizadeh, P., Housseini Adabshapoori, M., Saidi, M.H., 2011c. Effect of conical angle of upriser pipe on the performance of the airlift pump. *International conference on computational heat and mass transfer*.

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

22. Kantarci, N., Borak, F., Ulgen, K. O., 2005. Bubble column reactors. *Process Biochemistry* 40, 2263–2283.

23. Kassab, S. Z., Kandil, H. A., Warda, H.A., Ahmed, W. H., 2009. Air-lift pumps characteristics under two-phase flow conditions . *Int. J. Heat Fluid Flow* 30, 88- 98.

24. 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*

FluidDynamics Dec 16-19, 2010, Egypt.

25. Kassab, S.Z., Kandil, H.A., Warda, H.A., Ahmed, W.H., 2001. Performance of an airlift pump operating in two-phase flow. The Seventh International Congress on Fluid Dynamics & Propulsion, Cairo(Egypt).

26. Kassab, S.Z., Kandil, H.A., Warda, H.A., Ahmed W.H., 2007. Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow. Chem. Eng. J. 131, 273–281.

27. 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.

28. Khalil, M.F., Elshorbagy, K.A., Kassab, S.Z., Fahmy, R.I., 1999. Effect of air injection method on the performance of an air lift pump. Int. J. Heat Fluid Flow 20, 598-604.

29. Lo, C.S., Hwang, S.J., 2004. Dynamic behaviour of an internal-loop airlift bioreactor for degradation of waste gas containing toluene. Chemical Engineering Science 59, 4517-4530.

30. Mahrous, A.F., 2013a. Performance study of an airlift pump with bent riser tube. Wseas Transactions on Applied and Theoretical Mechanics 8, 136-145.

31. Mahrous, A.F., 2013b. Airlift pump with a gradually enlarged segment in the riser tube. ASME J. Fluids Eng. 135-146.

32. Mahrous, A.F., 2014. Performance of Airlift Pumps: single-Stage vs. Multistage air injection. American J. Mech. Eng. 2, 28-33.

33. Merchuk J.C., Gluz M., 1999. Airlift reactors. In: Flickinger MC, Drew SW, editors. Encyclopedia of Bioprocess Technology. New York: John Wiley & Sons; 320–53.

34. Nagase, H., Eguchi, K., Yoshihara, H., Hirata, k., Miyamoto, K., 1998. Improvement of microalgal Nox removal in bubble column and airlift reactor. Journal of Fermentation and Bioengineering 86, 421- 423.

35. Nakao, K., Kiefner, A., Furumoto, K., Harada, T., 1997. Production of gluconic acid with immobilized glucose oxidase in airlift reactors. Chemical Engineering Science 52, 4127- 4133.

Référence bibliographiques

36. Nakoryakov, V. E., Kashinsky, O. N., Kozmenko, B. K., 1986. Experimental study of gas– liquid slug flow in a small diameter vertical pipe. *Int. J. Multiph. Flow* 12, 337-355.
37. Nicklin, D. J., 1963. The air-lift pump theory and optimization. *Int. Chem. Eng.* 4, 29-39.
38. Ouyang, J., Wang, X.D., Zhao, B., Wang, Y.C., 2005. Improved production of phenylethanoid glycosides by *Cistanche deserticola* cells cultured in an internal loop airlift bioreactor with sifter riser. *Enzyme and Microbial Technology* 36, 982-988.
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.
40. 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 maîtrise en Sciences Appliquées. Université de Montréal (Canada).
41. Sada, E., Kumazawa, H., Kudo, I. et Kondo, T. Absorption of lean in aqueous slurries of Ca(OH)₂ with NaClO₂ or Mg(OH)₂ with NaClO₂. *Chemical engineering Science* 34, 719-724 (1979).
42. Sadek Z. Kassab, Abdelrahman A. Abdelrazak, Eslam R ; 2022. Effet de mécanisme d'injection sur les performances des pompes air-eau à air comprimé. Département d'ingénieur mécanique, Faculté d'ingénieur, Université d'Alexandrie, 21544 Alexandrie, Egypte.
43. Saidi, S., Yahiaoui, F., 2016. Effet de la viscosité de la phase liquide sur quelques caractéristiques hydrodynamiques d'un système airlift. Mémoire de master. Université A. Mira de Béjaia.
44. Sanchez Mirón, A., Carmen Cerón García, M., García Camacho, F., Molina Grim, E., Chisti, Y., 2002. Growth and biochemical characterization of microalgal biomass produced in bubble column and airlift photobioreactors: studies in fed-batch culture. *Enzyme and Microbial Technology* 31, 1015–1023.
45. Sanchez Mirón, A., García Camacho, F., Contreras Gumez, A. Molina Grima, E., Chisti, Y., 2000. Bubble column and airlift photobioreactors for algal culture. *A.I.Ch.E. Journal* 46, 1872–1887.
46. Taitel, Y., Barnea, D., Dukler, A.E., 1980. Modeling flow pattern transition for steady

Référence bibliographiques

upward gas–liquid flow in vertical tubes. *Aiche J.* 26, 345–354.

47. Taleb, A. F. Sh, Al-Jarah, J. A., 2017. Experimental Study of an Air Lift Pump. *Engineering, Technology & Applied Science Research* 7, 1676-1680.s

48. Tighzert, H., Brahimi, M., Kechroud, N., Benabbas, F., 2013. Effect of submergence ratio on the liquid phase velocity, efficiency and void fraction in an air-lift pump. *J. of Petroleum Sc. Eng.* 110, 155–161.

49. Utiger, M., 1998. Étude de l'hydrodynamique locale d'un réacteur airlift à boucle externe par Anémométrie à film chaud. Thèse de Maîtrise en sciences appliquée. Ecole Polytechnique De Montréal (Canada).

50. 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.

51. 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.

52. 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.

53. 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.

54. 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. Mémoire de master. Université A. Mira de Béjaia.

Résumé

Le présent travail présente une étude expérimentale sur l'effet d'un système d'injection multi-étage à différentes hauteurs de plongée sur les performances d'un système de pompage de type air-lift. Pour une simple et double injection, nous avons mesuré expérimentalement ; le débit de la phase liquide, le taux de vide global et le débit minimum d'injection. Ces mesures nous ont permis d'effectuer des calculs afin d'évaluer le rendement et le rapport de glissement. Les résultats ont montré que les régimes d'écoulement observés sont les mêmes pour une simple et double injection. Le rendement maximal coïncide avec le minimum du rapport de glissement pour les deux modes d'injections. Le rapport de glissement pour le mode double est inférieur à celui du mode simple. Pour les deux types d'injection, le rapport de glissement évolue de la même façon.

Mots-clés : *Airlift, Ecoulement diphasique, Injection simple, Injection à multi-étages.*

Abstract

This work presents an experimental study on the effect of a multi-stage injection system at different plunge heights on the performance of an air-lift type pumping system single and double injection, we measured experimentally; the flow rate of the liquid phase, the overall void ratio and the minimum injection flow rate. These measurements allowed us to carry out calculations in order to evaluate the performance. Results showed that the observed flow regimes are the same for single and double injection. The maximum efficiency coincides with the minimum of the slip ratio for the two injection modes. The slip ratio for dual mode is lower than that for single mode. For both types of injection, the slip ratio evolves in the same way.

Keywords: *Air-lift pump, Two-phase flow, Single injection, Multi-stage injection.*