

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^{lle} HAMMAMI Baya

M^{lle} SALHI Kahina

Thème :

Contribution à l'étude hydrodynamique d'un système de pompage de type airlift à grand diamètre

Soutenu le : 29 Septembre 2020

devant le jury composé de :

M ^r BRAHIMI M.	Professeur (U. A. M. Béjaïa)	Président
M ^{me} BOUROUNA S.	Professeur (U. A. M. Béjaïa)	Examinatrice
M ^r TIGHZERT H.	MCB (U. A. M. Béjaïa)	Promoteur

Promotion 2020

Dédicaces

Je dédie ce travail en tout premier lieu à mes
parents mes plus chers qui m'ont soutenu,
encourager, aider....

A mes très chères sœurs : Lydia, Cylia, Mina et
Nesrine

A toute ma famille

A mon binôme et ma très chère amie Kahina

A mes copines Lydia et Kenza

A mes amis et tous ceux qui me sont chers.

Baya

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents
qui ont tout fait pour que je réussisse

A mes deux exemples de vie mes chères sœurs
Faiza et Houa

A mes petits frères Malek et Mouhand

A ma chère tante Hakima

Et mes adorables cousins et cousines : Zahoua ;
Sonia ; Faycel et Yacine

A toute ma famille

A mon binôme mais qui est avant tout ma
meilleure amie Baya

A tous mes amis et à tous ceux qui me sont chers.

KAHINA

Remerciements

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre promoteur **Mr TIGHZERT H.** On le remercie de nous avoir encadrées, orientées, aidées mais aussi pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils.

Nous adressons nos respectueux remerciements à **Mr BRAHIMI M.** pour avoir accepté de présider le jury de notre soutenance.

Nous remercions également **Mme BOUROUINA S.** pour avoir accepté d'examiner et de juger notre travail.

Remerciements	I
Liste des figures	II
Nomenclature	IV
Introduction	1

Chapitre I

Généralités sur les systèmes airlift

I.1-Historique	3
I.2-Définition d'un système airlift.....	4
I.3- Principe de fonctionnement	4
I.4- Classification des systèmes airlift.....	4
• Colonne à bulles	4
• Réacteurs airlift	5
- Réacteur à boucle interne.....	5
- Réacteur à boucle externe	5
• Système de pompage de type airlift.....	6
I.5- Régimes d'écoulement diphasique	7
a. Régime à bulles (bubbly flow)	8
b. Régime à poches (slug flow).....	8
c. Régime turbulent baratté (churn flow)	8
d. Régime annulaire (annular flow).....	8
I.6-Cartes d'écoulement	9
I.7-Domains d'applications	10
I.8- Avantages de système airlift.....	12
I.9- Paramètres de dimensionnement d'un système airlift	12
I.9.1- Hauteur de plongée.....	12
I.9.2- Rendement	13
I.9.3- Efficacité.....	14
I.9.4- Taux de vide	14
• Techniques de mesures de taux de vide	15
A. Technique de vanne à fermeture rapide	15
B. Technique d'expansion du volume	15

C. Technique de sondes électriques	15
D. Technique acoustique	16
E. Technique radiative	16
I.9.5-Débits des phases	16
I.9.6- Vitesses des phases	16
A. Vitesse superficielle	16
B. Vitesse interstitielle.....	17
C. Vitesse de glissement	17
I.9.7- Rapport de glissement	17
I.9.8 -Gradient de pression	17
I.9.9- Masse volumique du mélange diphasique	18
I.10- Revue bibliographique.....	18

Chapitre II

Dispositif expérimental e techniques de mesures

II.1- Présentation de l'installation	24
a. colonne (riser).....	25
b. Vannes de taux de vide	25
c. Section de transit.....	26
d. Disperseur	26
e. Séparateur de phases.....	27
f. Downcomer (tube descendant)	27
g. Bac coulissant	27
h. Compresseur	28
i. Débitmètres à air.....	29
j. Hauteur de plongée	29
II.2-Alimentation en eau	30
II.3- Alimentation en air.....	30
II.4- Principe de fonctionnement de l'installation.....	31

II.5- Techniques de mesures.....	31
II.5.1- Mesure du débit minimum d'injection	31
II.5.2- Mesure du débit de la phase liquide	31
II.5.3- Mesure du taux de vide	32
II.6- Caractérisation et visualisation des régimes.....	33
II.7- Mesure et calcul du gradient de pression	33

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1-Régimes d'écoulement obtenus	34
A. Le régime à bulles.....	34
B. Le régime à poches	35
C. Le régime turbulent baratté.....	35
III.2- Débit de la phase liquide.....	36
III.2.1- Effet de la hauteur de plongée.....	37
III.3- Débit minimum d'injection.....	38
III.4- Rendement	39
III.5-Efficacité	43
III.6-Taux de vide global.....	45
III.7-Rapport de glissement S.....	47
III.8-Masse volumique du mélange diphasique	49
III.9-Confrontation avec le modèle de Nicklin(1963).....	49
III.10-Gradient de pression	51
Conclusion.....	53
Références bibliographiques	55

Liste des figures

Figure I.1: Types de réacteurs airlift 6

Figure I.2 : Système de pompage de type airlift ordinaire 6

Figure I.3 : Système de pompage de type airlift à élargissement brusque 7

Figure I.4 : Système de pompage de type airlift à élargissement progressif 7

Figure I.5 : Système de pompage de type airlift forme S 7

Figure I.6: Illustrations des quatre régimes principaux..... 9

Figure I. 7 : Carte d'écoulement de Samara et Margaris (2005)..... 10

Figure I.8: Carte d'écoulement de Barnea et Brauner (1986)..... 10

Figure I.9: Schéma d'exploitation des gisements de pétrole 10

Figure I.10: Schéma illustrant la hauteur de plongée..... 13

Figure I.11: Système de pompage airlift en forme conique 20

Figure I.12: Colonne en forme S d'un système pompage airfit 20

Figure I.13: Dispositif expérimental de François et al. (1996) 21

Figure I.14: Régimes d'écoulements observés par Hanafizadeh et al 23

Figure II.1: Schéma de l'installation expérimentale 24

Figure II.2: Vannes du taux de vide..... 25

Figure II.3: Section de transit 26

Figure II.4: le disperseur utilisé 26

Figure II.5: Séparateurs de phases 27

Figure II.6: Bac coulissant 28

Figure II.7: Compresseur 28

Figure II.8: Débitmètres à air montés en parallèle..... 29

Figure II.9: Exemple du choix de la hauteur de plongée 30

Figure II.10: Bac gradué pour la mesure du débit 32

Figure III.1 : Photographie du régime à bulles obtenus par les auteurs 34

Figure III.2 : Photographie du régime à poches obtenus par les auteurs 35

Figure III.3 : Photographie du régime turbulent baratté obtenus par les auteurs 36

Figure III.4: Evolution du débit de la phase liquide en fonction du débit de la phase gazeuse pour $H_p=0,7$	37
Figure III.5 : Effet de la hauteur de plongée sur le débit de la phase liquide.....	38
Figure III.6 : Evolution du débit minimum d'injection en fonction de la n hauteur de plongée	39
Figure III.7 : Evolution du rendement en fonction du débit d'air pour la hauteur de plongée $H_p=0,6$	40
Figure III.8 : Confrontation du rendement et du débit de la phase liquide	41
Figure III.9: Effet de la hauteur de plongée sur le rendement.....	42
Figure III.10 : Evolution des maximums du rendement en fonction de la hauteur de plongée	43
Figure III.11: Evolution de l'efficacité en fonction du débit d'air pour la hauteur de plongée $H_p=0,6$	44
Figure III.12 : Evolution de l'efficacité en fonction du débit d'air pour diverses hauteurs de plongée.....	45
Figure III.13 : Evolution de taux de vide en fonction du débit d'air pour la hauteur de plongée $H_p=0,6$	46
Figure III.14 : Effet de la hauteur de plongée sur le taux de vide	47
Figure III.15 : Evolution du rapport de glissement en fonction de la vitesse Superficielle de la phase gazeuse pour diverses hauteurs de plongée.....	48
Figure III.16: Représentation simultanée du rendement et du rapport de glissement en fonction du débit de la phase liquide pour $H_p=0,7$	48
Figure III.17 : Evolution de la masse volumique du mélange diphasique air-eau pour diverses hauteurs de plongée.....	49
Figure III.18 : Prédiction du taux de vide avec le modèle de Nicklin (1963)	50
Figure III.19 : Evolution du gradient de pression en fonction du débit d'air pour les cinq hauteurs de plongée	52
Figure III.20 : Confrontation de la perte de pression gravitaire avec le gradient de pression total	52

Nomenclature

○ *Les lettres latines*

A : Section de la colonne	(m^2)
A_g : Section occupé par la phase gazeuse	(m^2)
A_l : Section occupé par la phase liquide	(m^2)
D : Diamètre de la colonne	(m)
E : Efficacité d'un système de pompage airlift	$(-)$
E_{max} : Efficacité maximale	$(-)$
g : Accélération de la pesanteur	(m/s^2)
H : Hauteur d'entraînement de la phase liquide	(m)
H_l : Hauteur de la phase liquide	(m)
H_m : Hauteur de mélange diphasique dans la colonne	(m)
H_p : Hauteur de plongée	$(-)$
L : Longueur de la colonne	(m)
P_a : Pression atmosphérique	(Pa)
P_{inj} : Pression d'injection d'air	(Pa)
Q_g : Débit volumique de la phase gazeuse	(m^3/s)
Q_l : Débit volumique de la phase liquide	(m^3/s)
S : Rapport de glissement	$(-)$
t : temps	(s)
U_g : Vitesse superficielle de la phase gazeuse	(m/s)
u_g : Vitesse interstitielle de la phase gazeuse	(m/s)
U_l : Vitesse superficielle de la phase liquide	(m/s)

u_l : Vitesse interstitielle de la phase liquide	(m/s)
U_s : Vitesse de glissement	(m/s)
V_g : Volume de la phase gazeuse	(m ³)
V_l : Volume de la phase liquide	(m ³)
V_m : Volume du mélange diphasique dans la colonne	(m ³)

○ ***Les lettres grecques***

ε : Taux de vide global	(-)
η : Rendement d'un système de pompage airlift	(-)
ρ_e : Masse volumique de l'eau	(kg/m ³)
ρ_l : Masse volumique de la phase liquide	(kg/m ³)
ρ_g : Masse volumique de la phase gazeuse	(kg/m ³)
ρ_m : Masse volumique du mélange diphasique	(kg/m ³)
ΔH : lecture sur le manomètre	(m)
ΔP : Gradient de pression	(Pa)
ΔP_{acc} : Gradient de pression dû à l'accélération	(Pa)
ΔP_{fr} : Gradient de pression dû aux frottements	(Pa)
ΔP_g : Gradient de pression dû à la gravité	(Pa)
ΔP_v : pertes de pression	(Pa)

Introduction

Pour soulever par exemple de l'eau, du pétrole ou un autre liquide à partir d'un puits, d'un bassin ou un autre milieu on a besoin d'un système de pompage. Il existe une variété importante de pompes (pompe centrifuge, pompe volumétrique...etc.) toutes ces pompes, bien qu'elles offrent un rendement intéressant, ces pompes sont faites de pièces mécaniques mobiles. Ce sont donc des machines qui nécessitent un entretien, une maintenance et une lubrification à cause des problèmes de corrosion et d'abrasion. Ce sont aussi des machines qu'on ne peut pas utiliser dans toutes les situations et encore moins dans le cas de certains fluides toxiques ou corrosifs. Y a-t-il un système qui puisse être une alternative ? La réponse est affirmative : c'est le système de pompage de type airlift. Un système dont les atouts sont en mesure de pallier à toutes les contraintes citées ci-haut.

C'est quoi donc un système de pompage de type airlift ? C'est un dispositif qui sert à soulever des liquides ou des mélanges de liquides solides à travers une colonne verticale partiellement ou totalement immergée dans le liquide au moyen d'air comprimé introduit à la base de la colonne (Kassab et al., 2009, Clarck et Dabolt., 1986, Khalil et al., 1999). Ce dispositif a fait l'objet de beaucoup d'études expérimentales et numériques et les auteurs dans la littérature l'ont toujours présenté comme une alternative aux systèmes de pompage classiques en raison de leur simplicité de conception et de beaucoup d'autres avantages tels que l'absence de toute pièce mobile, ce qui permet d'éviter le phénomène d'abrasion et les problèmes d'étanchéité et d'usure. Leur simple conception fait d'eux des systèmes moins coûteux pour la maintenance et leur donne l'aptitude d'être adaptés à diverses situations où les systèmes classiques échouent. Ce sont des dispositifs efficaces et sûrs pour les manutentions des liquides radioactifs, corrosifs et toxiques ou dans le cas de pompage de puits de formes irrégulières et des puits sablonneux. Leur application s'étend à plusieurs domaines comme l'industrie chimique, pétrolière, dans le domaine aquaculture, archéologique et minier ou encore dans le domaine hydraulique et géothermie.

Malgré la multitude de ces avantages, l'inconvénient majeur est son faible rendement, c'est pour cela que les recherches récentes et actuelles ont un seul objectif commun : améliorer les performances du système et rendre leur fonctionnement optimal pour la tâche à laquelle on le destine. Parmi les paramètres déterminant on peut citer : la vitesse du gaz, la pression d'injection, la hauteur de plongée, caractéristiques physiques des fluides et enfin les facteurs géométriques. La forme de la colonne, sa hauteur, son inclinaison et son diamètre jouent un rôle très important.

De ce fait, la configuration géométrique de la colonne tient une place importante dans le volet de recherche. Dans quelques études récentes (Kumar et al., 2003 ; Fujimoto et al., 2004 ; Karimi et al., 2010 ; Mahrous, 2013 ; Zakari et al., 2016) la colonne a fait l'objet d'une modification géométrique en vue d'améliorer la performance. Ces modifications qui peuvent être un élargissement brusque, un élargissement progressif ou une déformation en forme S ...etc. Mais selon certains auteurs le paramètre ayant plus d'impact est le diamètre de la colonne dans laquelle l'air est injecté.

Dans ce présent travail, notre intérêt est porté sur un système de pompage de type airlift ayant un diamètre relativement grand. Nous nous sommes fixées comme objectif l'étude de quelques paramètres hydrodynamique ayant un impact sur la performance et la structure de l'écoulement. Nous tenons à souligner que le travail expérimental prévu tout au début n'a pas pu être réalisé en raison des conditions sanitaires de la pandémie COVID-19 qui sévit dans le monde. Tout en restant dans le même axe, nous avons opté pour le traitement des données issues d'un travail expérimental réalisé au sein du laboratoire de Transfert de quantité de mouvement de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa. Ces données brutes que nous avons traitées concernent un système de pompage de type airlift d'une colonne ayant un diamètre de 50 mm et une hauteur de 1,62 m.

Le présent mémoire comporte donc trois chapitres. Dans le premier nous aborderons les généralités du système airlift, ainsi qu'une synthèse bibliographique de quelques travaux de la littérature liés aux systèmes airlift.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons soigneusement le dispositif expérimental qui a servi à l'obtention des résultats qui ont fait l'objet de notre étude. Nous aborderons ainsi son mode de fonctionnement et les techniques de mesures utilisées. Au passage, nous soulignons que le dispositif décrit nous a été accessible. Ce qui nous a bien servi pour mieux comprendre comment nos données ont été obtenues.

Dans le troisième et le dernier chapitre nous présentons les résultats aux quels nous avons abouti à travers le traitement de ces données. Il s'agit également dans ce chapitre de discuter et d'interpréter l'ensemble de ces résultats. On termine enfin par une conclusion qui résume les principaux points des résultats.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes airlift

1.1-Historique

À l'origine, l'idée d'un système airlift est attribuée à l'ingénieur allemand des mines Carl Emanuel Löscher. En 1797, son idée débouche sur une réalisation reconnue. Il a mis en point le premier dispositif, mais le pompage par airlift reste limité au pompage d'eau dans les mines.

L'utilisation pratique n'a vu le jour qu'en 1846 aux États-Unis lorsque la technique a été utilisée pour la première fois en Pennsylvanie dans l'industrie pétrolière pour la récupération du pétrole (Castro et al., 1975).

Les systèmes ont fait l'objet de beaucoup de développement et d'avancée technologique dont l'intérêt grandissant a fortement motivé les chercheurs si bien que de nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été réalisées.

Pour cause de complexité de la modélisation de la mécanique des fluides diphasique mise en œuvre, d'intenses recherches sont faites pour obtenir une modélisation satisfaisante des écoulements.

Plusieurs chercheurs ont travaillé et travaillent encore sur ce système de pompage par airlift tels que : Purchas (1917) qui s'est intéressé au problème de corrosion qui affecte les matériaux des systèmes d'injection, en passant par Parker en 1980, qui a abordé pour la première fois la chose sous un angle moderne, en passant par Chisti & MooYoung (1987) , Khalil et al.(1999) , et au cours des dernières années Kassab et al (2010), Ahmed et Badr (2012) , Mahrous (2013,2014) , Kadic et Heindelen (2014) et Ahmed et al (2016) , Taleb et al Jarrah (2017)...

Beaucoup d'aspects sont abordés dans la littérature mais le champ d'investigation est encore vaste et ne répond pas vraiment d'une manière satisfaisante aux attentes des applications pratiques.

I.2-Définition d'un système airlift

Airlift est un système de pompage qui mène à soulever artificiellement un liquide ou un mélange liquide-solide, ceci dépend de l'injection d'air ou de gaz au fond (ou près du fond) d'une colonne partiellement immergée dans le liquide à soulever. La différence de pression hydrostatique qui résulte entre l'émulsion liquide/gaz contenue dans la colonne et le liquide autour de cette colonne provoque un mouvement ascensionnel du liquide (ou du mélange liquide-solide). Ce système est parfois appelé pompe par injection d'air, pompe *de Löscher* ou encore pompe *mammouth*. (Kassab et al.,2009 ; Clark et Dabolt.,1986 ; khalil et al.,1999).

I.3-Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de ce genre de systèmes nécessite une injection d'un gaz généralement de l'air comprimé ; en introduisant ce dernier dans l'extrémité inférieure de la colonne, on va créer un mélange diphasique (air-liquide) dont la densité est inférieure à celle de la phase liquide pure présente au départ qui occupe le reste de la colonne. Ceci peut se traduire par un gradient de pression en amont et en aval qui permet de déplacer vers le haut la phase liquide. Ainsi cette phase transportée peut être récupérée à la sortie ou recyclée, selon la tâche envisagée (Kassab et al.2009 ; Hanafizadeh et al.2011 ; Tighzert et al.2013).

I.4-Classification des systèmes airlift

- **Colonne à bulles**

Dans sa forme la plus simple, une colonne à bulles est une colonne cylindrique verticale remplie de liquide dans laquelle de l'air comprimé est introduit à sa base grâce à un système de distribution troué qui peut prendre une grande variété de formes, appelé « disperseur de gaz ». Avec l'injection de l'air, des bulles se forment et se déplacent dans la phase liquide. Dans ce cas de configuration, la phase liquide est caractérisée par sa faible circulation voire absence totale de circulation. Il existe plusieurs colonnes à bulles, comme les colonnes à bulles multi-étages ou les colonnes à bulles à garnissage (Kantarci et al., 2005 ; Akita et al.,1988 ; Hills 1976 ; Hikita & Kikukawa, 1973).

- **Réacteurs airlift**

Le réacteur airlift ou *réacteur gzosiphon* est une colonne à bulles modifiée ; il diffère de la colonne à bulles par sa particularité de comporter deux zones distinctes, chacune avec sa propre configuration d'écoulement. La première est appelée le riser et la seconde le downcomer (Chisti, 1988 ; Vial et al., 2000-2005) :

Section ascendante ou riser : le gaz est injecté en bas de cette section, la circulation du gaz et du liquide fait que la zone devient siège d'un écoulement diphasique ascendant. Cette zone est la plus aérée. Elle possède la plus grande rétention de gaz et elle est le siège de la majeure partie du transfert gaz-liquide tandis que la seconde.

Section descendante ou downcomer : c'est une section parallèle au riser, elle est en contact avec ce dernier en bas et en haut du réacteur, la circulation du gaz et du liquide se fait vers le bas. Une partie des bulles formées au riser quitte le liquide par la surface libre, et donc le downcomer contient moins de gaz que le riser. Parfois cette zone est dépourvue de toute bulle. La force motrice de l'écoulement est due à la différence de densité entre le riser et le downcomer. Cette différence génère le gradient de pression nécessaire pour la recirculation du liquide. Les deux zones sont séparées par une configuration géométrique bien particulière. Cette configuration géométrique permet d'avoir deux types de réacteurs airlift : un réacteur à boucle interne et un réacteur à boucle externe comme suit :

- **Réacteur à boucle interne**

Les réacteurs à boucle interne sont en fait des colonnes à bulles chicanées, le riser est le downcomer peuvent être séparés par une chicane. Cette dernière peut être plane, comme elle peut être constituée de deux tubes concentriques et selon l'endroit de l'injection du gaz. Le fluide circule de l'intérieur vers l'extérieur ou vice versa.

- **Réacteur à boucle externe**

Pour ces réacteurs le riser et le downcomer sont séparés et connectés par des sections ou des jonctions horizontales à la base et au sommet. La séparation du gaz peut se faire facilement grâce à un séparateur situé à la sortie entre les deux colonnes.

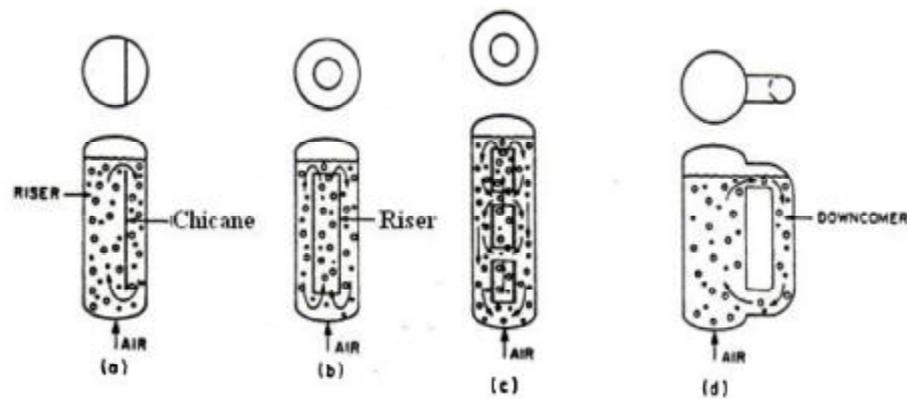


Figure I.1: Types de réacteurs airlift (Chisti, 1989)

(a), (b) et (c) : Réacteurs airlift à boucles internes ;
 (d) : Réacteur airlift à boucle externe.

- **Systèmes de pompage de type airlift**

Un système de pompage de type airlift est un dispositif conçu pour transporter un liquide ou un mélange liquide-solide, verticalement vers le haut le long d'une colonne qui peut être totalement ou partiellement immergée. Après l'injection du gaz à la base de la colonne, la phase liquide est récupérée à sa sortie. Dans la littérature, on trouve qu'il y a des variantes basées sur des modifications géométriques notamment au niveau de la colonne. Des modifications géométriques comme par exemple une colonne à élargissement brusque, une colonne à élargissement progressif ou d'autres déformations telle une colonne sous forme de la lettre « S » (Voir les figures I.2, 3,4 et 5).

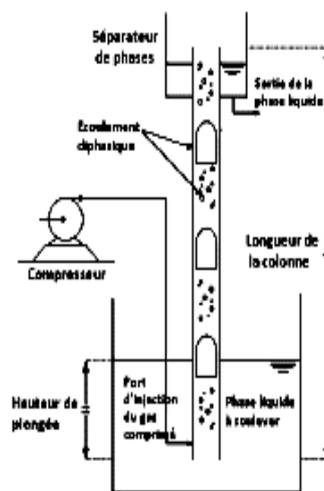


Figure I.2 : Système de pompage de type airlift ordinaire

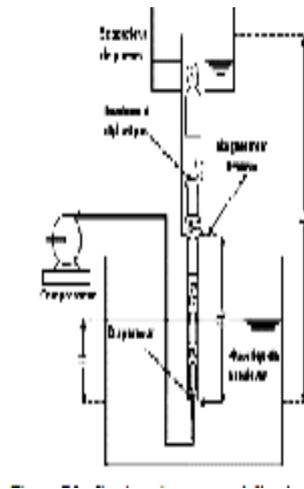


Figure I.3 : Système de pompage de type airlift à élargissement brusque (Hanafizadeh et Ghorbani, 2012)

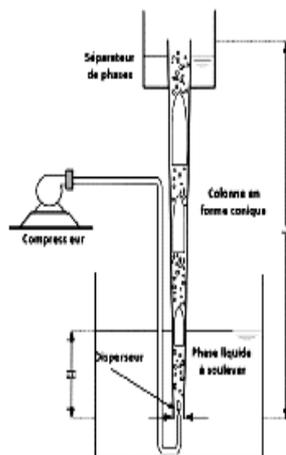


Figure I.4 : Système de pompage de type airlift à élargissement progressif (Kumar et al.,2003 ; Mahrous, 2013)

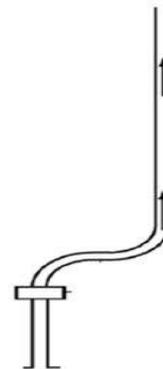


Figure I.5 : Système de pompage de type airlift en forme S (Fujimoto et al., 2004)

I.5-Régimes d'écoulement diphasique

C'est la configuration spatiale traduisant la distribution des deux phases en écoulement. Cette configuration nous renseigne sur les caractéristiques géométriques des interfaces séparant le gaz et le liquide et en ce qui concerne l'écoulement diphasique ascendant qui fait l'objet de notre travail, on retient quatre principaux régimes qu'on cite ci-dessous (Khalil et al.,1999 ; Tighzert , 2015) :

a. Régime à bulles (*bubbly flow*)

Il apparaît à faible débits de gaz. Il est caractérisé par la dispersion homogène des bulles dans la phase liquide. Il est assimilé à un écoulement homogène où les bulles de gaz sont de taille approximativement uniforme. Ce régime est le plus fréquent en pratique lorsque le système est utilisé comme technique d'aération ou dans la configuration de réacteur. Ce régime est aussi appelé : *régime homogène* (Kassab et al.2001,2009 ; Hanafizadeh, 2011 ; Ahmed et Badr, 2012) .

b. Régime à poches (*slug flow*)

Si le débit de gaz augmente, les chapeaux de Taylor continuent à croître par coalescence, en formant des bulles plus grandes, dont les dimensions atteignent presque la dimension du diamètre de la colonne dans certaines conditions. Les bulles peuvent croître par coalescence et par la diminution de la pression jusqu'à atteindre une taille critique, au-delà de laquelle elles ne sont plus stables (Kassab et al.2001, 2009 ; Hanafizadeh, 2011 ; Ahmed et Badr, 2012).

c. Régime turbulent baratté (*churn flow*)

C'est un régime typique à l'écoulement diphasique ascendant. Il ressemble au régime à poches mais avec un aspect chaotique, il est caractérisé par un mouvement oscillatoire, irrégulier et sans structure précise. Le liquide s'écoule dans les deux sens, vers le haut et vers le bas. Il se produit à l'établissement du régime à poches : l'augmentation de la vitesse du gaz au-delà d'une valeur critique provoque la destruction des poches. Le régime turbulent baratté est la configuration la plus complexe en écoulement diphasique. C'est le régime recommandé quand le système est siège de phénomènes de transferts. Dans la littérature, ce régime et le régime à poches sont aussi appelés : *régimes hétérogènes* (Vial et al ., 2000,2005, Christi,1989).

d. Régime annulaire (*annular flow*)

Il se produit à grands débits d'air et il est caractérisé par l'écoulement du gaz sous forme d'un tube occupant le milieu de la colonne. Le film liquide s'écoule sur la paroi de cette colonne sous forme mince. On le rencontre en général dans les échangeurs thermiques, les générateurs de vapeur et les systèmes de réfrigération (Kassab et al. 2001,2009 ; Hanafizadeh, 2011 ; Ahmed et Badr, 2012).

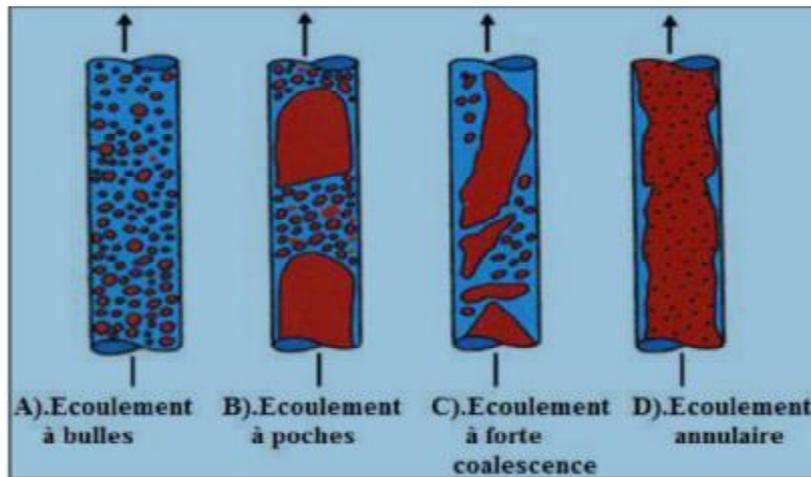


Figure I.6: Illustrations des quatre régimes principaux

I.6-Carte d'écoulement

Une carte d'écoulement c'est une représentation graphique bidimensionnelle des domaines d'existence des différents régimes. Elle permet de prévoir le régime dans lequel se trouve l'écoulement en fonction des paramètres opératoires qui figurent comme coordonnées et abscisses sur les axes de la carte. Les systèmes de coordonnées qui la définissent sont choisis parmi les variables de l'écoulement diphasique. Les paramètres qui sont souvent employés sont ceux utilisés par l'expérimentateur pour contrôler l'écoulement, il est fréquent d'utiliser les vitesses superficielles des phases, les nombres adimensionnels (les nombres de Reynolds, de Froude, de Bond...etc.) et parfois le taux de vide ou le diamètre de la colonne. Les frontières entre les différents régimes n'ont jamais été bien définies et les zones de transition sont relativement étendues, et les caractéristiques géométriques et physiques du système ne sont pas toujours tenues en comptes lors de leur établissement, d'ou le caractère subjectif de ces cartes. Ces cartes sont différentes selon les auteurs (Samara et Margaris, 2005 ; Barnea et Brauner, 1986). Sur les figures ci-dessous nous présentons deux exemples de cartes d'écoulement :

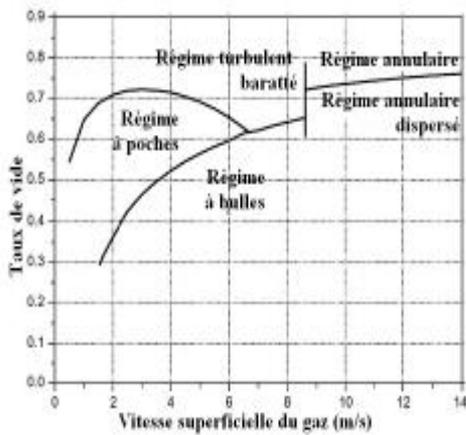


Figure I. 7 : Carte d'écoulement de Samara et Margaris (2005)

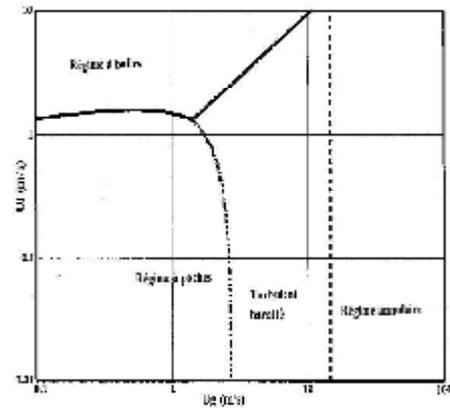


Figure I.8 : Carte d'écoulement de Barnea et Brauner (1986)

I.7-Domains d'applications

Les systèmes airlift trouvent des applications dans divers domaines :

Domaine pétrolier (industrie pétrolière)

L'utilisation de ce système de pompage est assez fréquente dans l'industrie de pétrole dans le cas de l'exploitation des puits notamment de formes irrégulières ou en état d'épuisement et dans ce domaine on rencontre la technique sous l'appellation *gaz-lift*.

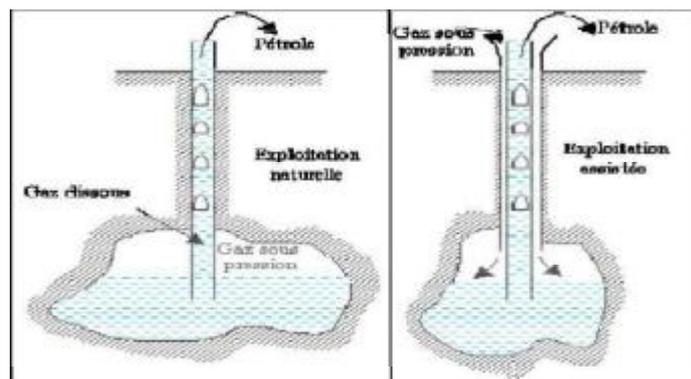


Figure I.9: Schéma d'exploitation des gisements de pétrole

Domaine aquaculture : le système airlift est utilisé pour la recirculation et aération de l'eau dans les aquariums en aquaculture en raison d'absence du taux de cisaillement qui

est un avantage pour les organismes vivants. Reinemann et al. (1986) ont rapporté que l'utilisation d'un système de pompage airlift a permis un gain d'énergie assez important (plus de 60%) comparativement au système de pompage classique.

Domaine archéologique et miniers marine : en archéologie marine le système airlift est utilisé pour faire remonter des objets ou des minerais (écoulement triphasiques). Cette technique a comme avantage ne pas altérer les pièces récupérées (anciens documents en papier ...etc) (Kassab et al.2009 ; Khalil et al.1999 ; Stening et Martin,1968).

Domaine hydraulique : par exemple dans le cas des envasements des barrages l'utilisation d'un système de pompage airlift est un procédé idéal pour l'évacuation des boues par sa facilité de mise en œuvre (Stening et Martin, 1968 ; Giot, 1982).

Domaine géothermique : récemment les recherches tentent d'utiliser le système de pompage airlift pour la récupération de la chaleur. Un travail approfondi est réalisé dans ce sens par Momarson (2015).

Domaines biotechnologiques : ils sont utilisés comme réacteurs ou bioréacteurs pour l'aération des milieux, l'oxygénation, la fermentation et la culture des micro-organismes. Contrairement aux autres systèmes d'aérations, l'utilisation d'un système airlift épargne les micro-organismes des effets néfastes de cisaillement.

Domaine océanographique : cette application est encore au stade recherche. Un système airlift a été utilisé par des chercheurs (Fan et al., 2013) dans le but d'enrichir les eaux de surfaces en nutriments parce que parfois des phénomènes naturels empêchent tout déplacement de liquide dans un océan. Le système ailift à grandes dimensions semble avoir permis la remontée des eaux d'une façon artificielle.

Domaine nucléaire : dans certains procédés, on fait appel à l'utilisation des systèmes airlift pour la manipulation des produits radioactifs.

Domaine traitement des eaux : le système de pompage par airlift est utilisé pour certaines stations d'épuration pour la récupération des boues. Par des dessableurs, bioréacteur, réacteur airlift. Par exemple, pompage des eaux usées (Witheridge, 2005 ; Kondo, 2000; Chancellor, 1999).

Domaine médical : Hanafizadeh et Ghorbani (2012) rapportent qu'une application dans le domaine médical a vu le jour. Il s'agit des travaux de Wicomb et al. (1985) qui a utilisé un système airlift pour le stockage par perfusion d'un cœur isolé pour la transplantation, dans le but de prolonger sa durée de vie allant de 24 à 48 heures lors du transport de l'organe sur de longues distances.

I.8-Avantages de système airlift

Le système de pompage airlift présente de multiples avantages dont on cite :

- Simplicité de construction de système (simplicité mécanique) ;
- Dépourvus de toute pièce mobile, ce qui permet d'éviter le phénomène d'abrasion et les problèmes d'étanchéité et d'usure donc ils ne nécessitent pas de lubrification ;
- Les coûts de l'entretien sont les plus bas ;
- On peut les adapter pour des puits de formes irrégulières ;
- Assure un fonctionnement à long terme ;
- Sécurité et stabilité du fonctionnement ;
- La réalisation ne nécessite pas de coûts élevés ;
- Ce sont des dispositifs efficaces et sûrs pour la manipulation des liquides radioactifs, corrosifs et toxiques ;
- Le système airlift présente comme avantage la flexibilité et le fait d'occuper peu d'espace lors de l'installation ;
- Favorisent les transferts et le contact entre phases.

Remarque : Malgré cet ensemble d'avantages, le système airlift a un inconvénient qui est son faible rendement dans le cas du pompage.

I.9-Paramètres de dimensionnement d'un système airlift

I.9.1-Hauteur de plongée

La hauteur de plongée, appelée aussi fraction d'immersion (*submergence ratio*), c'est la fraction immergée de la colonne dans le liquide. Elle est définie par le rapport de la hauteur immergée (H) et la longueur totale de la même colonne (L) :

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

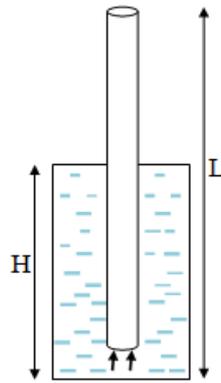


Figure I.10: Schéma illustrant la hauteur de plongée

I.9.2-Rendement

Il est défini comme étant le rapport de travail mécanique nécessaire pour soulever un débit massique de la phase liquide ($\rho_l Q_l$) à une hauteur ($L - H$) au travail fourni par le compresseur suivant une détente isotherme de la pression d'injection (P_{inj}) à la pression atmosphérique (P_a). Il est souvent calculé par l'équation de de Nicklin (1963) :

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

Où

Q_L : débit de la phase liquide en (m^3/s) ;

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

P_{inj} : pression de l'air à l'injection en (Pa) ;

ρ_l : masse volumique de la de la phase liquide en ($\frac{kg}{m^3}$) ;

P_a : pression atmosphérique (Pa) ;

H : portion de la colonne immergée en (m) ;

L : longueur de la colonne en(m).

I.9.3-Efficacité

On la définit comme étant le rapport du débit massique de la phase liquide et celui de la phase gazeuse, introduite par Parker (1980). Elle est utilisée pour évaluer les performances d'un système airlift. L'efficacité ne fait pas intervenir les paramètres géométriques.

$$E = \frac{\rho_l Q_l}{\rho_g Q_g} \quad (I.3)$$

I.9.4-Taux de vide

Le taux de vide appelé aussi « rétention gazeuse », c'est la fraction occupée par le gaz dans un mélange diphasique. Il existe plusieurs notions du taux de vide, on cite :

Taux de vide global : c'est la fraction volumique occupée par le gaz dans un mélange diphasique. Il est donné par :

$$\varepsilon = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (I.4)$$

Où

V_g : volume de la phase gazeuse ;

V_l : volume de la phase liquide.

Taux de vide volumétrique : c'est la fraction du débit volumique de la phase gazeuse rapportée à la somme des débits volumiques des deux phases :

$$\varepsilon = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} \quad (I.5)$$

Où

Q_g : Débit de la phase gazeuse ;

Q_l : Débit de la phase liquide.

Taux de vide surfacique : c'est la fraction surfacique de la phase gazeuse rapportée à la somme des aires occupées par les deux phases sur la section droite de la colonne. En raison de la difficulté de le déterminer, il est rarement utilisé en pratique.

$$\varepsilon = \frac{A_g}{A_g + A_l} \quad (I.6)$$

Où

A_g : Aire occupée par la phase gazeuse ;

A_l : Aire occupée par la phase liquide.

- **Techniques de mesures du taux de vide**

Il existe différentes techniques pour la mesure du taux de vide, parmi ces techniques on peut citer :

A. Technique de vanne à fermeture rapide

C'est la technique la plus utilisée et la plus précise, elle consiste à piéger rapidement l'écoulement du mélange diphasique circulant dans la colonne entre deux sections par la fermeture de deux vannes d'une façon simultanée. Le taux de vide est mesuré en déterminant le volume occupé par le gaz entre les deux sections. La plupart des expériences utilisant cette technique ont été réalisées à basses pression car les hautes pressions engendrent des problèmes de serrage des vannes et nécessitent une bonne coordination dans la fermeture de ces dernières. Bien que cette méthode soit très précise, son emploi engendre l'arrêt de l'écoulement à chaque essai et elle est en général utilisée quand il s'agit de colonne à petit diamètre parce que pour les colonnes à larges diamètres la fermeture nécessite plus de temps, par conséquent les mesures peuvent être faussées (Pochet, 2012).

B. Technique d'expansion du volume

Cette technique consiste à mesurer le volume de mélange diphasique (volume mouillé (V_m)) et le volume de liquide non aéré (V_l) pour déterminer la fraction du liquide. La fraction de gaz est déterminée en soustrayant celle de liquide de l'unité :

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_l}{V_m} \quad (I.7)$$

Elle est généralement utilisée dans les colonnes à bulles de section uniforme où il n'y a pas de recirculation de la phase liquide. Elle a comme inconvénient le caractère fluctuant à la surface du liquide notamment à de très hauts débits (Tighzert, 2016 ;Kumar et al., 1998 ; Ghosh et al., 2010 ; Jin et Lant., 2004).

C. Technique de sondes électriques

Cette technique est basée sur la variation de l'impédance due à la variation de la conductivité du mélange. La conductivité d'un liquide n'étant pas la même qu'un gaz, il est possible de déterminer le taux de vide en mesurant la conductivité du fluide circulant à l'extrémité de la sonde. La variation du champ électrique dépend de l'état du fluide circulant entre les électrodes et elle est interprétée comme une mesure du taux de vide

local de l'écoulement. Comme inconvénient, cette technique est exposée à des problèmes de tension de surface et des problèmes de corrosion (Pochet, 2012).

D. Technique acoustique

Cette technique est basée sur le fait que la vitesse du son diffère selon le milieu de propagation de l'onde. En l'occurrence, lorsqu'un ultrason est émis et rencontre une interface gaz-liquide, il se produit un phénomène de réflexion dû à la différence d'impédance du milieu donc une partie de l'onde sera réfléchi. La différence de temps entre le moment où l'onde est émise et le moment où elle est collectée donne une indication sur la position de l'interface à l'intérieur de la colonne. Lorsqu'un ultrason réfléchi sur une interface en mouvement, l'onde réfléchi subira un changement de fréquence qui est fonction de la vitesse de l'interface en mouvement. Ainsi, en mesurant la vitesse de l'écoulement en deux endroits différents de la colonne, il est possible de déterminer la différence de vitesse du mélange et de calculer la différence dans la valeur du taux de vide entre ces deux points (Pochet, 2012).

E. Technique radiative

Cette technique 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, β et les neutrons (Pochet, 2012).

I.9.5-Débits des phases

Le premier paramètre usuel est le débit volumétrique total. C'est un paramètre facilement mesurable en phase gazeuse par des débitmètres, et le plus souvent converti en débit massique total. Le débit de la phase gazeuse est un paramètre clé dans le dimensionnement d'un système airlift. C'est un paramètre opératoire qui influe sur le fonctionnement, notamment la structure de l'écoulement. Quant au débit de la phase liquide, ce dernier dans le cas d'un système airlift, il est induit par le débit de la phase gazeuse. Il fait toujours l'objet de mesures.

I.9.6-Vitesses des phases

A. Vitesse superficielle

C'est le rapport du débit volumique à la section de la colonne (A) pour les phases liquide et gazeuse. Les vitesses superficielles du liquide et de la phase gazeuse sont données respectivement par :

$$U_l = \frac{Q_l}{A} \quad (I.8)$$

$$U_g = \frac{Q_g}{A} \quad (I.9)$$

B. Vitesse interstitielle

C'est le rapport de la vitesse superficielle à la fraction occupée par la phase dans le mélange diphasique. C'est la vitesse réelle du fluide. Pour les deux phases liquide et gazeuse, elles sont données par (Bhagwat et Ghajar, 2012) :

$$U_l = \frac{u_l}{1-\varepsilon} \quad (I.10)$$

$$U_g = \frac{u_g}{\varepsilon} \quad (I.11)$$

C. Vitesse de glissement

C'est la vitesse relative de la phase gazeuse par rapport à la phase liquide (Hills,1976). « Dans le cas d'un écoulement diphasique ». Elle est donnée par :

$$Us = u_g - u_l \quad (I.12)$$

I.9.7-Rapport de glissement

C'est un paramètre hydrodynamique qui relie le mouvement des deux phases. Il est donné par le rapport de la vitesse superficielle du gaz à celle du liquide par la relation suivante :

$$S = \frac{U_g}{U_l} \quad (I.13)$$

Où

U_g : vitesse superficielle du gaz ;

U_l : vitesse superficielle du liquide.

Si par exemple $S=1$, donc l'écoulement est homogène, en pratique il peut être considéré comme un écoulement monophasique et le taux de vide global peut être confondu avec le taux de vide volumétrique.

I.9.8-Gradient de pression

Le gradient de pression le long d'une colonne dans le cas d'un écoulement diphasique ascendant est la somme de trois termes liés à la gravitation (ΔP_g) , à l'accélération (ΔP_{acc}) et les pertes de charges par frottements (ΔP_{fr}) :

$$\Delta P = \Delta P_g + \Delta P_{acc} + \Delta P_{fr} \quad (I.14)$$

I.9.9-Masse volumique du mélange diphasique

C'est la moyenne des masses volumiques de la phase gazeuse et liquide rapportée aux fractions occupées par chaque phase:

$$\rho_m = \varepsilon \rho_g + (1 - \varepsilon) \rho_l \quad (\text{I.15})$$

ρ_m : La masse volumique du mélange diphasique ;

ε : Le taux de vide global ;

ρ_g : La masse volumique de la phase gazeuse ;

ρ_l : La masse volumique de la phase liquide.

I.10-Revue bibliographique

Dans la partie qui va suivre nous tentons de donner une petite synthèse bibliographique des travaux de la littérature concernant la géométrie de la colonne, les régimes d'écoulement et les effets du diamètre sur le fonctionnement du système airlift.

Plusieurs paramètres permettent de contrôler la construction de l'installation airlift comme la vitesse du gaz, le débit...ect. D'autres facteurs peuvent aussi rentrer en ligne de compte, tels que les caractéristiques des fluides, la géométrie de la colonne, son diamètre, sa hauteur, son inclinaison...ect.

Ainsi, la géométrie de la colonne à travers sa hauteur et son diamètre est déterminante dans la fonction de transfert et dans la fonction de transport, car les vitesses de déplacement des fluides et les pertes de charge associées sont fonction de ses singularités géométriques.

Nicklin (1963) propose un modèle théorique dont les effets d'entrée sont négligés. Il utilise la théorie classique des écoulements diphasiques et suppose un écoulement à poches. Une corrélation issue du modèle à écart de vitesses (*drift-flux model*) pour prédire le taux de vide global. Il s'est avéré que sa corrélation est fiable en régime à poches. L'augmentation du rendement s'obtient en utilisant les colonnes de faibles diamètres selon lui. Néanmoins, dans la littérature, on suppose que le modèle de Nicklin (1963) convient au système de pompage airlift de petites hauteurs lorsque la variation de la densité n'a pas été prise en compte et les pertes de charges deviennent significatives pour des diamètres inférieurs à 10 mm.

Reinemann et al. (1990) se sont intéressés à l'effet du diamètre dans leurs recherches sur les performances d'un système airlift. Ils disent que quand le diamètre de la colonne est inférieur à 20 mm la tension superficielle produit un effet. Pour un nombre de Reynolds inférieur à 500, ils ont conclu que le bouchon liquide se caractérise par un profil turbulent et que la théorie de Nicklin (1963) peut être appliquée à une gamme allant de 3 à 20 mm en tenant compte de l'effet de la tension superficielle.

Kumar et al. (2003) ont fait une étude expérimentale sur un système airlift avec une colonne de forme conique. Ils ont fait l'étude pour 3 angles de conicité de 0°, 0,5° et 1°. Ils ont conclu que la colonne conique à faible diamètre est d'une meilleure performance par rapport à un système ordinaire.

Zakari et al., (2016), ont réalisé une étude expérimentale sur un système airlift avec une colonne à élargissement progressif (conique). Ils ont utilisé pour différentes hauteurs de plongées allant de 0,55 à 0,82, une colonne sous forme conique d'une hauteur de 6 m et des diamètres d'entrée et de sortie de 60 mm et 200 mm respectivement. Les auteurs ont constaté que le rendement des systèmes de type conique est de 40 % plus supérieur à celui de type ordinaire et ce, après comparaison de leurs résultats avec ceux obtenus par Tighzert et al. (2013) avec une colonne de diamètre constant de 33 mm.

Mahrous (2013) a également mené une étude pour étudier numériquement l'effet de l'élargissement progressif de la colonne en aval de la section d'injection d'air. Il a affirmé que cette méthode réduirait la transition vers un écoulement annulaire ; comme l'ont conclu Kassab et al. (2001, 2009). De plus, il a constaté que le positionnement d'une colonne avec une augmentation progressive de son diamètre plus près de la zone d'injection améliorerait considérablement le débit de liquide de la pompe airlift, ce qui est en accord avec Kassab et al. (2007) et Kouremenos et Staicos(1985). De plus, Mahrous(2013) a indiqué que l'augmentation du degré d'expansion de la section élargie, tend à améliorer les performances de la pompe.

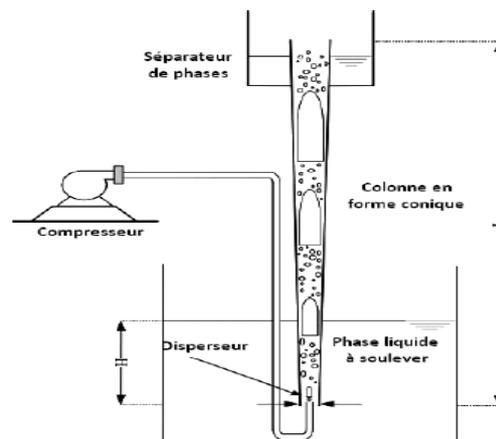


Figure I.11: Système de pompage airlift en forme conique (Kumar et al., 2003 ; Mahrous, 2013b)

Mahrous (2013a) a mené une étude concernant l'effet de la configuration géométrique du riser sur la performance d'un système airlift. Il a proposé un modèle numérique qui consiste à améliorer les performances d'un système airlift en introduisant une déformation le long du riser qui consiste en un coude en forme de S. Dans son modèle il propose l'élargissement progressif de la section afin de réduire les pertes de charge dues à ce coude. La position de ce coude par rapport au point d'injection ne présente aucun effet, souligne-t-il.

Fujimoto et al. (2004), ont aussi mené une étude expérimentale dans le même objectif, dans laquelle le riser est doté d'un coude de même forme S. Il a été conclu qu'une telle déformation influe négativement sur la performance du système d'autant plus que si celle-ci est installée au-dessous du point d'injection.

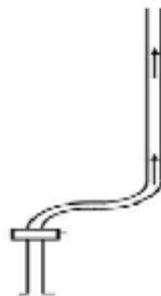


Figure I.12: Colonne en forme S d'un système pompage airlift (Fujimoto et al., 2004)

François et al. (1996) ont mené une étude analytique et expérimentale sur un système airlift de grandes dimensions ($L = 21\text{ m}$ et $D = 14\text{ cm}$). Pour but de concevoir un système efficace utilisable pour décontaminer les eaux souterraines des composés organiques volatils. La confrontation de leurs résultats expérimentaux avec les modèles existant dans la littérature (Stenning et Martin, 1968 ; Clark et Dabolt, 1986 ; Reinemann et al., 1990 ; Nicklin, 1963) s'est avérée sans profit. Donc les auteurs ont établi un nouveau modèle analytique inspiré des équations de l'écoulement diphasique et du modèle à écart de vitesses. Le modèle tient compte de tous les termes qui interviennent dans l'expression du gradient de pression. Les auteurs soutiennent que leur modèle est validé pour le pallier inférieur au maximum du rendement mais requiert certaines conditions opératoires pour son application, à savoir diamètre de la colonne qui doit être compris entre 10 et 25 cm et une gamme de hauteur de plongée allant de 0,3 à 0,7.

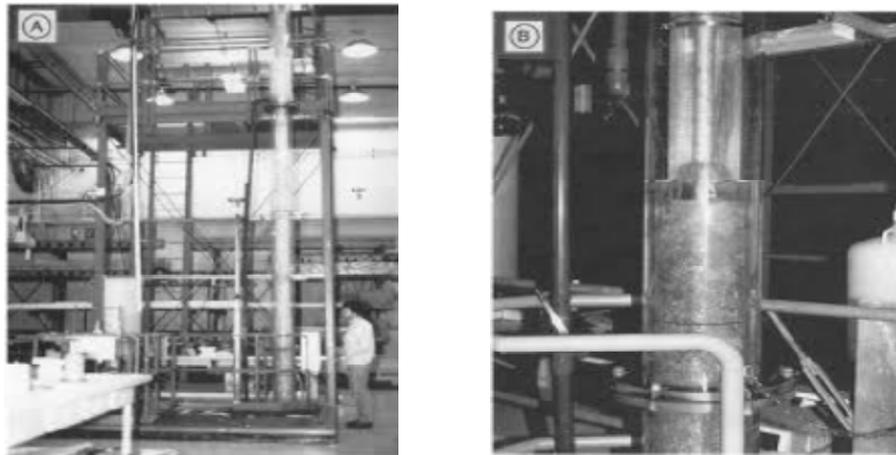


Figure I.13: Dispositif expérimental de François et al. (1996)

La performance d'un système airlift dans diverses conditions géométriques et de fonctionnement a été largement étudiée expérimentalement par Kassab et al. (2009). Des expériences ont été réalisées pour neuf hauteurs de plongée et trois longueurs de colonnes avec différentes pressions d'injection d'air. De plus, il a étudié l'effet de la longueur de la colonne en gardant la même hauteur de plongée, sur les performances de la pompe. Les différents régimes d'écoulement et la transition des schémas d'écoulement ont été observés et enregistrés.

Dabolt et Plummer (1980) ont examiné une large gamme de données sur le système airlift dans la gamme de 12 à 50 mm de diamètre pour une application liée aux combustibles nucléaires.

Sharma et Sachdeva (1976) ont étudié les facteurs qui affectent les performances du système airlift à grand diamètre fonctionnant à faible profondeur de liquide. Ils ont établi un lien entre les performances du système et les régimes d'écoulements dans le riser. Par ailleurs, De Cachard et Delhay (1996) ont montré expérimentalement que le régime d'écoulement dominant dans le cas d'un système de faible diamètre est régime à poches.

Ohnuki et Akimoto (1996) ont constaté dans leur étude expérimentale sur le développement de l'écoulement diphasique dans une colonne de grand diamètre (environ 4 fois le rapport longueur/diamètre) que l'écoulement passe du régime à bulles au turbulent baratté. L'écoulement à poches n'a pas pu être observé malgré l'utilisation de deux méthodes d'injection différentes.

Cheng et al., (1998) , dans la même remarque, lors de leur étude sur les mécanismes de transition du régime à bulles au régime à poches pour différents diamètres, il ont observé une transition directe de régime à bulles vers le régime turbulent baratté sans passer par le régime à poches dans le cas d'une colonne de diamètre 150mm.

Vial et al., (2000, 2001) écrivent que le régime à poches est un régime typique aux colonnes de petits diamètres. Cependant, Guet et al., (2002) prétendent que c'est la méthode d'injection du gaz qui est responsable de la nature du régime. Par ailleurs, certains auteurs (Taitel et al., 1980 ; Duckler et Taitel, 1986) considèrent que le régime turbulent baratté comme une transition vers le régime à poches.

Hjalmar (1973) dans son étude a montré que l'instabilité commence au bout de 30 à 40 fois le diamètre de la colonne. Apazidis (1985) a constaté que la taille des bulles peut avoir un effet sur la performance. Cet auteur pense que le diamètre et la longueur de la colonne influe sur l'inertie du fluide et par conséquent la stabilité de l'écoulement. De Cachard et Delhay (1997) ont lié l'instabilité de l'écoulement et l'oscillation ondulatoire dans la section d'écoulement diphasique à la compressibilité du gaz.

Hanafizedeh et al (2011 b), ont réalisé une étude avec des tubes de différents diamètres 2, 3 et 4 mm. Cette étude a montré que les régimes se présentent sous le même aspect sans aucune différence pour cette gamme de diamètre. Les auteurs proposent une carte d'écoulement qu'ils ont testé avec quelques autres travaux. Leurs résultats montrent que le régime annulaire apparaît à de faibles vitesses superficielles d'air en comparaison à d'autres conditions opératoires où ce régime apparaît à de très hautes vitesses.

Hanafizadeh et al.(2011a) dans une autre étude, ont procédé à une étude expérimentale et une analyse par imagerie en utilisant une caméra ultra-rapide (1200 images/seconde) pour caractériser les régimes. L'étude expérimentale a été réalisée avec une colonne de 50mm de diamètre et 6m de longueur. Les quatre régimes (à bulles, à poches, turbulent baratté et annulaire) ont été observés, décrits et projetés sur la carte d'écoulement de Hewitt et Robert (1969) pour une gamme de hauteurs de plongée allant de 0,25 à 0,75. Les auteurs ont constaté que le fonctionnement optimal correspond aux régimes à poches. Les photographies prises pour les régimes ont fait l'objet d'un traitement numérique approfondi. Cependant, il a été constaté que les conclusions du travail ne se rapportent nullement au traitement d'image effectué.

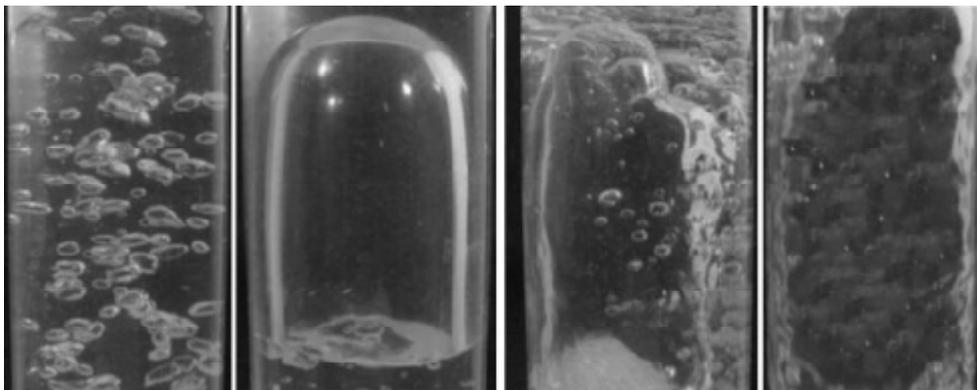


Figure I.14: Régimes d'écoulements observés par Hanafizadeh et al. (2011a)

Chapitre II

Dispositif expérimental et techniques de mesures

Ce second chapitre est consacré à la description de l'installation expérimentale qui a servi pour l'obtention des données que nous avons traitées. Nous décrivons soigneusement les éléments qui la composent, son principe de fonctionnement ainsi que les techniques de mesures utilisées.

II.1-Présentation de l'installation

Le dispositif expérimental dont le schéma est donné sur la figure (II.1) 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:

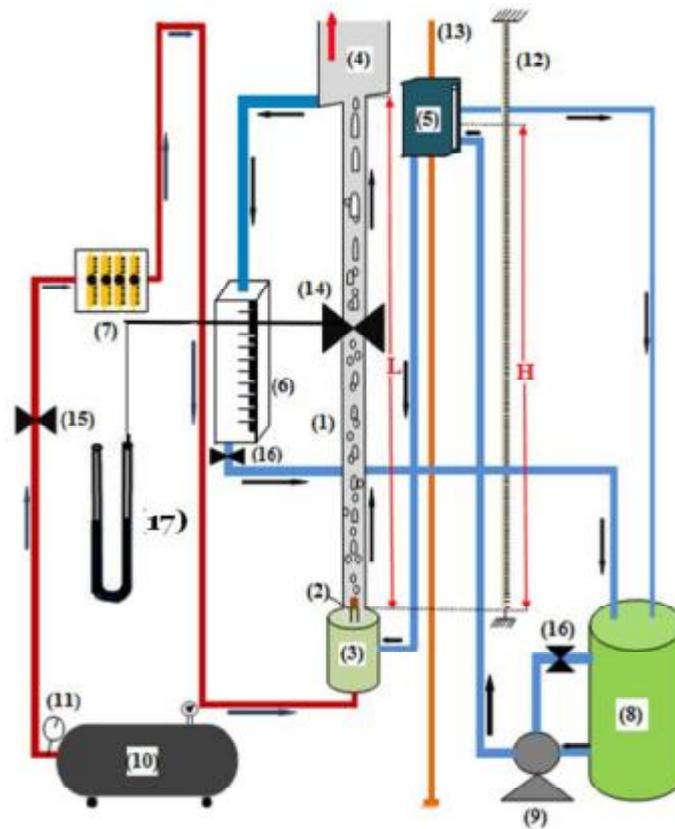


Figure II.1 : Schéma de l'installation expérimentale (Yousfi & Soualah,2018)

- (1) :Colonne ; (2) : Disperseur ; (3) : Section de transit ; (4) : Séparateur de phases; (5) Bac coulissant; (6) : Bac gradué ; (7) : Débitmètres à air ; (8) : Réservoir d'eau ; (9) : Pompe à eau ; (10) : Compresseur ; (11) : Régulateur de pression ; (12) :Règle graduée ; (13) : Support ; (14) :Vanne du taux de vide ; (15) : Vanne à gaz pour le taux de vide; (16) : Vanne ; (17) : Manomètre à eau.

a. Colonne (Riser)

La colonne ou *le riser* est un tube cylindrique en plexiglas dont la transparence permet la visualisation de l'écoulement dans cette colonne posée verticalement est d'une longueur de 1,62 m et d'un diamètre intérieur de 50 mm.

b. Vannes du taux de vide

La mesure du taux de vide global a été effectuée par *la technique de vanne à fermeture rapide*. Cette technique consiste à piéger le liquide en coupant simultanément l'alimentation en gaz et en liquide à un certain niveau de la colonne. Pour cela, dans le cas du présent dispositif expérimental, la vanne coupant l'alimentation en eau est placée au milieu de la colonne (à 810 mm de hauteur). Elle est fabriquée en PVC et elle se ferme à demi-tour d'une façon hermétique. La deuxième vanne servant pour la coupure de l'alimentation en air est une vanne à gaz qui se ferme de la même façon à demi tour (voir les figures II.1 et II.2).



Figure II.2: Vannes du taux de vide

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

c. Section de transit

C'est le dispositif cylindrique qui sert de transit pour la phase liquide lors du remplissage de la colonne, pièce en téflon de diamètres intérieur 120 mm qui est fixé sur le support de la structure métallique et sur laquelle la colonne est montée. Cet élément possède trois orifices dont les deux premiers sont de diamètre assez grand 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. La section dispose aussi d'une sortie conçue pour la vidange de la colonne et son nettoyage.

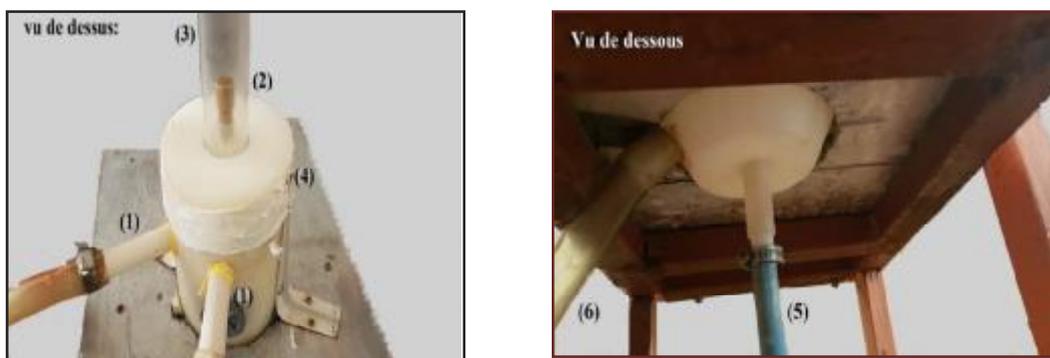


Figure II.3: Section de transit

- (1) : Alimentation en phase liquide ; (2) : Disperseur ;
 (3) : Colonne ; (4) : Section de transit ;
 (5) : Alimentation en air ; (6) : Orifice pour la vidange

d. Disperseur

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 80 trous de 1 mm de diamètre moyen.

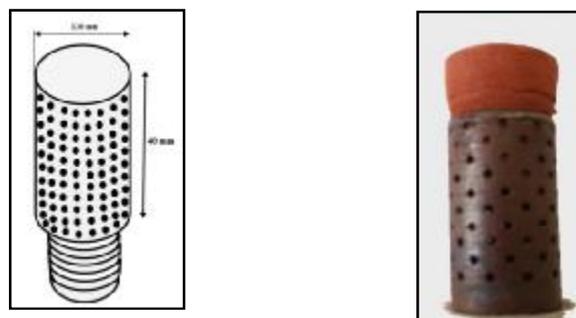


Figure II.4: le disperseur utilisé

e. Séparateur de phases

C'est un bac parallélépipédique ouvert et 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. Le bac est suffisamment profond pour éviter l'entraînement du liquide vers l'extérieur. Il est doté d'un fond incliné 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 II.5 : Séparateurs de phases

f. Downcomer (tube descendant)

La traduction littérale du mot est « *le tube descendant* ». Parce qu'il est siège d'un écoulement descendant. C'est-à-dire il achemine la phase liquide revenant du séparateur. Dans notre cas c'est le tube lié au séparateur de phases qui permet de récupérer la phase liquide dans le bac conçu pour cette mesure (voir les figures II.10).

g. Bac coulissant

Ce bac est fabriqué à partir du zinc et il a une forme parallélépipédique de dimension 30x15x15cm. Il est utilisé pour varier la hauteur de plongée durant les expériences. Le bac est fixé sur une tige métallique verticale sur la structure métallique parallèle à une règle graduée. La variation de la hauteur de plongée se fait par le glissement du bac à la position désirée (hauteur choisie). La colonne se remplit au même niveau de cette position par le principe de vases communicants. Il dispose d'une entrée pour son alimentation en phase liquide et deux sorties pour envoyer le fluide reçu à la section de transit. En vue de contrôler

l'alimentation, le bac est muni d'un indicateur de niveau et d'une sortie reliée au réservoir principal en cas de débordement ou d'excès du liquide.

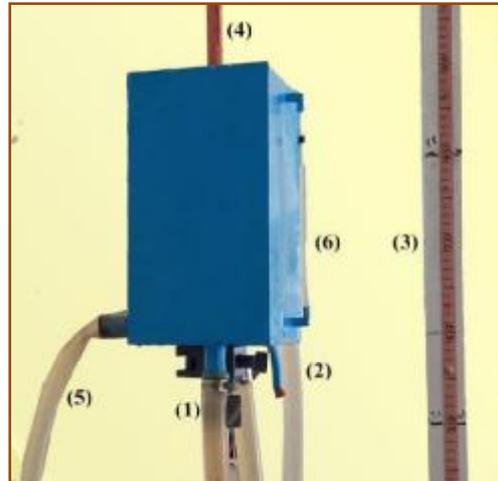


Figure II.6:Bac coulissant

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

h. Compresseur

L'alimentation en air est assurée par un compresseur à air de marque Iuowei, ayant une capacité de 100 litres et une pression maximale atteignant 8 bars. Le compresseur est muni d'un manomètre permettant de manipuler facilement la pression opératoire. La gamme de pression durant les expériences a été variée de 0,1 à 0,2 bar. L'air sortant du compresseur est acheminé à travers un tuyau à gaz, traversant quatre débitmètres pour parvenir au disperseur.



Figure II.7 : Compresseur

i. Débitmètres à air

Afin de balayer une gamme suffisante du débit et pour contrôler et varier la vitesse d'air, quatre débitmètres à flotteurs, sont installés en parallèle (voir la figure II.8). En fonction du besoin, le débit total qui alimente la colonne est obtenu en faisant la somme des valeurs affichées par chaque débitmètre.



Figure II.8 : Débitmètres à air montés en parallèle

j. Hauteur de plongée

La hauteur de plongée dans un travail expérimental est une façon de simuler le niveau de la phase liquide dans la réalité (puits, réacteurs, océans...). C'est un paramètre essentiel auquel est liée la performance et l'hydrodynamique d'un système airlift. On la définit comme étant la fraction immergée de la colonne. Donc elle est donnée par le rapport (H) à la longueur totale de la colonne (L). Le choix d'une hauteur de plongée se fait en changeant la position du bac coulissant sur la tige qui lui sert de support (voir figure II.9). Dans le cadre de ce travail, il a été varié de 0,4 jusqu'à 0,9.

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

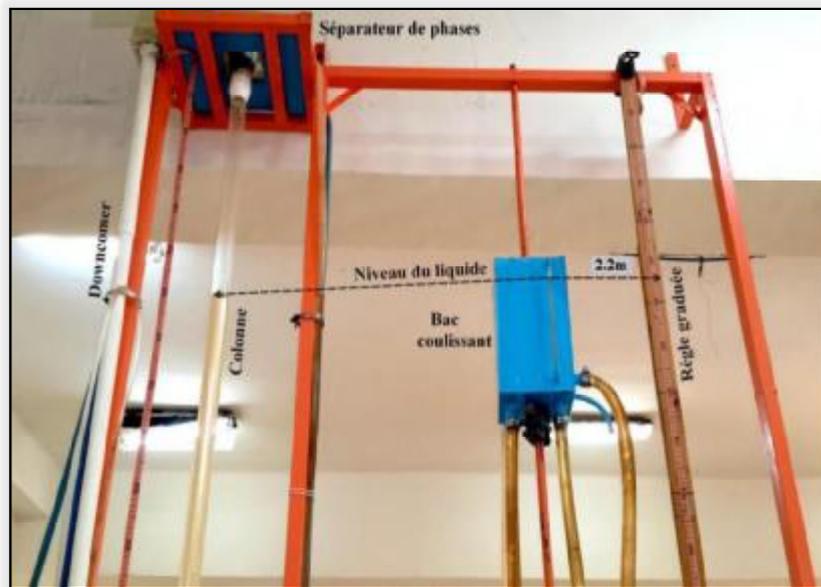


Figure II.9: Exemple du choix de la hauteur de plongée

II.2- Alimentation en eau

L'alimentation est assurée par une pompe qui aspire le liquide à partir d'un réservoir (30x30x50cm). Le liquide est refoulé à travers des conduites transparentes jusqu'au bac coulissant et de là envoyé vers la section de transit. Le liquide circule en boucle externe, traversant le riser, le séparateur de phases et le downcomer pour finir dans le réservoir du départ de sorte qu'elle forme un circuit fermé.

II.3-Alimentation en air

Pour l'alimentation en air, un compresseur à air est utilisé, de la marque Iuowei ayant une capacité de 100 litres et une pression d'injection maximale de 8 bars. Le compresseur est muni d'un manomètre pour faire varier la pression d'injection. L'air qui sort du compresseur est acheminé à travers un tuyau à gaz en passant par quatre débitmètres placés en parallèle arrivant au disperseur. Durant les expériences la pression d'injection a été variée de 0,1 à 0,2 bar.

Afin d'éviter le retour d'eau au compresseur, le tuyau à gaz doit passer au-dessus du séparateur de phases.

II.4- Principe de fonctionnement de l'installation

La première étape consiste à allumer le compresseur et le laisser charger jusqu'à 8 bars. Puis fixer le bac coulissant à la position de la hauteur de plongée désirée. Une fois la hauteur de plongée choisie, on met en marche la pompe. L'eau est refoulée jusqu'au bac coulissant pour être renvoyée à la section de transit par le principe des vases communicants (principe hydrostatique). 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 l'air n'est pas encore injecté. L'excès du liquide dans le bac coulissant est renvoyé à travers une conduite vers le réservoir principal.

La seconde étape, une fois le compresseur est chargé, il faut fixer la pression d'injection d'air et choisir un débit d'air. Le débit d'air a été varié de 700 jusqu'à 7000 l/h. À partir d'un certain débit d'air, un écoulement diphasique avec des régimes différents se développe le long de la colonne jusqu'à l'entraînement de la phase liquide. L'augmentation du débit d'air fait entraîner la phase liquide jusqu'au séparateur de phases où le gaz est évacué vers l'extérieur et le liquide acheminé à travers un downcomer vers le bac gradué conçu pour la mesure du débit. Les mesures effectuées sont :

- Visualisation et caractérisation des régimes ;
- Mesure du débit de la phase liquide ;
- Mesure du débit minimum d'injection ;
- Mesure du taux de vide ;
- Mesure du gradient de pression le long de la colonne.

II.5-Techniques de mesures

II.5.1- Mesure du débit minimum d'injection

C'est la détermination du débit d'air minimum pour amorcer le pompage pour une hauteur de plongée donnée.

II.5.2-Mesure du débit de la phase liquide

C'est la quantité du liquide entraînée dans l'écoulement diphasique par unité de temps. Pour la mesurer, nous avons utilisé un bac gradué (6) relié au downcomer et un

chronomètre afin de déterminer le temps nécessaire pour recueillir un volume compris entre deux graduations du bac de mesure en fermant la vanne (16).

$$Q_l = \frac{V}{t} \quad (\text{II.2})$$



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

II.5.3 -Mesure du taux de vide

Pour la mesure du taux de vide global, nous avons suivi les recommandations de la littérature (Bgawat et Ghajar, 2012 , Kawanishi et al.,1990 ; Yijun et Rezkallah, 1993). En raison de sa disponibilité et de sa précision, le choix à porté sur *la technique de vanne à fermeture rapide*. Le principe de la technique consiste à fermer les deux vannes (14) et (15) sur la figure (II.1) simultanément. À l'instant qui suit la fermeture des deux vannes les volumes retenus en amont de la vanne sont notés. Le taux de vide global le long de toute la colonne est rapporté par rapport à la somme des deux volumes retenus. De là on détermine la fraction du liquide dans le mélange diphasique ce qui permet de déduire la fraction du gaz. Comme la section de la colonne est constante, l'expression du taux de vide global peut être donnée par la hauteur du liquide et hauteur mouillée :

$$\varepsilon = 1 - \frac{H_l}{H_m} \quad (\text{II.3})$$

H_l : Hauteur de la phase liquide (hauteur du liquide retenu) ;

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

II.6- Caractérisation et visualisation des régimes

Nous avons pu retrouver quelques photos et vidéos prises par les auteurs des expériences ce qui nous a permis d'avoir un aperçu sur la structure des régimes. Dans le chapitre III, nous avons présenté quelques photographies montrant les régimes d'écoulement obtenus.

II.7-Mesure et calcul du gradient de pression

A partir de la mesure de la perte de pression nous avons calculé le gradient de pression au-delà de la vanne qui a servi pour taux de vide. Pour ce faire, un manomètre à eau a été utilisé. L'une des branches du manomètre est branchée à une prise de pression située à la sortie de la vanne (14) et la seconde est laissée libre dans l'atmosphère. La perte de pression en pascal est calculée par rapport la masse volumique de l'eau par :

$$\Delta P_v = \rho_e g \Delta H \quad (\text{II.4})$$

Avec :

ΔP_v : pertes de pression au-delà de la vanne (16) (Pa) ;

ρ_e : masse volumique de l'eau (kg/m^3) ;

ΔH : lecture sur le manomètre (m) ;

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2).

Chapitre III

Résultats et discussions

Dans ce troisième chapitre, nous présentons et traitons les résultats obtenus par le dispositif expérimental décrit précédemment. Il s'agira de présenter l'évolution du débit de la phase liquide en fonction du débit d'air pour diverses hauteurs de plongée. Nous présentons également l'évolution du taux de vide, le rapport de glissement, le rendement ainsi que d'autres paramètres que nous avons jugés utiles.

III.1-Régimes d'écoulement obtenus

Au cours des expériences, les auteurs de ces dernières ont pris des photos et des vidéos pour divers débits d'air et différentes hauteurs de plongée. Ils ont noté que trois régimes distincts ont été observés : le régime à bulles, le régime à poches et le turbulent baratté. Le régime annulaire ne l'ont pas atteint. En effet, ce régime nécessite de grands débits d'air et pour éviter le risque d'endommager la colonne, les expériences dans ce sens n'ont pas été effectuées. Selon les observations de ces auteurs en résumant leurs notes et en s'appuyant sur l'analyse des vidéos prises, on peut donner la description ci-après :

A. Le régime à bulles

Ce régime se caractérise par une dispersion de petites bulles d'une façon assez dense et homogène le long de toute la colonne. En augmentant le débit, la coalescence de ces bulles peut être observée. C'est de cette coalescence que le régime à poches naîtra (figure III.1).



Figure III.1 : Photographie du régime à bulles obtenus par les auteurs

B. Le régime à poches

C'est la coalescence des petites bulles qui donne naissance à de petites poches. Des amas de bulles commencent à se former, puis une légère augmentation du débit d'air conduit à la formation de poches qui s'allongent au fur et à mesure qu'elles évoluent le long de la colonne. Les poches observées sont identiques à celles décrites dans la littérature (Nicklin, 1963 ; Kassab et al.,2009, Hanafizadeh et al.,2011) : elles sont de forme ovale en aval et irrégulièrement aplatie en amont avec un sillage parsemé de fines bulles, siège de zone de recirculation liquide. Les bouchons liquides séparant les poches sont parsemés aussi de bulles fines plus au moins dense. L'espace séparant la paroi et les poches est occupé par un film liquide dont le sens de l'écoulement est orienté vers le bas. Les poches naissent avec des longueurs relativement petites (2 à 5 cm) mais la collision entre elles fait naître de nouvelles poches plus longues (figure III.2).



Figure III.2 : Photographie du régime à poches obtenus par les auteurs

C. Le régime turbulent baratté

Il apparait en augmentant le débit d'air après l'établissement du régime à poches. Il se produit par la rupture des poches qui ne peuvent plus se maintenir en forme. C'est le régime le plus désordonné et le plus anarchique. Figure (III.3).



Figure III.3 : Photographie du régime turbulent baratté obtenus par les auteurs

III.2-Débit de la phase liquide

Sur la figure (III.4) nous avons représenté l'évolution du débit de la phase liquide en fonction du débit d'air pour la hauteur de plongée $H_p=0,7$. La figure montre que l'évolution du débit de la phase liquide peut être divisée en trois phases différentes. La première phase correspond à la partie de la courbe où il n'y a aucun point. Pour cette gamme de débit d'air, il n'y a eu aucun pompage. Le débit d'air n'était pas assez suffisant pour faire parvenir le liquide au séparateur de phases. C'est la phase sans pompage. Au cours des expériences le régime à bulles et le transitoire vers le régime à poches ont été observés.

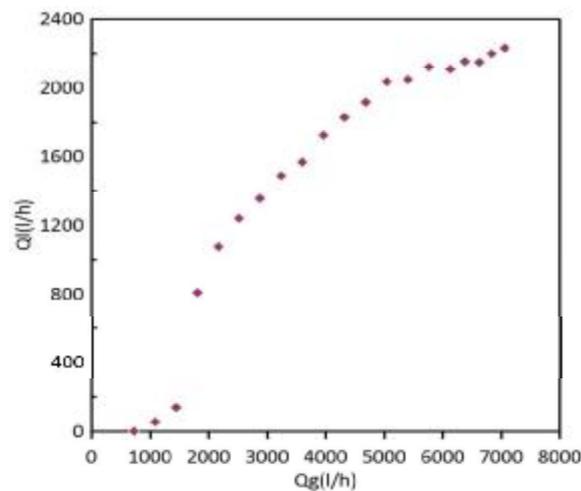


Figure III.4: Evolution du débit de la phase liquide en fonction du débit de la phase gazeuse pour $H_p=0,7$

La seconde phase correspond à la gamme de débit d'air allant de 720 à 5000 l/h. En cette phase, le débit de la phase liquide augmente d'une façon sensible. Lors des expériences, les régimes observés sont le régime à poches et le transitoire vers le turbulent baratté. Au cours de cette phase, on constate des coupures dans l'évolution de la courbe. Ceci a été associé visuellement (les auteurs des expériences) à l'établissement du régime à poches.

Au-delà de $Q_g=5000$ l/h une cassure se produit au niveau de la courbe. Le débit de la phase liquide a tendance à se stabiliser. Cette troisième phase correspond au régime turbulent baratté.

III.2.1- Effet de la hauteur de plongée

Pour étudier l'effet de la hauteur de plongée nous avons représenté dans la figure (III.5) l'évolution du débit de la phase liquide en fonction du débit d'air pour cinq hauteurs de plongée allant de $H_p = 0,4$ à $H_p = 0,8$.

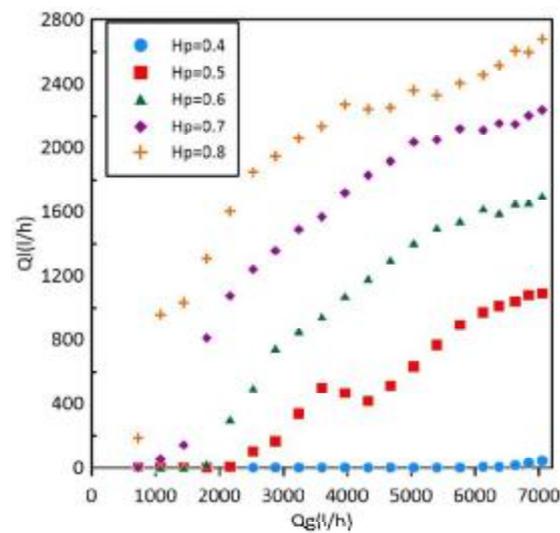


Figure III.5 : Effet de la hauteur de plongée sur le débit de la phase liquide

La figure (III.5) montre que le débit de la phase liquide augmente avec l'augmentation de la hauteur de plongée. On constate que la hauteur de plongée produit un effet positif sur le débit de la phase liquide. Ce résultat concorde avec les travaux de la littérature (Kassab et al., 2009 ; Hanafizadeh et al., 2011 ; Tighzert et al., 2013). Nous constatons également que les trois phases d'évolution citées précédemment caractérisent toutes les hauteurs de plongées étudiées.

III.3- Débit minimum d'injection

On rappelle que le débit minimum d'injection c'est le débit du gaz qui correspond à l'arrivée des premières gouttes de liquide au bac gradué. En d'autres termes, c'est le débit minimum du gaz nécessaire pour amorcer le pompage de la phase liquide. Pour étudier ce paramètre, la mesure de ce débit minimum a permis d'illustrer sur la figure (III.6) son évolution en fonction de la hauteur de plongée avec un pas relativement raffiné. La hauteur de plongée a été variée de 0,4 à 0,9.

La figure (III.6) montre que le débit minimum du gaz en fonction de la hauteur de plongée suit une évolution caractérisée par deux phases distinctes :

La première correspond à la gamme allant de $H_p = 0,4$ à $0,55$. En cette phase on constate que les valeurs du débit minimums sont suffisamment éloignées les unes des autres de sortes que l'évolution tend à être exponentielle. Pour les trois premières hauteurs, le débit minimum décroît de 5155 à 3100 l/h avec des écarts très importants.

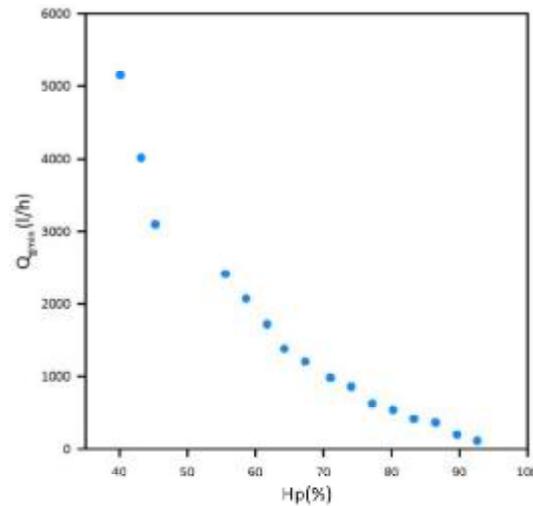


Figure III.6 : Evolution du débit minimum d'injection en fonction de diverses hauteurs de plongée

La deuxième phase correspond à la gamme au-delà $H_p=0,55$ où le débit minimum poursuit sa décroissance avec des écarts relativement faibles et presque réguliers. Pour les hauteurs de plongée très grandes ($H_p>0,75$) le débit minimum tend à suivre une évolution quasi linéaire.

III.4-Rendement

Pour chaque expérience menée, nous avons utilisé l'équation établie par Nicklin (1963) selon laquelle le rendement (η) du pompage est calculé comme étant le rapport du travail utile fourni à l'eau pour la soulever à une hauteur de $(L - H)$ et l'énergie développée par l'air comprimé sous forme d'une expansion isotherme, de la pression d'injection P_{inj} à la pression atmosphérique P_a :

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

Où

Q_L : débit de la phase liquide en (m^3/s) ;

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

P_{inj} : pression de l'air à l'injection en (Pa) ;

ρ_l : masse volumique de la de la phase liquide en $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$;

P_a : pression atmosphérique(Pa);

H : portion de la colonne immergée en (m);

L : longueur de la colonne en (m).

Sur la figure (III.7), nous avons représenté l'évolution du rendement (η) en fonction du débit d'air pour une hauteur de plongée égale à $H_p=0,6$. On constate que le rendement augmente avec l'augmentation du débit d'air d'une façon sensible jusqu'à atteindre une zone où les valeurs tournent autour d'une valeur maximale de 0,15 qui correspond à un débit d'air de 2880 l/h. Il faut noter que cette valeur maximale ne correspond pas au débit maximal de la phase liquide. Ceci est bien illustré par la figure (III.8). La deuxième étape commence à partir de ce maximum et elle s'étale sur une gamme de débit d'air (allant de 2880 à 5040 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 0.095.

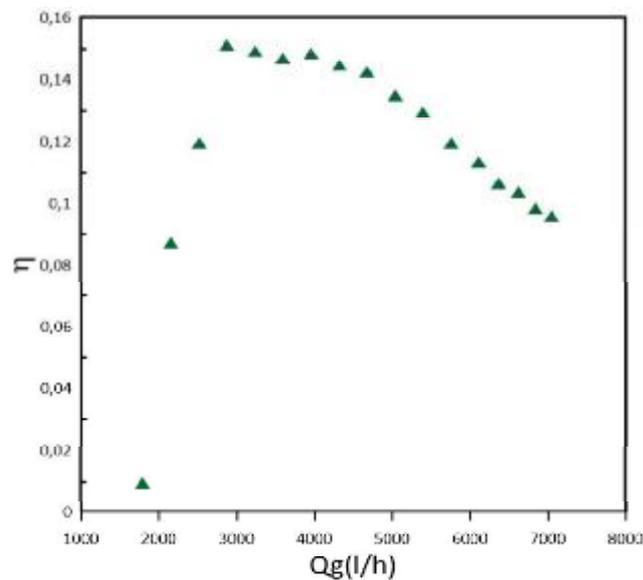


Figure III.7 : Evolution du rendement en fonction du débit d'air pour la hauteur de plongée $H_p=0,6$

Revenons à la figure (III.8). Sur cette figure il s'agit de la confrontation du rendement et du débit de la phase liquide pour la même hauteur de plongée et la même gamme de débit d'air. Comme nous l'avons noté ci-haut, le maximum du rendement ne coïncide pas avec le maximum du débit de la phase liquide. Ceci est vérifié avec toutes les hauteurs de plongée que nous n'avons pas représentées ici. Quoique la quantité de liquide récupérée augmente au-delà du maximum du rendement, du point de vue énergétique, le système fonctionne au-delà de ses capacités optimales, puisque les grands débits de la phase liquide correspondent à de très faibles valeurs du rendement. On retient donc, que le maximum du débit de la phase liquide ne reflète en aucun cas les conditions optimales du fonctionnement d'un système de pompage airlift.

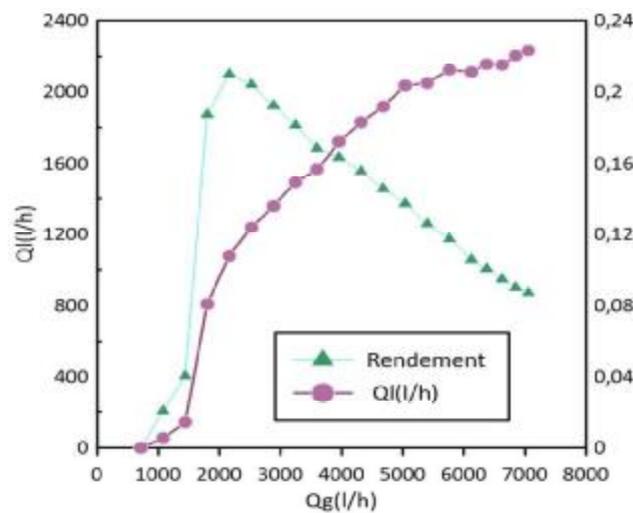


Figure III.8 : Confrontation du rendement et du débit de la phase liquide

Pour l'étude de l'effet de la hauteur de plongée sur le rendement, sur la figure (III.9) nous avons représenté l'évolution du rendement en fonction du débit d'air pour des différentes hauteurs de plongée allant de 0,4 jusqu'à 0,8 avec un pas de 0,1. La figure montre que l'aspect de l'évolution du rendement est similaire pour toutes les hauteurs de plongée. Toutefois, on constate que jusqu'à $H_p=0,7$ la hauteur de plongée produit un effet positif : plus la hauteur augmente, plus le rendement augmente. Au-delà de $H_p=0,7$, l'effet de la hauteur de plongée s'inverse.

Par ailleurs, comme nous l'avons noté avec la hauteur de plongée présentée ci-haut, avec tous les cas de hauteurs étudiées, le rendement évolue suivant trois étapes différentes. En premier lieu, avec l'augmentation du débit d'air, le rendement augmente d'une façon très significative jusqu'à atteindre un maximum. La plus grande valeur atteinte est de 20.96 % pour la hauteur de plongée 0,7. Cette phase a été associée visuellement au régime à bulles et au régime à poches. En second lieu, lorsque le maximum est atteint le rendement s'étale sur un certain nombre de points : c'est la zone optimale du fonctionnement du système. Cette phase a été associée au régime à poches ou la transition vers le turbulent baratté. En dernier lieu, le rendement diminue sensiblement malgré l'augmentation du débit d'air. Visuellement, cette phase a été associée au régime turbulent baratté. Des résultats similaires sont obtenus par divers auteurs tels que (kasseb et al.(2001, 2009) ; khalil et al., 1999 ; Awari et al. 2007).

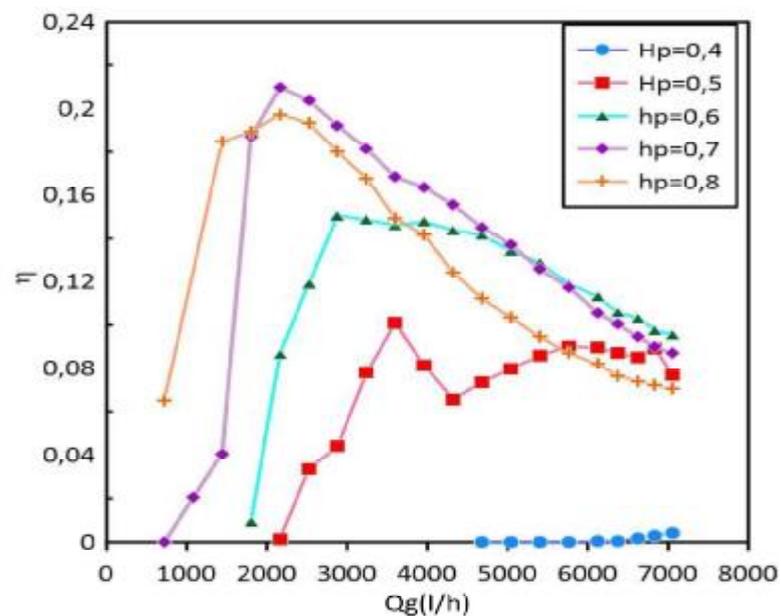


Figure III.9 : Effet de la hauteur de plongée sur le rendement

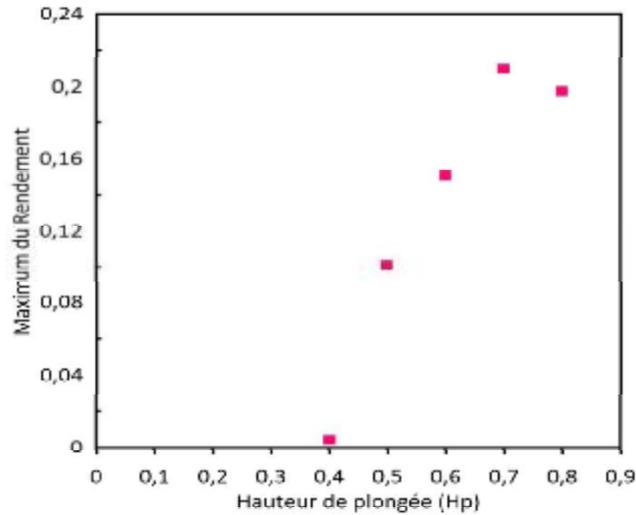


Figure III.10 : Evolution des maximums du rendement en fonction de la hauteur de plongée

La figure (III.10) montre que l'augmentation de la hauteur de plongée n'implique pas toujours l'augmentation du rendement au-delà d'un certain seuil. Il existe une fraction optimale au-delà de laquelle le rendement diminue en termes d'ordre de grandeur. Selon l'étude expérimentale de Tighzert et al.(2013), cette hauteur de plongée critique se situe autour de 0,75. Dans l'intervalle situé au-dessous de cette valeur les résultats montrent qu'effectivement le rendement croît avec la hauteur statique mais l'effet de cette hauteur de plongée est inversé au-delà la valeur critique.

III.5-Efficacité

Nous rappelons que l'efficacité est définie comme étant le rapport entre le débit de la phase liquide et le débit de la phase gazeuse, elle est souvent utilisée pour évaluer les performances du système airlift. L'efficacité a comme avantage de ne pas introduire les paramètres géométriques du système. Elle est donnée par :

$$E = \frac{\rho_l \cdot Q_l}{\rho_g \cdot Q_g} \quad (\text{III.2})$$

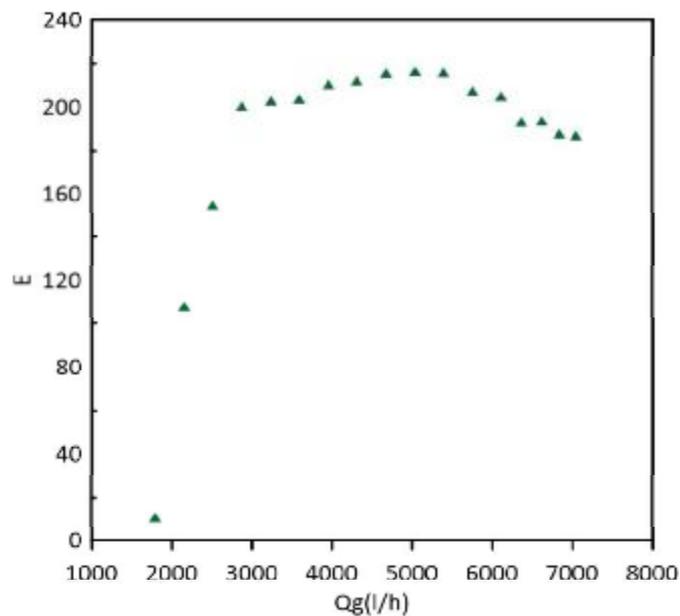


Figure III.11: Evolution de l'efficacité en fonction du débit d'air pour la hauteur de plongée $H_p=0,6$

La figure (III.11) représente l'évolution de l'efficacité en fonction du débit d'air pour la hauteur de plongée $H_p=0,6$. On constate que l'efficacité est nulle avant le début de pompage. Par contre dès que le pompage commence l'efficacité augmente d'une façon assez sensible jusqu'à atteindre la valeur maximale de $E_{\max} = 216,02$, cette partie de progression est associée au régime à bulles et au régime à poches. Ensuite elle diminue progressivement. L'aspect d'évolution de l'efficacité est similaire à celui du rendement.

Concernant l'effet de la hauteur de plongée, la figure (III.12) montre que l'efficacité évolue de la même manière pour toutes les hauteurs de plongées étudiées ($H_p= 0.4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0.7$ et $0,8$). C'est à dire la première étape correspond à une augmentation sensible jusqu'à atteindre un maximum avec un régime à bulles et un régime à poches puis une décroissance associée au régime turbulent. On remarque aussi que l'efficacité augmente avec l'augmentation de la hauteur de plongée. Contrairement au rendement, au-delà de $H_p=0,7$, l'efficacité continue à augmenter.

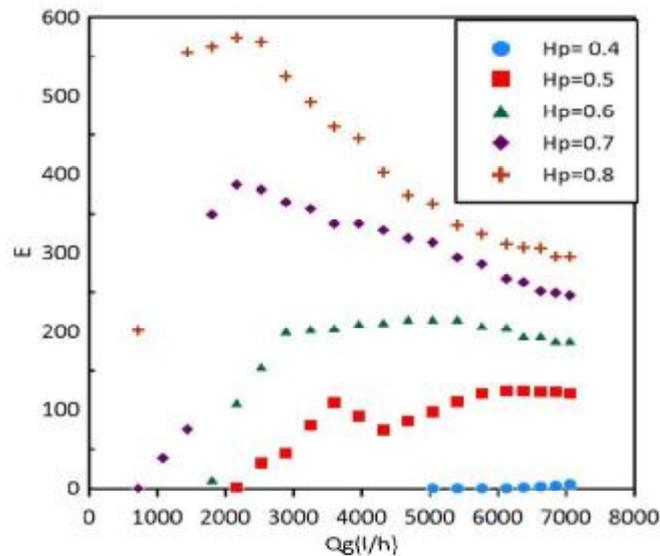


Figure III.12 : Evolution de l'efficacité en fonction du débit d'air pour diverses hauteurs de plongée

III.6- Taux de vide global

Rappelons que le taux de vide est défini comme étant la fraction occupée par le gaz dans un mélange diphasique. Nous rappelons également que la technique de mesure utilisée est la technique de vanne à fermeture rapide. Le taux de vide considéré, est relatif à la moyenne du volume de la phase liquide recueillie en amont et en aval de la vanne qui a servi pour cette mesure. Pour un débit d'air varié de 720 à 6000 l/h, les mesures ont été effectuées pour cinq hauteurs de plongée : 0,4, 0,5, 0,6, 0,7 et 0,8. Les valeurs du taux de vide sont obtenues en utilisant l'équation (II.3).

La figure (III.13) représente l'évolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour la hauteur de plongée $H_p=0,6$. On remarque que le taux de vide augmente avec l'augmentation du débit d'air d'une façon quasi linéaire, ceci est constatable pour la gamme du débit d'air allant de 720 jusqu'à 2500 l/h. Selon les notes des auteurs des expériences, cette gamme a été associée au régime à bulles et au régime à poches. Au delà de 2500 l/h le taux de vide continu à augmenter légèrement tout en fluctuant d'une façon un peu sensible. Les auteurs ont aussi noté que l'instabilité de l'écoulement s'accroît avec l'augmentation du débit d'air. Ceci est dû à la nature de l'écoulement diphasique. Du coup, l'instabilité de l'écoulement s'est reflétée sur les valeurs du taux

de vide obtenues. En effet, la mesure du taux de vide s'est avérée difficile si bien que les valeurs sont assez fluctuantes.

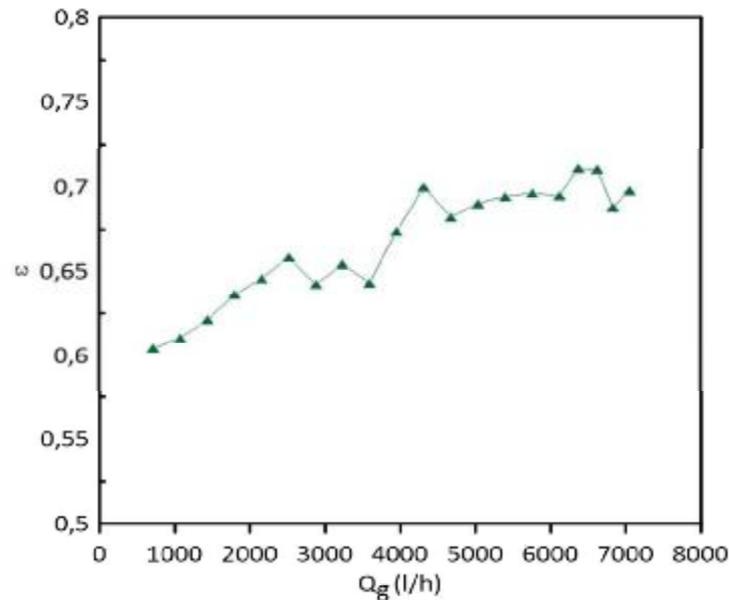


Figure III.13 : Evolution de taux de vide en fonction du débit d'air pour la hauteur de plongée $H_p=0,6$

Pour étudier l'effet de la hauteur de plongée sur l'évolution du taux de vide en fonction du débit d'air, on a tracé les courbes représentées sur la figure (III.14). Donc cette dernière montre l'évolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour les cinq hauteurs de plongée 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 et 0,8 en fonction de la même gamme du débit d'air.

Pour l'effet de la hauteur de plongée on constate que plus la hauteur de plongée augmente plus le taux de vide diminue. La représentation montre que globalement le taux de vide diminue avec l'augmentation de cette hauteur statique. Pour la plus faible hauteur de plongée étudiée, ($H_p = 0,4$), le taux de vide a atteint une valeur maximale avoisinant 0,77. Par contre la plus grande hauteur de plongée ($H_p = 0,80$) la valeur maximale du taux de vide avoisine 0,65. Ceci peut être expliquée par le fait qu'à des hauteurs de plongée importantes, le liquide occupe plus de volume dans la colonne et l'expansion de la phase gazeuse peine à s'imposer au sein de la phase liquide. Un constat similaire a été fait par Saidi et Yahiaoui (2016).

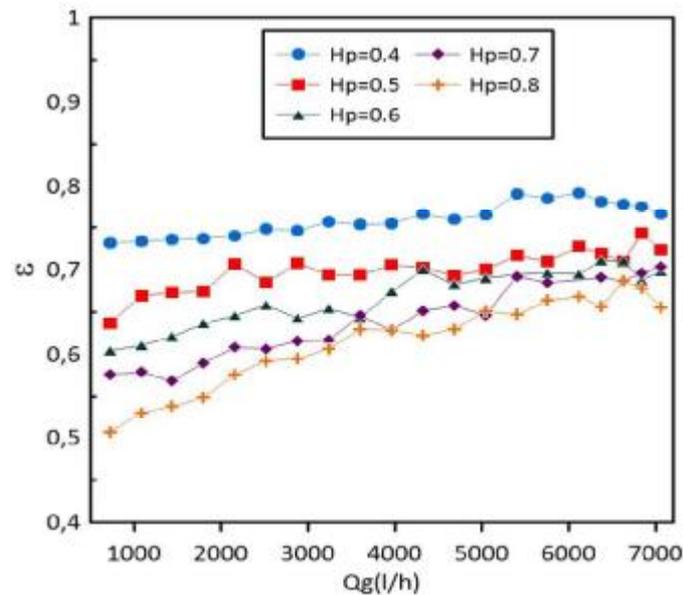


Figure III.14 : Effet de la hauteur de plongée sur le taux de vide

III.7-Rapport de glissement S

Le rapport de glissement (S) traduit le mouvement relatif entre les deux phases liquide et gazeuse. Il est donné par le rapport des vitesses superficielles des deux phases :

$$S = \frac{U_g}{U_l} \quad (\text{III.3})$$

Sur la figure (III.15) nous avons représenté l'évolution du rapport de glissement en fonction de la vitesse superficielle de la phase gazeuse pour la gamme de la hauteur de plongée étudiée. D'après cette figure on constate que le rapport de glissement se caractérise par une décroissance significative pour toutes les hauteurs de plongée étudiées. La décroissance se poursuit jusqu'à atteindre un minimum. Une fois le minimum est atteint, le rapport a tendance à augmenter légèrement. Cette phase de décroissance est associée au régime à bulles et aux régimes à poches. Ceci montre que le glissement entre phases est plus accentué dans la gamme de faibles vitesses donc de faibles débits d'air. Pour les grandes vitesses superficielles, le glissement a tendance à se stabiliser.

La confrontation du rapport de glissement avec le rendement pour une hauteur de plongée identique montre que le minimum du rapport de glissement correspond à la

zone optimale du fonctionnement. C'est-à-dire au maximum du rendement comme le montre la figure (III.16). Ceci a été constaté avec le reste des hauteurs de plongées étudiées non représentées ici. Il paraît donc que le rapport de glissement peut servir comme un paramètre utile pour étudier les performances d'un système airlift. C'est-à-dire détecter la zone optimale du fonctionnement en utilisant ce rapport.

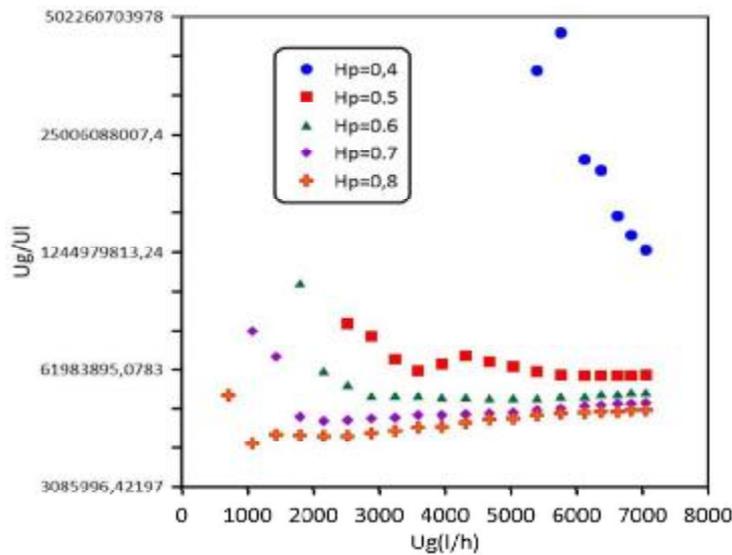


Figure III.15 : Evolution du rapport de glissement en fonction de la vitesse superficielle de la phase gazeuse pour diverses hauteurs de plongée.

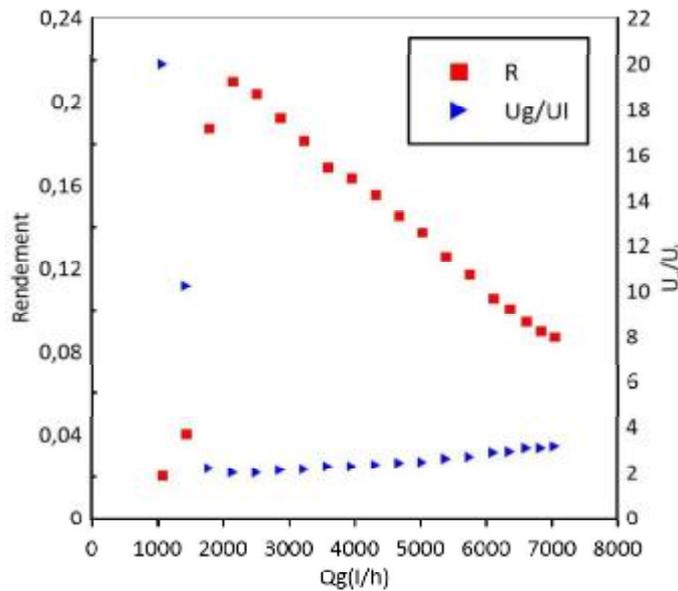


Figure III.16: Représentation simultanée du rendement et de rapport du glissement en fonction du débit de la phase liquide pour $H_p=0,7$

III.8-La masse volumique du mélange diphasique

La masse volumique d'un mélange diphasique est liée au taux de vide global par la relation suivante :

$$\rho_m = \varepsilon \rho_g + (1 - \varepsilon) \rho_l \quad (\text{III.4})$$

La figure (III.17) montre que la masse volumique décroît avec l'augmentation du débit d'air. La décroissance peut se diviser en deux étapes : la première, assez sensible, correspond à la gamme du débit d'air allant de 720 jusqu'à 4680 l/h, c'est la gamme caractérisée par les trois régimes, à savoir le régime à bulles, le régime à poches et la transition vers le turbulent baratté. A l'établissement du régime turbulent, la masse volumique, poursuit sa décroissance d'une façon moins significative.

Du point de vue hauteur de plongée, cette dernière influe positivement sur l'évolution de la masse volumique du mélange diphasique. Plus la hauteur de plongée augmente plus la masse volumique augmente. Ceci est lié au taux de vide.

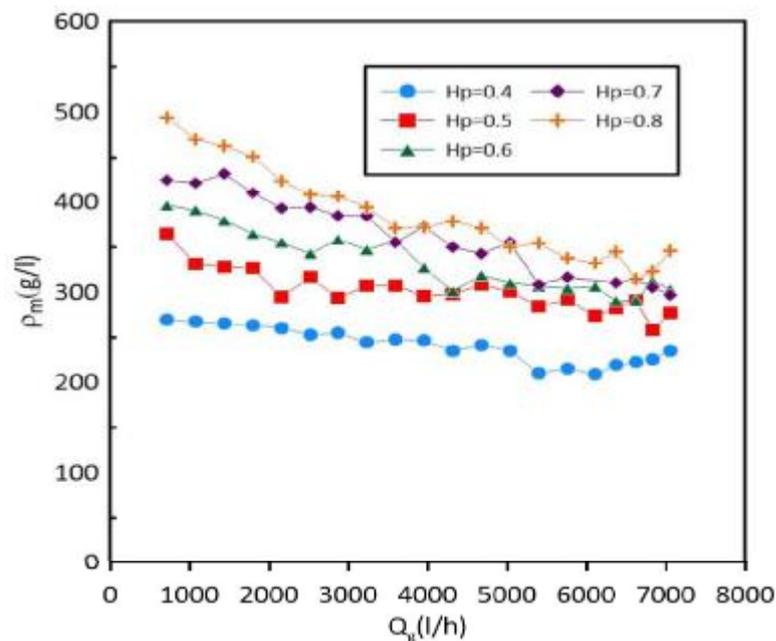


Figure III.17 : Evolution de la masse volumique du mélange diphasique air-eau

III.9-Confrontation avec le modèle de Nicklin(1963)

Il s'agit du modèle à écart de vitesses (*drift-flux model*) avec les paramètres proposés par Nicklin(1963) et Wallis (1969). Ces auteurs suggèrent une valeur égale à

1,2 pour le paramètre de distribution C_0 et l'expression $U_{gl} = 0,35\sqrt{gD}$ pour la vitesse d'entraînement.

$$\frac{U_g}{\varepsilon} = 1,2 (U_g + U_l) + 0,35\sqrt{gD} \quad (\text{III.5})$$

Tel que le montre la figure (III.18), le modèle à écart de vitesses (*drift-flux model*) avec le choix des paramètres de Nicklin (1963) et Wallis (1969) présente un écart relativement faible avec les points expérimentaux. Le même comportement est constaté avec les cinq hauteurs de plongées. Cet écart peut être expliqué par le fait que Nicklin recommande son modèle aux colonnes de faible diamètre où la tension superficielle joue un rôle important. Or, dans notre cas, un diamètre de 50 mm peut être considéré comme étant assez grand. Il est possible donc de dire que le modèle à écart de vitesses est à utiliser avec prudence dans ce présent cas.

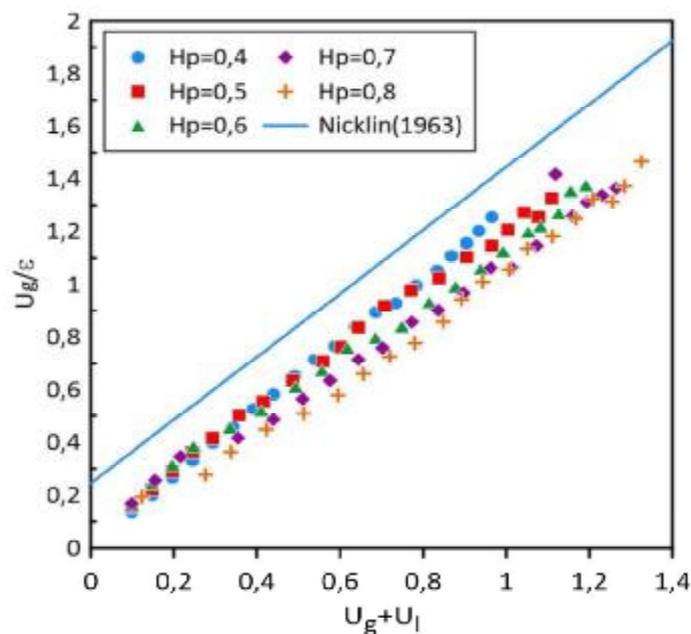


Figure III.18 : Prédiction du taux de vide avec le modèle de Nicklin (1963)

III.10-Gradient de pression

La mesure de la perte de pression au-delà de la vanne du taux de vide (voir la figure II.1) a été effectuée à l'aide d'un manomètre à eau. Les valeurs lues sur le manomètre ont été converties et rapportées par rapport à la hauteur mouillée (H_m).

Sur la figure (III.19) nous avons représenté l'évolution de la perte de pression en fonction du débit d'air (Q_g) pour les cinq hauteurs de plongée. En analysant la figure (III.19), on remarque que le gradient de pression décroît avec l'augmentation du débit d'air. Une décroissance assez sensible surtout dans la zone de débit d'air égale à 720l/h jusqu'à 1500l/h. Cette allure décroissante peut être expliquée par l'augmentation du taux de vide car l'augmentation de (Q_g) entraîne celui du taux de vide. Nous remarquons que du point de vue qualitatif, cela concerne les cinq hauteurs de plongée. Cette hypothèse du lien avec le taux de vide se confirme en faisant la comparaison entre les hauteurs de plongée. On remarque que les gradients les plus importants correspondent aux hauteurs de plongée les plus grandes (0,7 et 0,8). Ces dernières sont associées à un taux de vide faible et une masse volumique du mélange diphasique assez grande.

La confrontation de la perte de pression gravitaire ($\frac{\Delta P_{grv}}{H_m}$) avec le gradient de pression total, ($\frac{\Delta P_v}{H_m}$) est représentée sur la figure (III.20). Cette représentation traduit une quasi-égalité entre les deux termes. Ceci signifie que la composante de l'accélération et celle des frottements sont négligeables devant la perte gravitaire. Ce qui permet de conclure que dans un système airlift, du moins dans notre cas, le gradient de pression est principalement dû à la perte gravitaire.

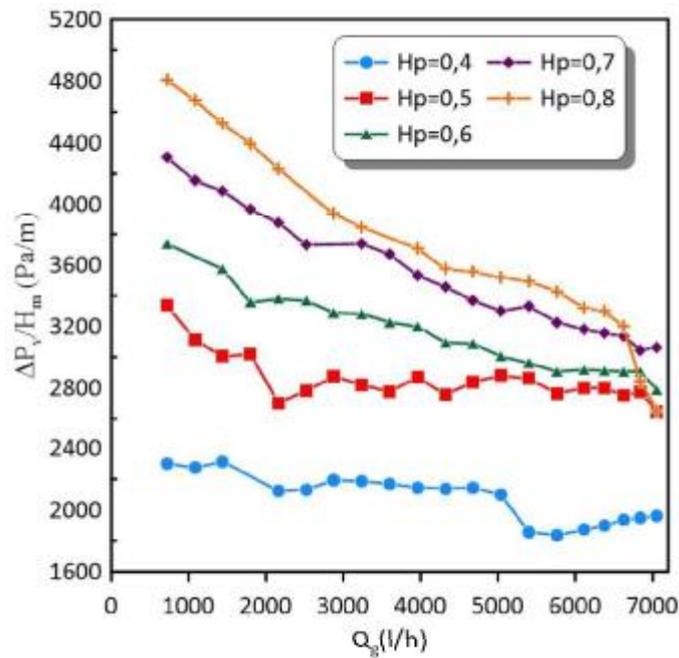


Figure III.19 : Evolution du gradient de pression en fonction du débit d’air pour les cinq hauteurs de plongée

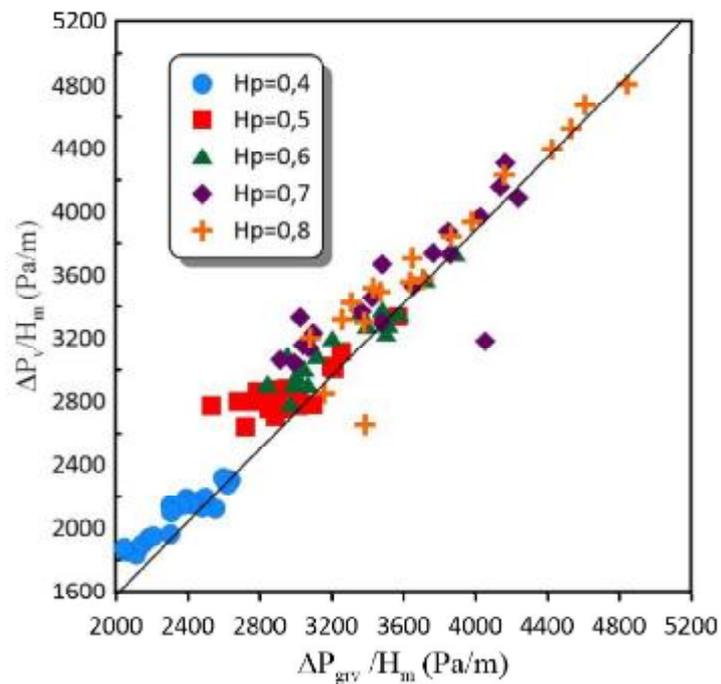


Figure III.20 : Confrontation de la perte de pression gravitaire avec le gradient de pression total

Conclusion

Dans le cadre de ce modeste travail nous avons abordé une étude sur un système de pompage airlift d'un diamètre intérieur de 50mm et d'une hauteur de 1,62m. L'étude a porté sur la mesure de quelques paramètres hydrodynamiques tels que la vitesse de la phase liquide, le taux de vide global, le glissement, le rendement, l'efficacité et le gradient de pression. L'ensemble des mesures ont été effectuées en variant la hauteur de plongée de 0,4 à 0,8 à pas de 0,1. A l'issue de notre analyse des résultats, on peut conclure les points suivants :

- Le débit de la phase liquide augmente avec l'augmentation du débit d'air et de la hauteur de plongée.
- Pour les faibles hauteurs de plongée le débit minimum d'injection est affecté. Ce dernier diminue en augmentant la hauteur de plongée.
- Le rendement augmente avec l'augmentation de débit d'air jusqu'à atteindre un optimum puis il diminue. Tout comme l'efficacité.
- La hauteur de plongée a un effet positif sur l'efficacité.
- Le rendement du système se caractérise par un maximum qui ne correspond pas au maximum du débit de liquide pompé mais qui coïncide avec le minimum du rapport de glissement.
- Le glissement entre phases est plus accentué dans la gamme de faibles vitesses donc de faibles débits d'air. Par contre pour les grandes vitesses superficielles, le glissement a tendance à se stabiliser. La hauteur de plongée a un effet négatif sur le rapport de glissement.
- Le maximum du rendement diminue au-delà d'une hauteur de plongée de 0,7. Ce qui laisse penser que l'augmentation de la hauteur de plongée au-delà de cette valeur est du point de vue énergétique pas intéressante.
- L'obtention d'un faible rendement, le rendement maximal obtenu est de 20,96% pour la hauteur de plongée $H_p=0,7$.
- Le taux de vide augmente avec l'augmentation du débit d'air et la hauteur de plongée produit un effet négatif sur ce paramètre.
- La masse volumique du mélange diphasique décroît d'une façon assez sensible avec l'augmentation du débit d'air.
- Un faible écart est constaté entre les paramètres de Nicklin (1963) et nos points expérimentaux. La prédiction du taux de vide avec cette corrélation doit se faire avec prudence.

- Le gradient de pression au-delà de la vanne (14) décroît avec le débit d'air et augmente avec la hauteur de plongée. L'étude montre qu'il est étroitement lié au taux de vide global.
- Le gradient de pression total est presque égal à la perte de pression gravitaire. Les composantes d'accélération et de frottement peuvent être négligées.

Références bibliographiques

- Ahmed,W.H., Badr, H.M., 2012. *Dual-injection airlift pumps: an enhance performance*. Particulate Science and Technology 30, 497-516.
- 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.
- 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.
- Apazidis, N., 1985. *Influence of bubble expansion and relative velocity on the performance and stability of an air lift pump*. Int. J. Multiph. Flow 11, 459-479.
- Awari, G. K., Bhuyar, L.B., Wakde, D. G., 2007. *A Generalized gas-Liquid two-phase flow analysis for efficient operation of airlift pump*. J. of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng 29, 307-312.
- Barnea, D., Brauner, N., 1986.*Slug/churn transition in upward gas-liquid flow*. Chemical Engineering Science Vol. 4,. No. I, pp 159463.
- 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.
- Castro, W. E., Zielinski, P. B., and Sandifer, P. A., 1975. *Performance characteristics of air lift pumps of short length and small diameter*. J. World Aquacult. Soc. 6, 451–460.
- Chancellor, D. H. 1999. Airlift pump for membrane separation unit. U.S. Patent 5,980,751.
- Cheng, H., Hills, J. H., Azzopardi, B. J., 1998. *A study of the bubble-to-slug transition in vertical gas-liquid flow in columns of different diameter*. Int. J. Multiph. Flow 24, 431-452.
- Chisti, M.Y., Moo-Young, M., 1987. *Airlift reactors: Characteristics, applications and design considerations*. Chemical Engineering Communications. 60,1-6, 195–242.
- Chisti, M. Y., Halard, B. M. Moo-Young.1988. *Liquid circulation in airlift reactors*. Chem. Eng. Sci. 43, 451-457.
- 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 in slug flow*. Aiche J. 32, 56-63.
- Dabolt,R.J., Plummer,K.E., 1980. "Design of airlift systems for transfer and measurement of radioactive liquids" Dept. of energy report AGNS-35900-3.2- 77.

- De Cachard, F., Delhaye, J.M., 1996. *A slug-churn flow model for small diameter air lift pumps*. Int. J. Multiphase Flow 22, 627–649.
- De Cachard, F., Delhaye, J.M., 1997. *Stability of small diameter airlif pump*. Int. J. Multiphase Flow 24, 17-34.
- Dukler, A. E., Taitel, Y., 1986. *Flow pattern transitions in gas-liquid systems: Measurement and modelling*. Int. Multiphase Sci. Tech. 2, 1-94.
- 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, VOL. 32, NO. 8, pages 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.
- Ghosh, T.K., Bhattacharyya, D., Kim.,T., 2010. *Gas hold-up characteristics of an external loop airlift contactor*. Int. J. of Hybrid Information Technology 3, 25-32.
- Giot, M. 1982 Three-phase flow, In *Handbook of Multiphase Systems*(Edited by Hetsroni, G.),para. 7.2.. McGraw-Hill, New York.
- Guet, S., Ooms G., Oliemans R.V.A., 2002. *Influence of bubble size on the transition from low-Re bubbly flow to slug in vertical pipe*. Exp. Therm. Fluid Sci. 26, 635-641.
- 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.
- Hanafizadeh, P., Saidi, M.H. Nouri Gheimasi, A., Ghanbarzadeh, S.,2011b. *Experimental investigation of air–water, two-phase flow regimes in vertical mini pipe*. Scientia Iranica 18, 923–929.
- Hanafizadeh, P., Ghorbani, B., 2012. *Review study on airlift pumping systems*. Multiphase Science and Technology 24, 323-362.
- Hewitt, G.F., Roberts, D. N., 1969. *Studies of two-phase flow patterns by simultaneous X- ray and flash photography*. Ukaea report aere-m 2159.
- 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.

- Hjalmar, S., 1973. *The origin of instability in air lift pumps*. J. Appl. Mech. Trans. ASME 95, 399–404.
- Jin, B., Lant, P., 2004. *Flow regime, hydrodynamics, floc size distribution and sludge properties in activated sludge bubble column, air-lift and aerated stirred reactors*. Chem. Eng. Sci 59, 2379-2388.
- Kadic, E, Heindel, T. H., 2014. *An introduction to bioreactor hydrodynamics and gas-liquid mass transfert*. Ed. Wiley, USA.
- Kantarci, N., Borak, F., Ulgen, K. O., 2005. *Bubble column reactors*. Process Biochemistry 40, 2263–2283.
- Karimi, A., Hanafizadeh, P., Ghanbarzadeh, S. Saidi, M. H., 2010. *Augmentation of air-lift pump performance in step geometry*. ICMF 2010: 7th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2010, Tampa, FL USA, May 30-June 4.
- Kassab, S.Z., Kandil, H.A., Warda, H.A., Ahmed, W.H., 2001. *Performance of an air lift pump operating in two-phase flow*. The Seventh International Congress on Fluid Dynamics & Propulsion, December 18-20, 2001, Cairo, Egypt.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Kondo, M. 2000. Airlift pump apparatus and method. U.S. Patent 6,162,020.
- Kouremenos, D.A., Staicos, J., 1985. Performance of a small air-lift pump, Int. J. Heat Fluid Flow 6 (3), 217–222.
- Kumar, S. Duduković, M.P., Toseland, B.A., 1998. *Measurement techniques for local and global fluid dynamics quantities in two and three phase systems*. Air Product and Chemicals, Inc. Allentown, Pennsylvania.

- 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.
- Mahrous, A.F., 2013. *Airlift pump with a gradually enlarged segment in the riser tube*, J. Fluids Eng. 135 (3), 1–5.
- Mahrous, A.F., 2013a. *Performance study of an airlift pump with bent riser tube*. Wseas Transactions on Applied and Theoretical Mechanics 8, 136-145.
- Mahrous, A.F., 2013b. *Airlift pump with a gradually enlarged segment in the riser tube*. ASME J. Fluids Eng. 135-146.
- Mahrous, A.F., 2014. *Performance of Airlift Pumps: single-Stage vs. Multistage air injection*. American J. Mech. Eng. 2, 28-33.
- Monmarson, B., 2015. *Simulation en présence d'incertitude d'un gazosiphon de grande échelle. Application à l'optimisation d'un nouveau système géothermique urbain*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes.
- Nicklin, D.J., 1963. *The air-lift pump theory and optimization*. Int. Chem. Eng. 4, 29-39.
- Ohnuki, A., Akimoto, H., 1996. *An experimental study on developing air-water two phase flow along a large vertical pipe: effect of air injection method*. Int. J. Multiph. flow 22, 1143-1154.
- 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 maîtrise en Sciences Appliquées*. Université de Montréal.
- Purchas, A. W. 1917. *Some notes on air-lift pumping*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1917 93: 613.
- Reinemann, D.J., Patrlange, J.Y., Timmons, M.B., 1986 *Theory of small diameter airlift pump*, Int. J. Multiphase Flow 16, 337–355.
- Reinemann, D.J., Patrlange, J.Y., Timmons, M.B., 1990. *Theory of small diameter airlift pump*. Int. J. Multiph. flow 16, 113-122.
- Samaras, V. C., Margaris, D. P., 2005. *Two-phase flow regime maps for air lift pump vertical upward gas–liquid flow*. Int. J. Multiph. Flow 31, 757–766.
- 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.

Sharma, N.D., and Sachdeva, M.M., 1976. "An Air Lift Pump Performance Study", AICHE J 32, 61-64.

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

Taitel, Y., Barnea, D., Dukler, A.E., 1980. *Modeling flow pattern transition for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes*. Aiche J. 26, 345-354.

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

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.

Tighzert, H., 2015. *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.

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.

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., 2005. *Experimental and theoretical analysis of axial dispersion in the liquid phase in external loop reactors*. Chem. Ing. Sc. 60, 5945 - 5954.

Wallis, G.B., 1969. *One dimensional two phase flow*. McGraw-Hill, New York.

Wicomb, W.N., Cooper, D.K., Novitzky, D., 1985. *An airlift pump device for low pressure perfusion storage of the isolated heart*. Cryobiology. 22, 401-408.

Witheridge, A. J. 2005. *Aeration of wastewater ponds using airlift pumps*. U.S. Patent Application, 2005=0242450.

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. Mémoire de master. Université Abderrahmane Mira Béjaia.

Zaraki, H. E, Abadshapoori, M. H., Mohammad Saidi, M. H., 2016. Experimental investigation of flow regime and efficiency of airlift pumps with tapered upriser pipe. Multiphase Science and Technology, 28, 135–152.

Résumé : Ce travail a été consacré à l'étude expérimentale d'un système de pompage type airlift, composé d'une colonne de 50 mm de diamètre et d'une hauteur de 1,6 m. La hauteur de plongée a été variée de 0,4 à 0,9 pour un débit d'air allant de 700 à 7000 l/h. L'étude a été basée sur la mesure du débit de la phase liquide qui est l'eau, ainsi que le taux de vide global et le gradient de pression. L'ensemble de ces mesures a permis le calcul du rendement, l'efficacité, le rapport de glissement et la masse volumique du mélange diphasique. À l'issus des résultats obtenus, nous avons déduit que le débit de la phase liquide augmente avec l'augmentation du débit d'air et de la hauteur de plongée qui a un effet négatif sur le taux de vide. L'évolution de cette dernière influence celle de la masse volumique et le gradient de pression. Le rendement se caractérise par un maximum qui ne correspond pas au maximum du débit du liquide, il augmente avec la hauteur de plongée jusqu'à environ 0,75 au delà de laquelle l'effet s'inverse. Les résultats sont confrontés au modèle de Nicklin où la prédiction du taux de vide s'est avérée peu satisfaisante. La perte de pression gravitaire a été aussi confrontée au gradient de pression total qui a montré que les composantes d'accélération et de frottements peuvent être négligées.

Mots –clé : Airlift, système de pompage, diphasique, grand diamètre, rendement.

Abstract: This work was devoted to the experimental study of an airlift type pumping system, consisting of a column 50 mm in diameter and 1.6 m high. The submersion ratio was varied from 0.4 to 0.9 for an air flow rate ranging from 700 to 7000 l/hour. The study was based on the measurement of the liquid phase flow rate, which is water, the void fraction and the pressure gradient. All these measurements allowed the calculation of the efficiency, effectiveness, slip ratio and density of the two-phase mixture. From the results obtained, we deduced that the flow rate of the liquid phase increases with the increase in air flow rate and submersion ratio, which has a negative effect on the void fraction. The void fraction rate influences the evolution of the density of the mixture and the pressure gradient. The efficiency is characterised by a maximum that does not correspond to the maximum of the liquid flow rate, it increases with the submersion ratio up to about 0.75, beyond which the effect is reversed. The results are compared with Nicklin's model where the prediction of the void fraction proved to be unsatisfactory. The gravity pressure loss was also confronted with the total pressure gradient which showed that the acceleration and friction components can be neglected.

Keywords : Airlift pump, pumping system, two phase flow, large diameter, efficiency.