

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} RAHMOUNI Hanane

M^{lle} RADJI Laila

Thème :

Etude expérimentale des performances d'un système de pompage de type airlift triphasique

Soutenu le : 08 juillet 2019

devant le jury composé de :

M ^{me} BOUROUINA S.	Professeur (U. A. M. Béjaïa)	Présidente
M ^{me} KECHROUD N.	MCB (U. A. M. Béjaïa)	Examinatrice
M ^{me} HAMAI DI N.	MCB (U. A. M. Béjaïa)	Examinatrice
M ^r TIGHZERT H.	MCB (U. A. M. Béjaïa)	Promoteur

Juillet 2019



DEDICACES

A

Mes parents

Mes frères et ma sœur

Mon fiancé



HANANE



Dédicace

Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance envers :

Ma mère pour ces sacrifices afin d'acquérir mon but, qu'elle trouve ici l'expression de ma tendre affection.

Mon père qui a participé par tous les moyens pour me porter l'aide morale et matériel.

Mes frères : Nabil et Sami

LAILA

Sommaire

Remerciements.....	I
Liste des figures	II
Nomenclature.....	V
Introduction.....	01

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes airlift

I.1. Définition de systèmes airlift.....	03
I.2. Principe de fonctionnement	04
I.3. Type de systèmes airlift.....	04
a. Systèmes de pompage airlift ordinaire.....	04
b. Système de pompage airlift à élargissement brusque.....	04
c. Système de pompage airlift en forme conique.....	04
d. Système de pompage airlift en forme S.....	05
I.4. Avantages d'un système airlift.....	05
I.5. Domaines d'applications des système airlift.....	06
a. Domaine pétrolier.....	06
b. Domaine d'aquaculture.....	06
c. Domaine archéologie et miniers marine.....	06
d. Domaine géothermie.....	07
e. Domaine traitement des eaux.....	07
f. Domaine océanographique.....	07
g. application médicales.....	07
I.6. Régime d'écoulement diphasique.....	07
a. Régime à bulles (bubble flow).....	08
b. Régime à poches (slug flow).....	08
c. Régime turbulent baraté (churn flow).....	09
d. Régime annulaire (annular flow).....	09
e. Régime homogène.....	09

f. Régime hétérogène.....	09
I.7. Carte d'écoulement.....	09
I.8. Principales méthodes d'injection.....	10
I.8.1. Injection radiale.....	10
I.8.2. Injection axiale.....	10
I.8.3. Double injection.....	10
I.8.4. Injection à orifice unique.....	10
I.9. Paramètres de caractérisation d'un système de pompage de type airlift.....	11
I.9.1. Débit de la phase gazeuse.....	11
I.9.2. Débit de la phase liquide.....	11
I.9.3. Taux de vide.....	11
I.9.4. Hauteur de plongée.....	12
I.9.5. Gradient de pression.....	13
I.10. Paramètres de performances.....	13
I.10.1. Rendement.....	13
I.10.2. Efficacités.....	13
I.10.3. Rapport de glissement.....	13
I.10.4. Vitesse de glissement.....	14
I.10.5. La masse volumique du mélange diphasique.....	14

CHAPITRE III

Dispositif expérimental et techniques de mesures

III.1. Élément composant de l'installation.....	23
a. La colonne(riser).....	23
b. Réservoir d'alimentation liquide.....	25
c. Section de transit.....	25
d. Séparateur de phase.....	26
e. Bac coulissant.....	27
f. Débitmètres à air.....	27
g. Mode d'injection et disperseur.....	28
h. Alimentation en particules solides.....	28
III.2. Alimentation en phase liquide.....	29

III.3. Alimentation en phase Gazeuse.....	29
III.4. Alimentation en phase solide.....	30
III.5. Caractérisation de particules solide.....	31
III.6. Caractérisation de la solution de la CMC utilisée.....	31
III.7. Mise en fonctionnement de l'installation.....	33
III.8. Technique de mesures.....	33
III.8.1. Caractérisation des régimes comportement des particules.....	33
III.8.2. Mesure de débit de la phase liquide.....	34
III.8.3. Mesure de débit de la phase solide.....	34
III.8.4. Mesure des débits minimums.....	35
III.9. Choix de la hauteur de plongée.....	35
III.10. Contraintes expérimentales.....	36

Chapitres IV

Résultats et discussions

IV.1. Analyse de l'écoulement diphasique.....	38
IV.2. Analyse de l'écoulement triphasique.....	40
IV.2.1. Comportement des particules solide.....	40
IV.2.2. Débit de la phase solide.....	44
IV.2.3. Effet de la taille des particules sur le débit du solide.....	46
a. Cas de la phase liquide eau.....	46
b. Cas de la solution CMC.....	48
IV.2.4. Effet de la nature de la phase liquide.....	50
IV.3. Les débits minimums d'injection d'air.....	53
IV.3.1. Les débit minimums d'injection pour pompage solide.....	53
IV.3.2. Relation entre Q_{gs-min} et Q_{gt-min}	56
IV.3.3. Effet de la nature de la phase liquide sur le débit minimum.....	57
IV.4. Relation entre le débit de la phase solide et le débit de la phase liquide.....	59
IV.5. Efficacités.....	60
IV.5.1. Efficacité de pompage solide.....	60
IV.5.2. Effet de la taille des particules.....	62
IV.5.3. Effet de la phase liquide sur l'efficacité.....	63

IV.5.4. Comparaison entre l'efficacité de pompage liquide et celle de pompage solide.....	65
Conclusion.....	67
Reference bibliographique.....	69

Remerciements

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

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre promoteur M. Tighzert Hamid qui nous a accordé sa confiance. Nous le remercions pour sa patience, son sens d'appréciation scientifique, ses suggestions pertinentes et ses conseils précieux qui nous ont servi de guide pour l'aboutissement de ce travail.

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

Nous remercions également Madame KECHROUD Nassima et Madame HAMAIDI Nassima pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nos remerciements vont aussi au responsable du Hall de Technologie, Rachid (Université Abderrahmane Mira de Béjaïa) pour le matériel qu'il a mis à notre disposition.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma d'une colonne à bulles.....	04
Figure I.2 : schéma simplifié des types de réacteur airlift.....	06
Figure I.3 : schéma de quelques configurations de systèmes de pompage airlift.....	07
Figure I.4 : Principaux régimes d'un écoulement diphasique vertical.....	14
Figure I.5 : Représentation qualitative des régimes d'écoulements en colonne à bulles...	16
Figure II. 1 : Schéma des disperseurs utilisés par Parker (1980).....	19
Figure II.2 : Schéma du disperseur utilisé par Ahmed et Badr (2012).....	21
Figure II. 3 : Dispositif de disperseur utilisé par Ahmed et al.(2016).....	22
Figure II. 4 : Système d'injection cité par Kadic et Heindel (2014).....	23
Figure II.5 : Modèles de disperseurs utilisés par Vial et al.(2001).....	24
Figure II.6 : Schéma du disperseur utilisé par Taleb et Al Jarrah (2017).....	25
Figure II.7 : Modèle d'injection de Mahrous (2014).....	26
Figure II.8 : Le mode d'injection tourbillonnaire utilisé par Riglin (2011).....	26
Figure II.9 : Quelques exemples de disperseurs statiques et dynamiques (Chisti & MooYoung, 1987).....	28
Figure III.1 : Schéma du dispositif expérimental	30
Figure III.2 : Vannes du taux de vide.....	31
Figure III.3 : Section de transit.....	32
Figure III.4 : Séparateur de phases.....	32
Figure III.5 : Bac coulissant.....	33
Figure III.6 : Débitmètres à air montés en parallèle.....	33
Figure III.7 : Le réservoir d'alimentation en phase liquide relié à la pompe.....	34
Figure III.8 : Exemple du choix de la hauteur de plongée ($H_p = 0,7$).....	35
Figure III.9 : Schéma et photographie d'un diperseur.....	36
Figure III.10 : Photographie et schéma de la partie trouée du disperseur (D1).....	36
Figure III.11 : Photographie et schéma de la partie trouée du disperseur (D2).....	37
Figure III.12 : Photographie et schéma de la partie trouée du disperseur (D3).....	37
Figure III.13 : Photographie et schéma de la partie trouée du disperseur (D4).....	38
Figure III.14 : Préparation de la solution CMC (10g/l).....	39

Figure III.15: dispositif experimental de la viscosité.....	40
Figure III.16 : Evolution de la viscosité apparente de la CMC (10g/l) en fonction de la vitesse de cisaillement à 20°C.....	40
Figure III.17: Compresseur.....	41
Figure III.18: Bac gradué pour la mesure du débit.....	42
Figure III.19: schema de l'installation experimentale utilisé.....	45
Figure IV.1: Photographie du mécanisme de fonctionnent des pores du disperseur (D3)..	47
Figure IV. 2: Photographies du régime à bulles de la phase liquide eau pour $Q_g=80$ l/h..	49
Figure IV.3 : Photographies du régime à bulles de la phase liquide CMC (10g/l) pour $Q_g=80$ l/h.....	49
Figure IV.4 : Photographies du régime à poche de la phase liquide CMC (10g/l) pour $Q_g=80$ l/h	50
Figure IV.5 : Photographie du régime à poches pour la solution CMC (10g/l) ($H_p=0,6$).....	51
Figure IV.6: Photographies du régime caractérisant la phase liquide eau.....	53
Figure IV.7 : Photographies du régime semi-annulaire relatif à la solution de la CMC(10g/l)	53
Figure IV.8 : Effet du mode d'injection sur le débit de la phase liquide eau.....	54
Figure IV.9 : Evolution du débit des deux phases liquide en fonction du débit d'air avec le mode radial.....	56
Figure IV.10: Effet du mode d'injection sur la phase liquide CMC (10g/l) en fonction du débit d'air.....	57
Figure IV.11: Comparaison des débits minimums d'injection des deux phases pour les quatre modes d'injections.....	58
Figure IV.12: Effet du mode d'injection sur le débit minimum d'injection pour l'eau.....	59
Figure IV.13: Effet du mode d'injection d'injection sur le débit minimum d'injection pour la solution CMC.....	59
Figure IV.14: Effet de la nature du fluide sur le rendement pour $H_p= 0,6$	61
Figure IV.15 : Confrontation du débit de la phase liquide et du rendement pour la même hauteur de plongée ($H_p= 0,6$).....	61
Figure IV.16: Effet du mode d'injection sur le rendement pour le cas de l'eau.....	63
Figure IV.17: Effet du mode d'injection sur le rendement pour la solution CMC (10g/l)...	64
Figure IV.18: Confrontation de l'efficacité des deux phases liquides	66
Figure IV.19: Confrontation du rendement avec l'efficacité dans les mêmes conditions...	67

Figure IV.20: Effet du mode d'injection sur l'évolution de l'efficacité pour le cas de l'eau...	67
Figure IV.21 : Effet du mode d'injection sur l'évolution de l'efficacité dans le cas de la CMC(10g/l).....	68
Figure IV.22: Comparaison entre les glissements des deux phases eau et solution CMC (10g/l) avec le mode radial(D1).....	69
Figure IV.23 : Comparaison entre les glissements des deux phases eau et solution CMC (10g/l) avec le mode axial (D2).....	69
Figure IV.24: Confrontation du rendement et du rapport de glissement des deux phases liquides.....	70
Figure IV.25: Effet du mode d'injection sur le rapport de glissement pour la phase liquide eau.....	71
Figure IV.26: Effet du mode d'injection sur le rapport de glissement pour la CMC (10g/l).	71
Figure IV.27: Effet de la nature de la phase liquide sur le taux de vide global.....	72
Figure IV.28 : Effet du mode d'injection sur l'évolution du taux de vide pour la phase liquide eau.....	74
Figure IV.29 : Effet du mode d'injection sur l'évolution du taux de vide pour la solution CMC (10g/l).....	74
Figure IV.30: Effet du mode d'injection sur la masse volumique du mélange diphasique (air-eau)	75
Figure IV.31: Effet du mode d'injection sur la masse volumique du mélange diphasique (air-CMC(10g/l)).....	76
Figure IV.32: Confrontation du taux de vide expérimental avec le taux de vide prédit par le modèle à écart de vitesses (Nicklin,1963) pour les différents modes d'injection dans le cas de la phase liquide eau.....	78
Figure IV.33: Confrontation du taux de vide expérimental avec le taux de vide prédit par le modèle à écart de vitesses (Nicklin,1963) pour les différents modes d'injection dans le cas de la phase liquide CMC (10g/l).....	79

Nomenclature

Lettres latines

A :	Section de la colonne.....	(m ²)
A _g :	Aire de la phase gazeuse.....	(m ²)
A _l :	Aire de la phase liquide.....	(m ²)
C ₀ :	Coefficient de distribution (modèle à écart de vitesses.....	(-)
D :	Diamètre de la colonne.....	(m)
E :	Efficacité d'un système de pompage airlift.....	(-)
g :	Accélération de la pesanteur.....	(m/s ²)
H :	Hauteur d'entraînement de la phase liquide.....	(m)
H _l :	Hauteur de la phase liquide non aérée.....	(m)
H _m :	Hauteur du mélange diphasique dans la colonne ou la hauteur mouillée.....	(m)
H _p :	Hauteur de plongée.....	(m)
k :	Paramètre de consistance.....	(Pa.S ⁿ)
n :	Indice d'écoulement.....	(-)
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.....	(-)
U _g :	Vitesse superficielle de la phase gazeuse.....	(m/s)
U _l :	Vitesse superficielle de la phase liquide.....	(m/s)
V _g :	Volume de la phase gazeuse.....	(m ³)

V_l :	Volume de la phase liquide dans la colonne.....	(m^3)
V_m :	Volume du mélange diphasique dans la colonne.....	(m^3)

Lettres grecques

β :	Taux de vide volumétrique	(-)
ε :	Taux de vide global.....	(-)
η :	Rendement d'un système de pompage airlift.....	(-)
μ :	Viscosité dynamique du liquide.....	(Pa.s)
ρ_g :	Masse volumique de la phase gazeuse.....	(Kg/m^3)
ρ_l :	Masse volumique de la phase liquide.....	(Kg/m^3)
ρ_m :	Masse volumique du mélange diphasique.....	(Kg/m^3)
τ :	Contrainte de cisaillement	(Pa)
ΔP :	Gradient de pression.....	(Pa)
ΔP_{ac} :	Gradient de pression dû à l'accélération.....	(Pa)
ΔP_g :	Gradient de pression dû à la gravité.....	(Pa)
ΔP_{fr} :	Gradient de pression dû aux frottements.....	(Pa)

Introduction

Le terme *airlift* signifie soulever au moyen de l'air comprimé un liquide ou un mélange liquide-solide. Le dispositif utilisé est appelé *système airlift*. Cette terminologie englobe une variété de configurations qui repose sur le même principe de flottabilité et le gradient de pression, allant des simples colonnes à bulles jusqu'aux systèmes de pompage triphasiques, en passant par les configurations et les conceptions des réacteurs. De par leurs avantages, ces dernières décennies, l'intérêt porté par la communauté scientifique à cet axe est grandissant. La littérature est foisonnante en termes de publications relatives aux systèmes diphasiques. La quasi-totalité des recherches converge vers un point commun qui est le suivant : comment peut-on augmenter ou optimiser le fonctionnement de tels systèmes ? Si du côté diphasique le terrain est assez défraîchi, les applications pour la fonction du pompage en triphasique ne le sont pas, ou du moins, les recherches semblent être encore au stade préliminaire. Pourtant en pratique ce type de pompage touche plusieurs domaines tels que la récupération des nodules métalliques des fonds océaniques, le traitement des eaux, des applications nucléaires (manipulation des produits radioactifs), des applications océanographiques, archéologie marine, exploitation minière et bien d'autres.

Malgré la complexité de la nature des écoulements multiphasiques, les études expérimentales et théoriques ne datent pas d'aujourd'hui. De Kato et al. (1975) à Deendarlianto et al.(2019) en passant par Giot (1979), Hatta et al.(1998 et 1999), Fujimoto et al.(2003, 2004 et 2005), Yoshinaga et Sato (1996), Kassab et al.(2007) pour ne citer que ces auteurs, avec leurs contributions intéressantes, ces chercheurs ont ouvert la voie pour l'investigation d'un champ très vaste. De ces études ont découlé des conclusions plus ou moins concluantes, des propositions de modèles de fiabilité discutables mais qui peuvent servir de supports pour approfondir l'investigation et élargir l'analyse. De ce fait, le vaste champ expérimental reste encore à explorer, d'autant plus que la plupart des études ont été menées, par le passé, en utilisant de l'eau comme phase liquide. Dans le cadre de ce travail, il nous est paru intéressant d'apporter notre contribution en optant pour une autre phase liquide de nature rhéologique différente. Modestement, nous pensons apporter une touche originale au domaine puisque à travers la recherche bibliographique, nous n'avons rencontré à ce jour, aucune publication ayant trait à ce sujet.

Pour cela, dans le cadre de ce mémoire, nous nous proposons de mener une étude expérimentale d'une manière originale et cela en vue d'étudier les performances d'un système de pompage de type airlift triphasique, conçu et adapté par nos propres moyens au niveau du laboratoire.

Le présent manuscrit comporte quatre chapitres, dans le premier nous présentons des généralités sur le système airlifts ainsi que les paramètres principaux qu'ils caractérisent et qui influence sur son fonctionnement.

Dans le second, nous présentons une synthèse bibliographique des principaux travaux de la littérature liés aux systèmes airlifts triphasiques.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du dispositif expérimental ainsi que les techniques de mesure utilisées.

Le dernier, fait l'objet de la présentation des résultats obtenus et leur interprétation.

Nous terminons enfin par une conclusion.

CHAPITRE I

Notions fondamentales sur les systèmes airlifts

II.1 Définition d'un système airlift

Un système airlift est un dispositif conçu pour la fonction du pompage, la récupération, la mise en circulation d'un liquide (ou d'un mélange liquide-solide) ou la mise en contact entre phases gaz et liquide et cela uniquement au moyen de l'air comprimé que l'on injecte à la base de la colonne partiellement ou totalement immergée. (kassab et al.,2009 ; Clarck et Dabolt.,1986,Khalil et al.,1999 ; Saidi et Yahiaoui, 2016).

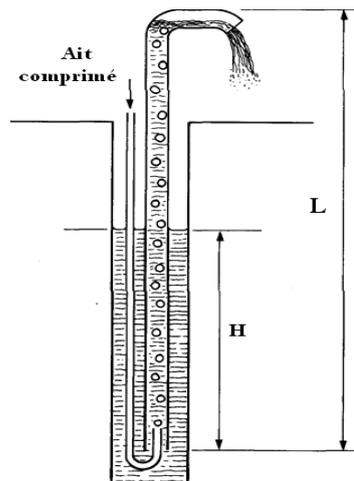


Figure 1.1 : schéma d'un système de pompage airlift diphasique

En présence d'une phase solide, le dispositif est appelé, un système airlift triphasique. La fonction d'un tel système est de soulever les particules solides vers le haut (figure I.2)

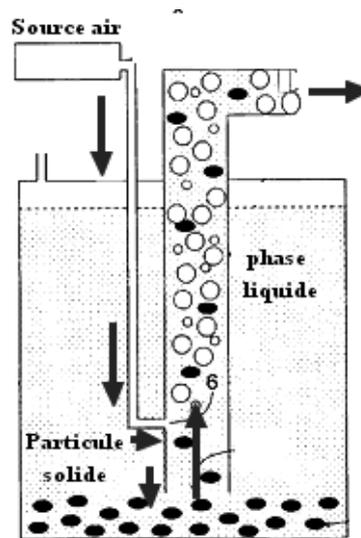


Figure I.2 : Schéma d'un système de pompage airlift triphasique

I.2 Principe de fonctionnement

Quand on injecte de l'air comprimé à la base de la colonne et cela permet de créer un écoulement diphasique ascendant ayant une faible densité par rapport à la phase liquide pure ce qui se traduit par une différence de pression entre les deux extrémités (en amont et en aval) entraînant la phase liquide d'une façon ascendante vers le haut. À la sortie de la colonne les deux phases peuvent être séparées et récupérées (Hanafizadeh et Ghorbani., 2012).

I.3 Type de système airlift

En vue d'optimiser le fonctionnement, les recherches récentes du domaine de pompage de type airlift proposent de nouvelles configurations, à savoir, la modification de la colonne tel que l'élargissement brusque, l'élargissement progressif ou d'autres déformation telle une colonne sous forme de la lettre « S » (Kumar et al.,2003 ; Hanafizadeh et al.2011 ; Hanafizadeh et Ghorban, 2012 ; Mahrous, 2013b ; Fujimoto et al., 2004 ; Mahrous ,2013a).

a. Système de pompage airlift ordinaire

Il consiste une colonne verticale simple sans aucune déformation. C'est la configuration la plus répandue, la plus connue et la plus étudiée (figure I.1.a).

b. Système de pompage airlift à élargissement brusque

Selon Hanafizadeh et Ghorbani (2012), ce type de système a été introduit pour la première fois par Kumar et al. (2003). Par la suite, il a été étudié par Karimi et al. (2010). Le long de la colonne un élargissement brusque est réalisé en vue d'augmenter la performance. Ce type de système est schématisé sur la figure (I.3.b)

c. Système de pompage airlift en forme conique

Ce type a également été introduit pour la première fois par Kumar et al. (2003) puis repris par la suite par Mahrous (2013b) qui soutient qu'une forme conique peut empêcher le régime annulaire de se produire et allonger la gamme du régime à poches ce qui pourrait améliorer la performance. D'autre part, cette configuration a été proposée pour pallier aux problèmes des pertes de charges supposées dans le cas d'un élargissement brusque (voir figure I.3.c).

d. Système de pompage airlift en forme S

C'est une configuration dont l'utilisation est assez rare, elle a été introduite pour la première fois par Fujimoto et al. (2004) puis par Mahrous (2013a). Ils ont introduit une déformation en forme S dans la partie inférieure de la colonne (voir la figure I.d).

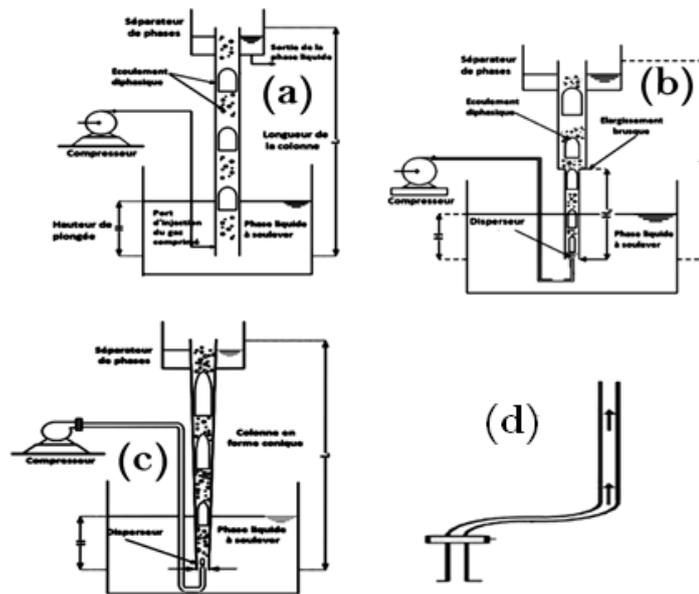


Figure I.3 : Types de systèmes de pompage de type airlift

I.4. Avantages d'un système airlift

Les systèmes de pompage airlift possèdent plusieurs avantages parmi lesquels on cite :

1. Ils sont dépourvus de toute pièces mobiles, ceci évite les problèmes liés à la maintenance. Le fait que le liquide n'est en contact avec aucun élément mécanique donne le double avantage de ne pas risquer la corrosion de la pompe (cas des puits sablonneux) et de ne pas endommager les éléments à remonter (cas des fouilles archéologiques en marine).
2. La simplicité de ce principe de pompage en fait un atout indéniable.

3. La réalisation ne nécessite pas de coûts élevés. Dans la pratique, ce type de systèmes est toujours à concevoir d'une manière originale pour l'adapter aux conditions de la tâche envisagée.
4. Ce sont des dispositifs efficaces et sûrs pour les manutentions des liquides radioactifs et toxiques.
5. Les systèmes de pompage de type airlift trouvent une utilisation croissante où la fiabilité et le peu d'entretien sont requis quand l'air comprimé ou le gaz est facilement disponible comme source d'énergie.
6. En comparaison avec d'autres systèmes de pompes de types airlift conventionnels, le mérite particulier de la pompe airlift est la simplicité mécanique. Considérablement réduit la consommation d'énergie.
7. Le système de pompage airlift présente comme avantage la flexibilité et le fait d'occuper peu d'espace lors de l'installation.

I.5 Domaines d'applications des systèmes airlift

I.5.1 Systèmes de pompage

a. Domaine pétrolier

Le système airlift dans le domaine pétrolier est connu sous le nom de la *technique gaz-lift*. Il est utilisé pour la récupération du pétrole dans les puits en état d'épuisement ou de forme irrégulière et ceci lorsque les systèmes de pompage conventionnel ne peuvent plus assurer leurs tâches. On parle alors de l'activation des puits par gaz-lift. En général le gaz injecté est un gaz inerte (par exemple CO₂) (Khalil et al., 1999 ; Honegger, 1984).

b. Domaine d'aquaculture

Il est utilisé comme système de pompage dans le domaine d'aquaculture pour l'aération du milieu, le renouvellement de l'eau, favoriser le transfert de matière tel que l'oxygénation ou la désorption de CO₂. Ce système est préféré parce qu'il évite le cisaillement aux poissons (Reinmann et Timmons, 1987 ; Momarson, 2015).

c. Domaine archéologique et miniers marin

On fait appel à ce type de pompage dans le cas des recherches archéologiques et l'exploitation minière dans le domaine marin pour faire remonter des objets ou des minéraux. Dans ce cas le système est siège d'un écoulement triphasique (liquide-gaz-

solide). Cette technique en archéologie a comme avantages de ne pas altérer les pièces récupérées (anciens documents en papier ...etc) (Kassab et al., 2007, 2009).

d. *Domaine géothermique*

Dans le cadre d'exploitation de l'énergie géothermique le système de pompage airlift peut se substituer à un système de pompage classique pour la récupération de la chaleur. Un travail approfondi est réalisé par Momarson (2015) dans ce sens.

e. *Domaine de traitement des eaux*

Ce type de pompage est utilisé pour certaines stations d'épuration notamment pour la récupération des boues.

f. *Domaine océanographique*

Récemment certains chercheurs ont utilisé le système de pompage de type airlift pour provoquer artificiellement la remontée et la recirculation des eaux aquatiques en vue d'enrichir les eaux de surfaces en nutriments (Fan et al., 2013).

g. *Applications médicales*

Il a été rapporté par Hanafizadeh et Ghorbani (2012) que de tels systèmes sont utilisés même dans le domaine médical. En effet les auteurs citent les chercheurs Wicomb et al. (1985) qui l'ont utilisé pour le stockage par perfusion d'un cœur isolé pour la transplantation. L'opération permet de prolonger sa durée de vie allant de 24 à 48 heures lors du transport de l'organe sur de longue distance.

I.6 Régime 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. Elle peut être déterminée par différentes méthodes :

- Méthode visuelle (observation à l'œil nu, photographie et vidéos ;
- Méthode graphique (exploitation des cartes d'écoulement) ;
- Traitement de signaux (signaux de pression, température et champs de vitesse).

Une très grande variété de régimes d'écoulement est décrite dans la littérature. En ce qui concerne l'écoulement diphasique ascendant qui fait l'objet de notre travail, on retient

quatre principaux régimes qu'on peut qualifier de standards, à savoir, le régime à bulles (*bubble flow*), le régime à poches (*slug flow*), le régime turbulent baratté (*churn flow*) et le régime annulaire (*annular flow*). Le choix ou l'utilité d'un régime dépend du type d'application.

a-Régime à bulles (*bubble flow*) : il apparaît à faible débits de gaz. Il est caractérisé par la dispersion des bulles de gaz dans la phase liquide. On l'assimile 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 en bioprocédés. Ce régime se rencontre dans les colonnes à bulles et les réacteurs airlifts (Pochet, 2012 ; Utiger, 1998).

b-Régime à poches (*slug flow*) : Il est appelé aussi *régime de Taylor*, il se produit en augmentant le débit du gaz après l'établissement du régime à bulles, les petites bulles se rassemblent et entre en coalescence. Les grosses bulles s'apparentent à des poches à gaz avec des diamètres qui peuvent atteindre celui de la colonne. Ces poches ont une forme cylindrique ; la partie en aval a la forme d'une calotte sphérique et la partie en amont se caractérise par une sorte de queue aplatie légèrement déformée. Elles se déplacent le long de la colonne d'une façon périodique et elles sont séparées par des bouchons liquides parsemés de petites bulles. Ce type de régime est indiqué notamment dans la fonction de pompage (Cheng et al., 1998 ; Clark et Dabolt, 1986 ; Kassab et al., 2009 ; Nakaryakov et al., 1986 ; Utiger, 1998).

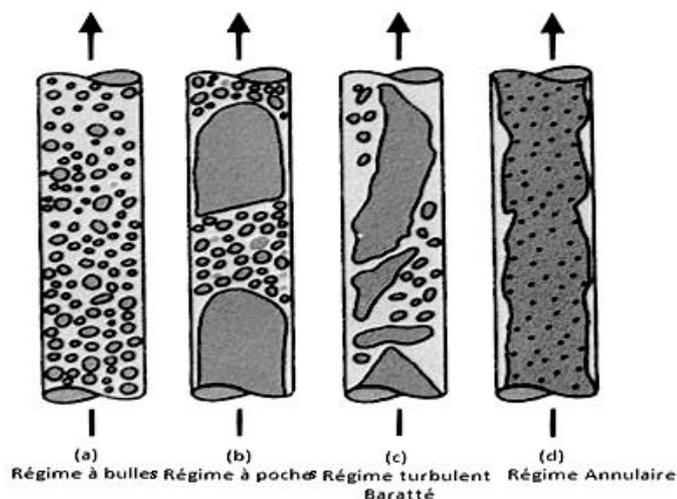


Figure I. 4: Principaux régimes d'un écoulement diphasique vertical.

c-Régime turbulent baratté (churn flow) : Il se produit en augmentant le débit du gaz après l'établissement du régime à poches. Pour un certain débit d'air, les poches ne peuvent plus se maintenir en forme, par conséquent leur destruction mène à écoulement désordonné, aléatoire avec un aspect oscillatoire non périodique. Un tel régime peut convenir pour favoriser les transferts de masse et de chaleur (Samaras et Marguaris, 2005 ; Brauner et Barnea ,1986 ; Arthur et al., 2012, Azzopardi et Wrent, 2004 ; Utiger,1998 ; Barrut.,2011).

d-Régime annulaire (annular flow) : Il se produit à grands débit du gaz. 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 d'un film mince et. On rencontre en général dans les échangeurs thermiques, les générateurs de vapeur et les systèmes de réfrigération.

e. Régime homogène : Ce vocabulaire utilisé pour désigner le régime à bulles dans des colonnes à bulles et des réacteurs airlifts.

f. Régime hétérogène : c'est aussi un vocabulaire utilisé dans le cas des colonnes à bulles et les réacteurs airlifts pour désigner le régime à poches et ler régime turbulent baratté.

I.7 Cartes d'écoulement

La carte d'écoulement est une représentation graphique des différentes qui permet de situer les régimes d'écoulement en fonction des paramètres opératoires qui figurent comme coordonnées et abscisses sur les axes de la carte. Comme coordonnées 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. Toutefois, à travers la littérature, il semble qu'une carte universelle ne peut exister. Les nombreuses cartes proposées ne peuvent servir que pour dans des conditions bien précises (Samaras et Marguaris, 2005 ; Bhagwat et Ghajar, 2012; Bhagwat, 2008 ; Spedding et al., 1998; Ung-Nak-Sohn, 1988; Furukawa et Fukano, 2001).

I.8 Principales méthodes d'injection

La dispersion de l'air dans une phase liquide est assurée par des systèmes d'injection variés qui génèrent des bulles par le passage de l'air à travers des orifices disposés sous une configuration donnée.

I.8.1 Méthode d'injection radiale

Avec cette méthode, l'air est injecté d'une façon perpendiculaire à l'écoulement principal. La phase liquide est aérée au moyen des trous situés sur la surface latérale du tube qui constitue le corps du disperseur (Yousfi et Soualah, 2018).

I.8.2 La méthode d'injection axiale

Cette technique se base sur l'injection de l'air d'une façon verticale et parallèle à l'écoulement à travers un certain nombre de trous réalisés sur la surface transversale de l'extrémité du disperseur (figure I.5).

I.8.3 La méthode de double injection

La double injection consiste à introduire l'air comprimé à la fois dans les directions radiales et axiales à travers les deux surfaces latérale et transversale du tube qui constitue le corps du disperseur(figure I.5).

I.8.4 La méthode d'injection à orifice unique

Dans ce cas d'injection, la phase gazeuse est introduite dans le riser à travers la section circulaire supérieure du disperseur disposant uniquement d'un seul trou de diamètre relativement grand. L'écoulement d'air est parallèle à l'écoulement principal(figure I.5).

I.8.5 Autres méthodes : En plus de ces méthodes principales, à travers la recherche bibliographique nous avons rencontré d'autres modes d'injection qui ont fait l'objet soit d'une étude expérimentale ou théorique (Ahmed et al.,2012,2016 ; Mahrous-2014).

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

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

-Injection avec changement d'angle : il s'agit d'une injection radiale avec un changement d'angle inférieur à 90°

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

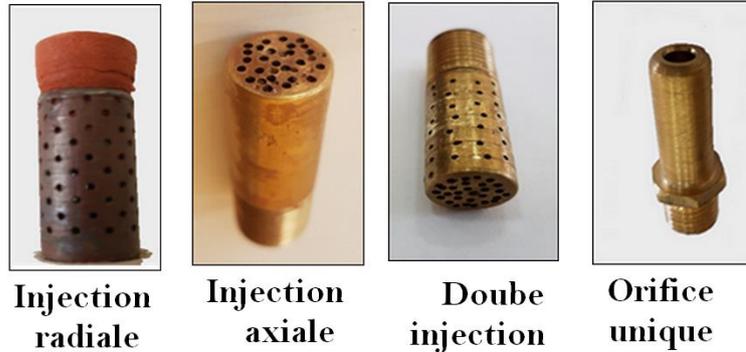


Figure I.5 : Exemples de disperseurs (Yousfi et Soualah (2018))

I.9 Paramètres de caractérisation d'un système de pompage de type airlift

Lors de l'étude d'un système de pompage de type airlift (diphasique ou triphasique) différents paramètres peuvent être utilisés. Dans cette partie, nous présentons ces paramètres et nous donnons leurs définitions

I.9.1 Débit de la phase gazeuse

Le débit de la phase gazeuse influe le débit de la phase liquide et la phase solide. Il joue un rôle important dans la structure de l'écoulement

I.9.2 Débit de la phase liquide

C'est le débit du liquide récupéré par pompage. Ce dernier résulte de la différence de gradient de pression et de masse volumique induit par l'injection de gaz à la base de la colonne. Dans le cas d'un système triphasique, ce paramètre influe le débit de la phase solide.

I.9.3 Taux de vide

On l'appelle aussi la rétention gazeuse. C'est la fraction de la phase gazeuse dans le mélange diphasique. Il est aussi un paramètre déterminant comme il est directement lié aux régimes d'écoulement, il est en mesure d'influencer d'autres paramètres.

Dans le cas d'un système diphasique, on définit le taux de vide global (ou la rétention gazeuse) comme étant la fraction volumique de la phase gazeuse par rapport au volume global du mélange diphasique. Il est donné par la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (\text{I.1})$$

V_g : volume de la phase gazeuse : V_l : volume de la phase liquide.

Principalement il existe trois méthodes pour la mesure de taux de vide global :

Dans le cas d'un système triphasique ce taux de vide peut garder la même définition en ajoutant la fraction de la phase solide.

$$\varepsilon = \frac{V_g}{V_g + V_l + V_s} \quad (\text{I.2})$$

Avec V_s le volume de la phase solide dans le mélange triphasique.

Remarque : le taux de vide en écoulement triphasique est difficile à obtenir dans la pratique.

I.9.4 Hauteur de plongée

C'est la fraction de la colonne immergée dans la phase liquide. On l'appelle aussi la fraction d'immersion donnée par la relation suivante.

$$H_p = \frac{H}{L} \quad (\text{I.3})$$

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

I.9.5 Gradient de pression

Le gradient de pression le long d'un écoulement diphasique vertical 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})

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

I.9.6 La masse volumique du mélange diphasique

La masse volumique de mélange diphasique (ρ_m) est rapportée aux masses volumiques des deux phases pondérées par leurs fractions respectives dans le mélange :

$$\rho_m = \rho_g \cdot \varepsilon_g + \rho_l \cdot (1 - \varepsilon_g) \quad (I.5)$$

Dans le cas d'un mélange triphasique

$$\rho_m = \rho_g \cdot \varepsilon_g + \rho_l \cdot \varepsilon_l + \rho_s \varepsilon_s \quad (I.6)$$

I.10 Paramètres de performance d'un système de pompage airlift

I. 10.1 Rendement

Pour les systèmes de pompage airlifts diphasique, le rendement est calculé par l'équation de Nicklin (1963). 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) :

$$\eta = \frac{\rho_l \cdot Q_l \cdot g \cdot (L - H)}{Q_g \cdot P_a \cdot \ln\left(\frac{P_{inj}}{P_a}\right)} \quad (I.7)$$

Remarque : concernant le système de pompage airlift triphasiques, dans la littérature il n'existe pour l'instant aucune formule permettant le calcul de rendement.

I.10.2 Efficacité

Dans le cas d'un système diphasique, l'efficacité est définie comme étant le rapport du débit massique de la phase liquide récupérée au débit massique de la phase gazeuse :

$$E_l = \frac{\rho_l \cdot Q_l}{\rho_g \cdot Q_g} \quad (I.8)$$

Dans le cas d'un système triphasique, quand on s'intéresse au pompage de la phase solide, l'efficacité est définie comme étant le rapport du débit massique de la phase solide récupérée au débit massique de la phase gazeuse :

$$E_s = \frac{m_s}{\rho_g \cdot Q_g} \quad (\text{I.9})$$

I.10.3 Rapport de glissement

C'est le rapport de la vitesse superficielle du gaz à celle du liquide donné par l'expression suivante dans le cas d'un écoulement diphasique :

$$S = \frac{U_g}{U_l} \quad (\text{I.10})$$

Il caractérise le glissement ou le mouvement relatif entre les deux phases. En l'absence du glissement, c'est-à-dire $S=1$, on dit que 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 (Woillez, 2014).

I.10.4 Vitesse de glissement

C'est la différence entre la vitesse superficielle de la phase gazeuse et celle de la phase liquide dans le cas d'un écoulement diphasique, elle est donnée par : $(U_g - U_l)$.

I.9.6 La masse volumique du mélange diphasique

La masse volumique de mélange diphasique (ρ_m) est rapportée aux masses volumiques des deux phases pondérées par leurs fractions respectives dans le mélange :

$$\rho_m = \rho_g \cdot \varepsilon_g + \rho_l \cdot (1 - \varepsilon_g) \quad (\text{I.11})$$

Dans le cas d'un mélange triphasique

$$\rho_m = \rho_g \cdot \varepsilon_g + \rho_l \cdot \varepsilon_l + \rho_s \cdot \varepsilon_s \quad (\text{I.12})$$

CHAPITRE II

Revue bibliographique sur les méthodes d'injection

Dans ce chapitre nous essayons de résumer l'essentiel des travaux relatifs au système de pompage de type airlift triphasique rencontré à travers la recherche bibliographique.

Une étude théorique relativement ancienne est réalisée par Kato et al.(1975a) pour soulever des particules solides uniformes en utilisant un système de dimension réduite. Les auteurs se sont basés sur une théorie des écoulements diphasiques déjà existante. Leur modèle élaboré est une combinaison du principe de la quantité de mouvement et le principe du mouvement d'une particule solide seule dans un fluide. Les performances typiques et les caractéristiques fondamentales ont été obtenues en négligeant la compressibilité du gaz. Le modèle établi est validé en comparant leurs résultats à des résultats obtenus avec un système constitué d'une colonne de 19 mm et des particules solides de diamètres 3,75 et 7,57 mm et de densité 2600 kg/m³.

L'étude de Kato et al.(1975a) a été complétée par Kato et al.(1975b) en l'étendant à un système de grandes dimensions et en tenant compte de la compressibilité de l'air. Le test expérimental a été effectué avec une combinaison des différentes particules en céramique dans une colonne de 40 mm de diamètre en utilisant trois hauteurs de plongée (0,6, 0,7 et 0,8).

Pour une application qui concerne la collecte des nodules de manganèse des fonds océaniques Giot(1979) a mené une étude analytique assez riche. L'auteur s'est basé sur l'écriture de l'équation de quantité de mouvement pour finir par proposer une équation donnant le taux de vide, les pertes de charge du système et l'expression du débit du solide.

Yoshinaga et Sato (1996) ont réalisé une étude expérimentale sur les performances d'un système airlift utilisé pour le transport des particules solides en utilisant de l'air et l'eau. Les particules testées sont en céramique, de type uniforme et non-uniforme et de diamètre allant de 6,1 à 9,5 mm. Dans leur étude l'effet du diamètre intérieur de la colonne et la hauteur de plongée sont étudiés. Les auteurs ont conclu que les performances sont affectées par le débit d'air, par le débit du liquide et aussi par le débit de la décharge des particules solides. Les auteurs ont aussi proposé un modèle de prédiction pour le transport des particules non-uniformes. Le modèle, selon les auteurs a été validé par des données expérimentales.

Kassab et al.(2007) ont mené une étude expérimentale et théorique sur un système de pompage triphasique de type airlift. L'étude théorique de ces auteurs a porté sur la proposition d'un modèle pour la prédiction des performances du système. En effet, le modèle proposé n'est autre que la modification de celui de Yoshinaga et al.(1996). Ces derniers, dans leur étude, ont considéré comme paramètres d'entrée le débit de la phase

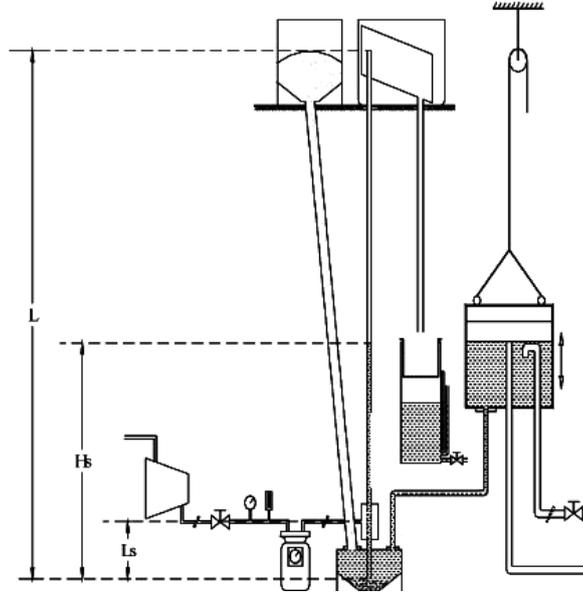


Figure II.1 : dispositif expérimental utilisé par Kassab et al.(2007)

solide et celui de la phase gazeuse. Comme paramètre de sortie, le débit de la phase liquide. Ajoutons à cela, la non-compatibilité du modèle aux systèmes à longues colonnes. Or, Kassab et al. (2007) trouvent que ceci ne concorde pas avec la réalité de la pratique, où seul le débit du gaz peut être pris comme paramètre d'entrée. Alors, pour l'estimation du débit de la phase liquide, ils ont utilisé le modèle **de Stenning et Martin (1968)** qu'ils considèrent assez fiable pour son application dans le cas d'un système diphasique parce que, selon ces auteurs, dans le cas d'un régime à poches, il n'y a pas de différence du débit de la phase liquide en mode diphasique et triphasique.

Leur travail expérimental a été mené avec un système airlift triphasique constitué d'une colonne de 3,75 m de hauteur et de 25,4 mm de diamètre avec un système d'alimentation externe pour les particules solides. Les particules solides utilisées sont des particules de gravier issues d'un concassage de masse volumique égal à 2427 kg/m^3 . Les expériences ont été effectuées avec 4 dimensions dont les diamètres moyens varient de 4 jusqu'à 11 mm. Quatre hauteurs de plongée ont été choisies, à savoir 0,35, 0,5, 0,72 et 0,78. Le débit d'air a été varié pour chaque hauteur de plongée et chaque type de

particules. Les auteurs ont constaté pour les faibles débits d'air l'absence totale du pompage de la phase liquide et la phase solide. En augmentant le débit d'air, il y a eu d'abord le pompage de la phase liquide et pour des débits relativement plus élevés, le pompage de la phase solide commence avec une distribution uniforme des particules dans la colonne. Ainsi, le débit massique de la phase solide et la phase liquide augmente avec l'augmentation de la phase gazeuse jusqu'à atteindre un maximum qui correspond à la transition du régime à poches vers le turbulent baratté. Au-delà de ce maximum, les débits des deux phases liquide et solide se stabilisent d'une façon relative.

L'étude a montré que le débit de la phase solide dépend fortement de la hauteur de plongée. Les auteurs expliquent que les particules solides sont portées par l'interface gaz-liquide et qu'elles tombent beaucoup plus rapidement dans la phase gazeuse que dans la phase liquide. C'est pourquoi toutes les particules solides restent entourées pas le liquide. Ceci confirme ce qui a été rapporté par Kato et al.(1975).

Kassab et al. (2007) rapportent que dans la littérature il n'existe pas de formule permettant le calcul du rendement. Pour évaluer les performances d'un système, la notion de l'efficacité est introduite. L'efficacité est qui est définie comme étant le rapport du débit massique de la phase solide au débit massique de la phase liquide. Kassab et al. (2007) en commentant leurs résultats expérimentaux, expliquent que l'efficacité augmente avec le débit de la phase gazeuse jusqu'à atteindre un maximum sans que ce maximum corresponde au maximum de la valeur maximale du solide récupéré. Les auteurs estiment que l'ordre de grandeur de l'efficacité est assez faible mais cela reste tout de même intéressant du point de de vue pratique puisqu'un aucun autre type de pompe ne peut effectuer une telle tâche.

Concernant l'effet de la taille des particules, Kassab et al. (2007) trouvent que plus la taille augmente plus le débit de la phase solide décroît. Les auteurs expliquent cela par le fait que la surface spécifique des petites particules est plus grande que celle des grandes particules et de ce fait, la résistance au frottement est plus importante dans les cas des petites particules. Par conséquent, les particules de grande dimension deviennent difficiles à transporter. Les auteurs rapportent qu'une autre explication a été donnée par Kato et al. (1975) selon laquelle, la force nécessaire pour soulever les grosses particules est plus importante que celle nécessaire pour soulever les petites.

En s'inspirant du modèle de Yoshinaga et Sato (1996), Kassab et al. (2007) ont élaboré un modèle basé sur des corrélations expérimentales dans le but de prédire les performances d'un système airlift triphasique. Le modèle élaboré est confronté aux résultats expérimentaux. Les auteurs trouvent que le modèle ne s'écarte que légèrement avec les points expérimentaux et ils expliquent cet écart par le fait que l'interaction entre phases et la compressibilité de l'air ont été négligés. Les auteurs proposent le même modèle pour une utilisation dans le système diphasique, et ce, en prenant la fraction solide égale à zéro.

Récemment Deendarlianto et al.(2019) ont mené une étude expérimentale sur les performances d'un système de pompage de type airlift triphasique. En effet, ces auteurs ont procédé à la modification du système classique en concevant un système équipé d'un générateur de microbulles. L'injection se fait selon trois angles différents par rapport à l'horizontale (15° , 30° , 45°). La colonne utilisée est de 50 mm de diamètre, l'air est utilisé comme phase gazeuse et l'eau comme phase liquide. Pour la phase solide, les particules

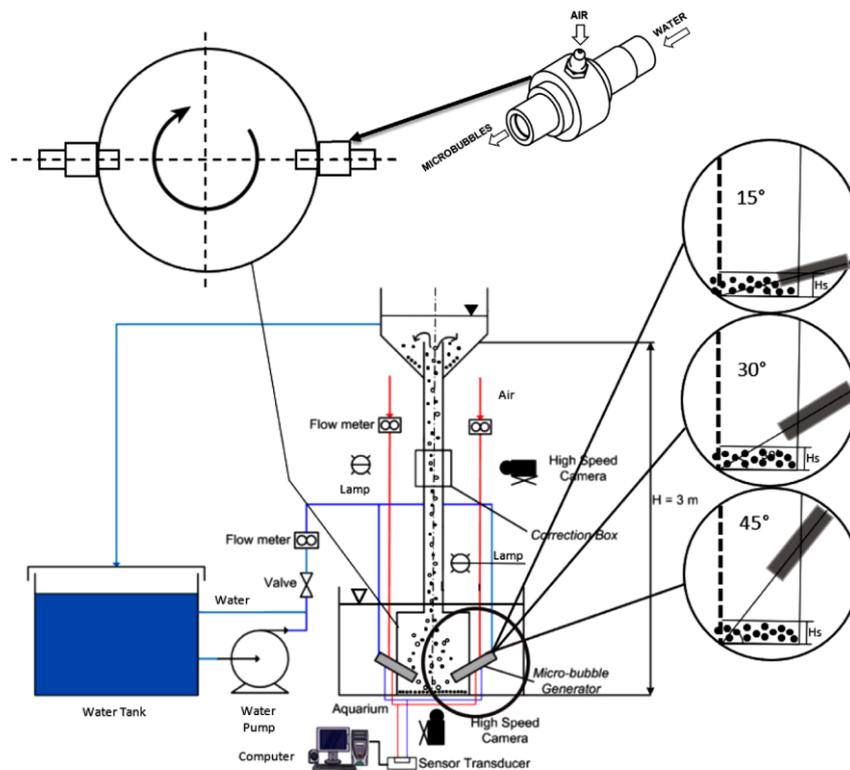


Figure II.2 : dispositif expérimental utilisé par Deendarlianto et al.(2019)

de sable et de charbon ont été utilisées. Le diamètre moyen des particules varie de 0,33 à 0,81mm. Le comportement des particules a été suivi par une caméra ultra-rapide et l'analyse est appuyée par méthode avancée du traitement d'image. Comme résultats, les auteurs trouvent que les performances optimales pour le pompage des particules solides ont été associées au régime à poches et que le régime d'écoulement joue un rôle important. Le débit du gaz, l'angle d'inclinaison, la densité des particules sont les paramètres principaux dont dépend la capacité du système. Dans le but de produire une très forte force de trainée pour le transport des particules, il a été constaté que plus l'angle d'injection est important plus est débit du solide est plus grand. Quant au débit du gaz, son augmentation influe positivement sur le transport du solide, contrairement à la densité des particules qui, plus elle est grande plus le débit du solide est moins important. En comparaison avec un système sans générateur de bulles, les auteurs ont conclu que l'intégration du générateur de microbulles dans un système de pompage airlift augmente la capacité du système augmente de 17 %.

Fujimoto et al. (2003) ont mené une étude expérimentale pour l'étude des performances d'un système de pompage airlift triphasique (air-eau-solide). Le dispositif expérimental des auteurs consiste en une colonne de 3,2 m de hauteur et 18mm de diamètre intérieur. En vue d'étudier l'effet du point d'injection de l'air, quatre points ont été choisis le long de la colonne, à savoir, 270, 800, 1300 et 2000 mm à partir de la base de la colonne. La phase solide utilisée consiste en des particules d'aluminium et de verre de diamètre 2,3 et 5 mm et de masse volumique respectivement $3600 \frac{kg}{m^3}$ et $2400 \frac{kg}{m^3}$. Le travail expérimental a été mené dans le but d'étudier l'effet de la taille et la densité des particules ainsi que le débit volumique du gaz et le point d'injection. Les auteurs ont conclu que les débits des deux phases liquide et solide augmentent en fonction du débit d'air jusqu'à atteindre un maximum. Au-delà du maximum, ces débits commencent à décroître légèrement ou stabilisent. Le débit de la phase solide décroît avec l'augmentation de la taille et la densité des particules. Quant au point d'injection du gaz, l'étude a montré que les débits des phases liquide et solide diminuent avec l'élévation du point d'injection. A l'issue du travail, Fujimoto et al. (2003) ont proposé un modèle simple pour la prédiction du débit minimum d'injection de la phase liquide. Les auteurs trouvent que ce modèle est assez fiable.

Fujimoto et al. (2004) rapportent que les systèmes airlift à colonnes localement déformées sans inévitables dans la pratique (puits de formes irrégulières, récupération des minéraux en haute mer...etc.) ont réalisé une étude expérimentale sur un système de pompage airlift triphasique dans le but d'étudier l'effet d'une déformation locale de la colonne. Pour ce faire, ils ont utilisé trois colonnes dont la première comporte une déformation en forme de S en aval du point d'injection d'air, la seconde comporte la déformation en aval du point d'injection et la troisième une colonne droite sans déformation (voir figure II.3).

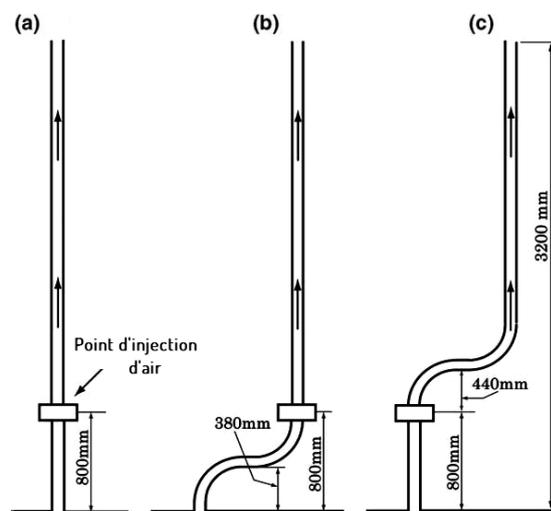


Figure II.3: colonnes utilisées par Fujimoto et al. (2004)

L'analyse des résultats a montré que la présence d'une déformation le long de la colonne réduit les performances du système. Toutefois, la réduction des performances est beaucoup plus accentuée lorsque la déformation se situe au-dessus du point d'injection d'air. Les auteurs ont également abordé le débit minimum du liquide requis pour l'amorçage du transport du solide. Ce débit est explicité par une équation provenant d'un bilan de quantité de mouvement :

$$U_L = \sqrt{\frac{4d_s(\rho_s - \rho_L)}{3C_D\rho_L}} \quad (\text{II.1})$$

Pour ce cette vitesse, il a été conclu que plus le débit des particules solides est important, plus est faible le débit de la phase liquide.

Fujimoto et al.(2005) ont enrichi ce travail par une autre étude expérimentale dans laquelle ils ont étudié l'effet d'une déformation S sur les performances d'un système triphasique. Dans cette étude, tout en utilisant une colonne droite de 3,2 m et de 18 mm diamètre comme référence ils ont introduit des déformations en forme de S au-dessous et au-dessus du point d'injection en changeant d'angle de déformation ($24,5^\circ$, $50,6^\circ$ et $90,0^\circ$) tel que le montre la figure (II.4). L'étude a été faite sur trois hauteurs de plongée (0,47 ; 0,6 et 0,68).

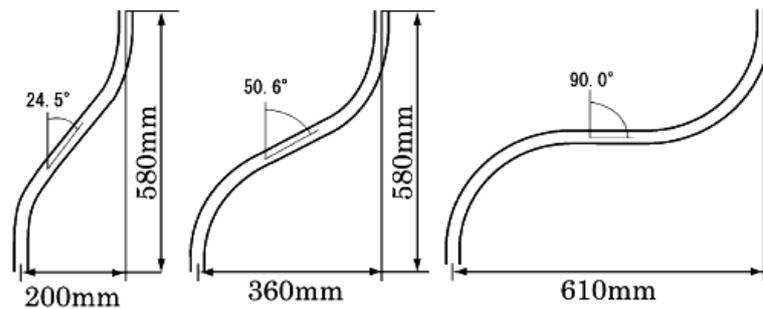


Figure II.4: Déformation introduites au niveau de la colonne par par Fujimoto et al.(2005)

Par un traitement d'images approprié, les auteurs ont conclu que les performances du système sont fonction de l'inclinaison de la déformation, c'est-à-dire, plus l'angle est important plus le débit du solide est important aussi. Ceci, parce que pour les une faibles inclinaisons, la portion de la conduite qui constitue la déformation tend à être horizontale ce qui fait que les particules solides s'accumulent avec le risque de provoquer le colmatage. Ceci devient d'autant plus accentué lorsque la partie déformée est située au-dessous du point d'injection est situé au-dessous.

Dans le même contexte des analyses théoriques, dans le but d'établir une méthode de prédiction des performances d'un système triphasique sous des conditions de fonctionnement prédéterminées, Margaritis et Papanikas (1997) ont mené une étude analytique basé sur un système d'équations différentielles dérivant des équations fondamentales de conservation de masse et de la quantité e mouvement. Avec l'application d'un algorithme approprié. L'algorithme permet de calculer le diamètre optimal de la colonne, la position du point d'injection et d'autres paramètres qui permettent d'optimiser la consommation d'énergie. Selon les auteurs, la méthode peut être appliquée dans le cas des colonnes verticales de

petites et de grande hauteur puisque la procédure est indépendante du régime d'écoulement. Les auteurs pensent qu'au niveau du point d'injection le régime est à bulles et ce n'est que dans la partie supérieure de la colonne que l'expansion de la phase gazeuse tend vers un régime annulaire. Pour cela, ils supposent un taux de vide limite de 50 % pour éviter la transition du régime d'écoulement. Les résultats de la présente analyse concordent bien avec les données existantes dans la littérature.

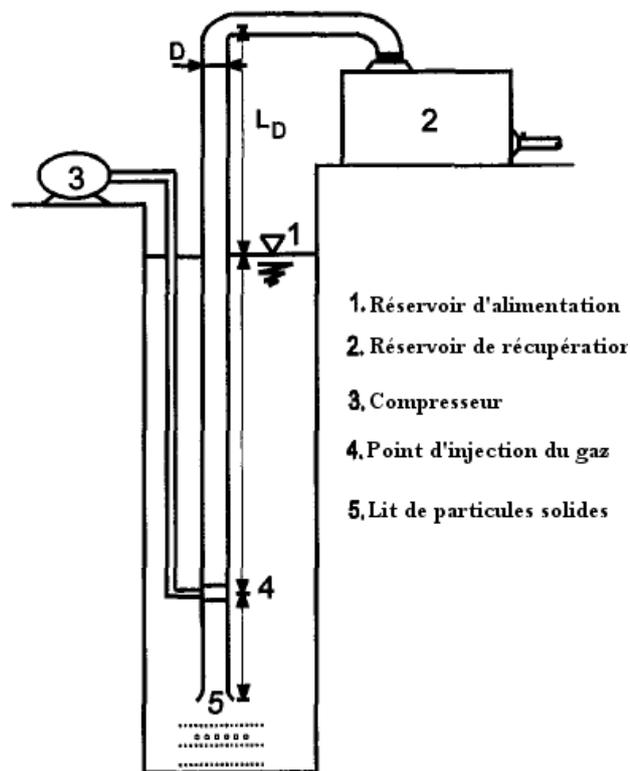


Figure II.1: Modèle de système airlift triphasique proposé

CHAPITRE III

Dispositif expérimental et techniques de mesures

Dans ce chapitre il s'agit de décrire le dispositif expérimental ainsi que les techniques de mesures utilisées. Le dispositif expérimental a été réalisé au niveau du laboratoire de l'hydrodynamique de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia. Il a été utilisé comme pilote pour différents travaux expérimentaux sur les systèmes airlift diphasiques (Tighzert (2015), Saidi et Yahiaoui (2016), Belhadj et Ouamara (2017), Yousfi et Soualah (2018)).

A l'origine, le dispositif expérimental utilisé est conçu pour un fonctionnement en diphasique (gaz-liquide). Dans le cas de notre travail, nous avons apporté des modifications pour l'adapter au fonctionnement triphasique pour pouvoir faciliter l'alimentation en particules et la récupération de ces particules pour pouvoir les peser (voir plus loin l'alimentation en phase solide).

La conception et le montage, après l'avoir adapté à notre objectif, a dû répondre aux critères suivants :

- Visualisation de l'écoulement de la phase liquide ;
- Visualisation du comportement de la phase solide ;
- Moyen adéquat pour l'alimentation en phase solide ;
- Possibilité e récupérer les particules solides sans perturber la phase liquide ;
- Possibilité de varier la hauteur de plongée aisément.

III.1 Eléments composant l'installation

Il s'agit d'un système airlift, fonctionnant en boucle externe, modifié pour un fonctionnement en triphasique et composés de plusieurs éléments que nous allons détailler. L'ensemble de cette installation est schématisé sur la figure (III.1)

a. La colonne (riser)

C'est un tube cylindrique de 3m de longueur et 33 mm de diamètre intérieur. Il est en position verticale, fabriqué en plexiglas et transparent, permettant ainsi la visualisation de l'écoulement. A la base le tube est relié à la section de transit et au sommet relié au séparateur de phase.

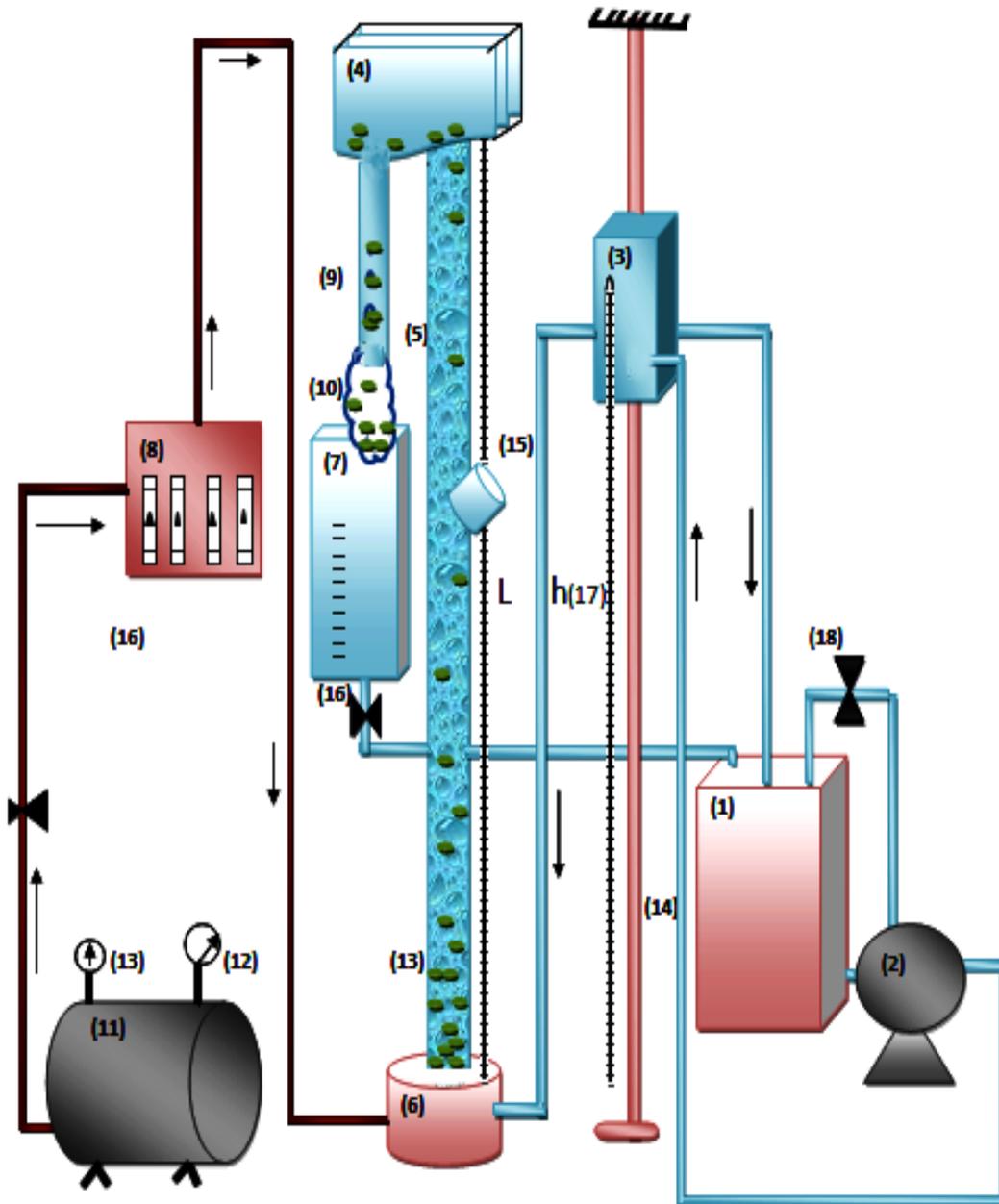


Figure III.1 : Schéma de l'installation expérimentale

(1): Réservoir ; (2) : Pompe à eau ;(3) :Bac coulissant ; (4) : Séparateur de phases; (5) : Colonne; (6) : Section du transit ; (7) : Bac gradué ;(8) : Débitmètres à air ; (9) : Downcomer ; (10) : Pochette des particules ; (11) : Compresseur ; (12) Régulateur de pression ; (13) : Régulateur de la charge ; (14) : Support du bac coulissant ; (15) : Alimentation en particule solides; (16) :Vanne ; (17) : Règle graduée.

b. Réservoir d'alimentation liquide

C'est un réservoir parallélépipédique, ouvert, fabriqué en acier, utilisé pour garantir l'alimentation en phase liquide dans tout le système, relié à une pompe munie d'un suppresseur. La pompe a pour rôle le remplissage en continu de la colonne jusqu'au niveau qui représente la hauteur de plongée.



Figure II.2 : Réservoir d'alimentation liquide

c. Section du transit

C'est une pièce cylindrique, creuse, fabriquée en téflon, de diamètre extérieur de 12 cm et de diamètre intérieur de 10cm. Elle est fixée avec des vis sur le support de la structure métallique de l'installation. Dans la partie creuse est montée verticalement la colonne qui sera siège de l'écoulement triphasique (figure III.3). La section de transit sert de relai entre le bac coulissant et la colonne lors du remplissage. Elle 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.

La section de transit, a subi une modification pour l'adapter au fonctionnement triphasique. Nous l'avons munie à sa sortie d'une grille couvrant la surface de section de la colonne et permettant ainsi de retenir les particules à introduire. De cette façon, les particules forment un lit fixe, comme celui des dispositifs de la fluidisation.

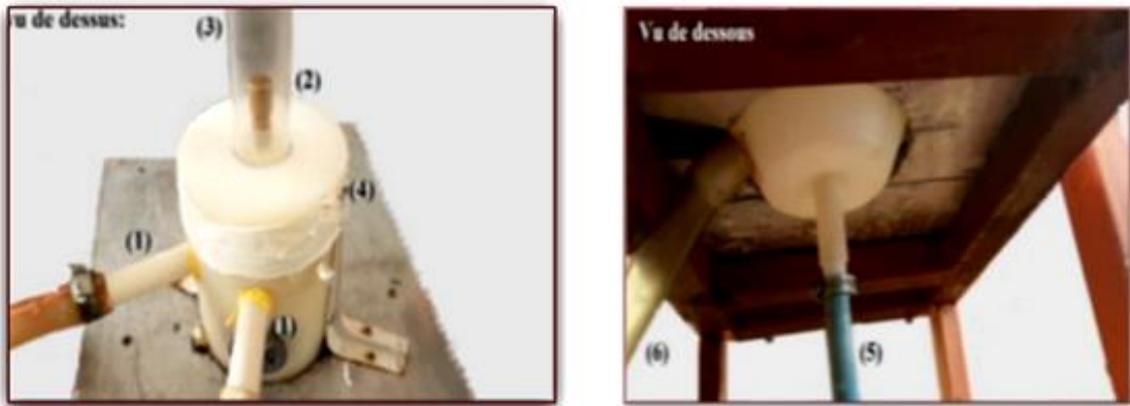


Figure (III.3) : Section de transit vue de dessus (à gauche) et de dessous (à droite)
(Yousfi et Soualah (2018))

(1) : Alimentation en phase liquide ; (2) : disperser ; (3) : colonne ; (4) section du transit ;
(5) : orifice pour la vidange.

c. Séparateur de phases

C'est un bac parallélépipédique, ouvert et transparent, fabriqué en plexiglas, monté sur la structure métallique, fixé au plafond et relié à la sortie de la colonne. Le mélange diphasique ou triphasique atteint cette partie se sépare en trois phases. L'air est évacué vers l'extérieur et la phase liquide est acheminé à travers le donwcomer (9) pour atteindre le bac de mesure du débit du liquide (7). Les particules solides sont retenues dans la poche à particules (10). Le bac est suffisamment profond et fermé par une grille pour éviter l'entraînement du liquide vers l'extérieur.



Figure III.4 : Séparateur de phases

d. Bac coulissant

C'est un élément parallélépipédique, fabriqué en zinc, de dimension 30x15x15cm, utilisé pour la variation de la hauteur de plongée (figure IV.5). Le bac est fixé sur une tige métallique placée en face une règle graduée permettant le choix et le réglage de la hauteur de plongée. La hauteur de plongée est réglée à partir de la position de ce bac qu'on peut varier. La colonne se remplit au même niveau que ce bac par le principe des vases communicant. Le bac possède une entrée pour son alimentation en phase liquide, et deux sorties, l'une pour le remplissage de la colonne, en renvoyant la phase liquide vers la section du transit puis vers la colonne, et l'autre sert à évacuer l'excès du liquide vers le réservoir d'alimentation.

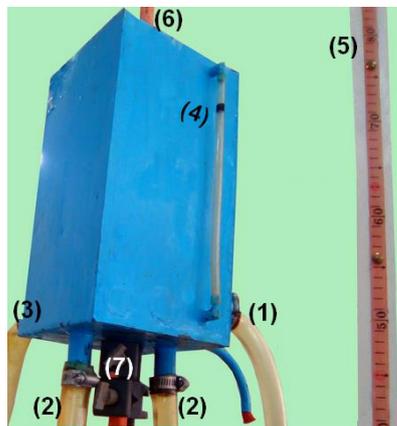


Figure IV.5 : Bac coulissant

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

e. Débitmètres à air

Pour la mesure du débit d'air injecté et pour couvrir une large gamme de mesures nous avons monté quatre débitmètres à flotteurs de type Krohne. Ils sont installés en parallèle. Le débit total d'air qui alimente la colonne est contrôlé par ces quatre débitmètres en faisant la somme des valeurs indiquées par chaque débitmètre selon le cas et selon le débit recherché (Figure III.6). Pour des raisons techniques, la gamme des débits balayée varie de 0 jusqu'à 4000 l/h pour la mesure des débits solide ou liquide. Quant à la mesure du débit minimum d'injection, la gamme est étendue jusqu'à 6000 l/h.



Figure III.6 : Débimètre à air utilisé (emplacement en parallèle)

f. Mode d'injection et disperseur

Le mode d'injection de l'air comprimé dans la colonne se fait à l'aide d'un disperseur qui permet une injection radiale. Ce disperseur est un tube de diamètre intérieur de 10 mm qui dispose de 96 trous sur sa surface latérale réalisée d'une façon symétrique (figure III.7)

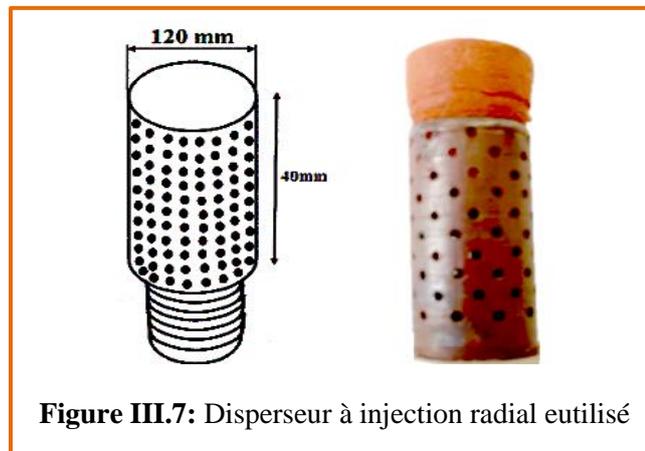


Figure III.7: Disperseur à injection radial utilisé

g. Alimentation en particules solide

C'est au niveau de cet élément que nous avons apporté des modifications dans l'installation. L'alimentation en particule solide s'est faite d'une manière discontinue à travers une entrée réalisée à 1m du disperseur. L'entrée consiste en un tube en forme de Y (en PVC) relié par une colle sous forme de pâte (araldite) à la colonne. Nous avons opté pour ce mode de l'alimentation en raison de sa facilité et aussi dans l'objectif d'éviter tout risque lors de la manipulation.



Figure III.8 : Dispositif d'alimentation en particules solides

III.2 Alimentation en phase liquide

L'alimentation en phase liquide est réalisée par l'aspiration du liquide contenu dans le réservoir (1) à l'aide d'une pompe qui le refoule jusqu'au bac coulissant, d'où il est renvoyé par gravité et par principe de vases communicants jusqu'au niveau choisi comme hauteur de plongée. Comme phases liquides, nous avons utilisé l'eau du robinet, deux solutions de CMC de concentration 6 et 10 g/l.

III.3 Alimentation en phase gazeuse

Comme phase gazeuse utilisée dans notre travail, c'est de l'air comprimé provenant d'un compresseur de marque Iuowei ayant une capacité de 100 litres et une pression d'injection maximale atteignant 8 bars (figure III.9). Le compresseur est muni d'un manomètre pour faire varier la pression d'injection. La gamme de pression utilisée varie de 1,2 à 4 bars. L'air sortant du compresseur est acheminé à travers un tuyau à gaz en passant par quatre débitmètres placés en parallèle. Afin d'éviter le retour de la phase liquide au compresseur, le tuyau à gaz passe au-dessus du séparateur de phases.



Figure III.9 : Compresseur utilisé

III.4. Alimentation en phase solide

Après avoir testé plusieurs modes d'alimentation rencontrés dans la littérature, nous avons opté par une alimentation qui consiste à introduire des particules solides à travers une entrée en forme Y placée presque au milieu de la colonne (figure III. 8 et 10). Les particules ainsi introduites, sont retenues par une grille à la base de la colonne, formant un lit dont la hauteur est maintenue fixe. Pour travailler dans les mêmes conditions durant toutes nos expériences, nous avons toujours gardé la même masse de particules, pour ce faire, une pesée est toujours effectuée avant de les introduire et après les avoir récupérées. La récupération des particules se fait par l'injection de l'air comprimé à fort débit en présence d'une phase liquide.



Figure III.10 : Alimentation en phase solide
(a) Introduction de particules ; (b) : lit de particules au fond de la colonne

III.5 Caractérisation des particules solides

La phase solide utilisée dans le cadre de ce travail consiste en des particules en verre, transparentes, de deux dimensions (4 et 8 mm). Les caractéristiques de ces particules sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Caractéristiques des particules solides (Kechroud et al.,2010)

Particules	Matière	Diamètre (mm)	Masse volumique $\frac{kg}{m^3}$
D4	Verre (transparente)	4	2564
D8	Verre (transparente)	8	2595

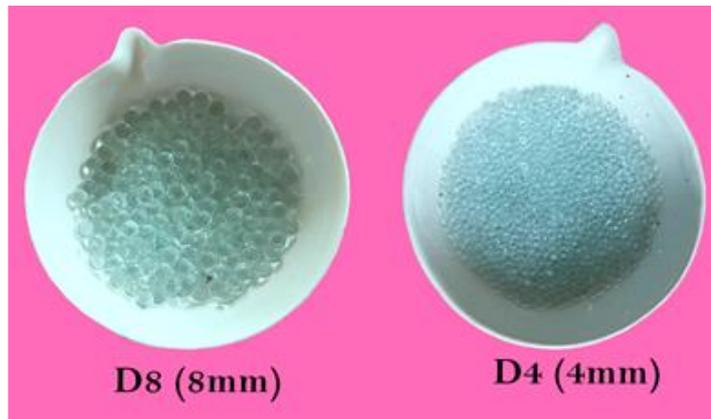


Figure III.11: Particules en verre utilisées comme phase solide

III.5 Caractérisation de la solutions CMC utilisée

La carboxyméthylcellulose (CMC) est un composé organique naturel de formule : $C_8H_{16}NaO_8$, formée après sa réaction avec un alcali et l'acide chloroacétique. La CMC purifiée est une substance granulaire blanche grisâtre, présentée en poudre non-toxique, inodore, biodégradable. Contrairement à la cellulose, la CMC est soluble dans l'eau froide et chaude. La CMC est disponible à différents niveaux de viscosité et du point de vue rhéologique, elle possède un comportement non-newtonien (rhéofluidifiant).

Dans le cadre de ce travail nous avons utilisé une solution de concentration 10g/l pour certaines expériences et une autre concentration de 6g/l. Notons que l'utilisation de la solution CMC (10g/l), relativement assez visqueuse, nous a confronté à des contraintes techniques lors de la manipulation. La difficulté du contrôle de niveau du liquide dans la colonne, la résistance et le blocage de l'écoulement au niveau de la grille de la section de transit nous ont amenés à opter pour une deuxième solution moins concentrée (6g/l).



Figure III.12 : Préparation de la solution CMC

Tableau (III.2) : caractéristique des solutions CMC utilisées

Phase liquide	Masse volumique (kg/m ³)	Comportement rhéologique
Solution CMC (6g/l)	978	Comportement non newtonien (fig.III.13)
Solution CMC (10g/l)	1008.6	Comportement non newtonien(fig.III.14)

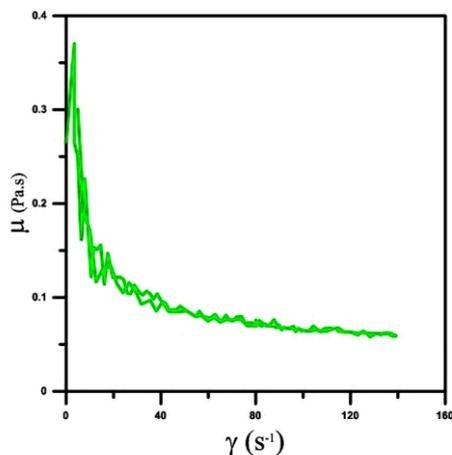


Figure III.13 : variation de la viscosité dynamique en fonction de la vitesse de cisaillement pour la solution CMC (6g/l)

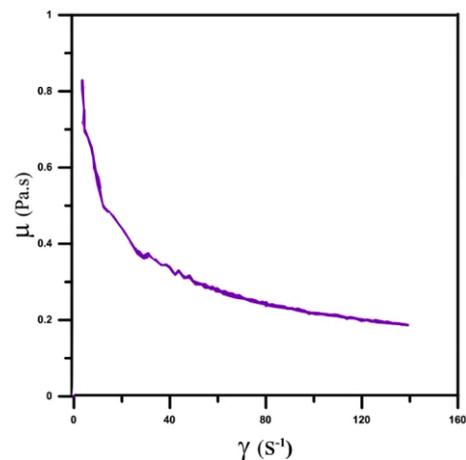


Figure III.14 : variation de la viscosité dynamique en fonction de la vitesse de cisaillement pour la solution CMC (10g/l)

III.6 Mise en fonctionnement de l'installation

- **Etape 1** : la colonne étant vide, introduire les particules solides via le système d'entrée (15) après les avoir pesées et s'assurer que le système d'entrée est bien fermé.
- **Etape 2** : Choisir la hauteur de plongée de travail en fixant la position du bac coulissant à la graduation correspondante sur la règle graduée (17). Le contrôle du niveau du liquide via l'indicateur de niveau (3) doit se faire en permanence pour éviter le débordement du liquide où
- **Etape 3** : Allumer la pompe à eau pour alimenter la colonne en phase liquide jusqu'au niveau de la hauteur de plongée ;
- **Etape 4** : Charger le compresseur en le mettant sous tension et procéder au réglage de la pression d'injection. Jusqu'à présent aucun écoulement n'est observé dans la colonne ;
- **Etape 5** : Varier le débit d'air avec des pas bien choisis
- **Etape 6** : Observer le mélange triphasique dans la colonne en notant tout changement afin de caractériser les régimes d'écoulement et d'analyser le comportement des particules solides. A ce niveau, en fonction du débit d'air, on obtient un écoulement diphasique ou triphasique ;
- **Etape 6** : Procéder aux mesures désirées :
 - Le débit de pompage de la phase liquide ;
 - Le débit de pompage de la phase solide ;
 - Le débit minimum d'air nécessaire pour amorcer le pompage solide ;
 - Le débit minimum d'air nécessaire pour amorcer le pompage liquide ;
 - la caractérisation visuelle des régimes d'écoulement et du comportement des particules.

A la fin de chaque expérience, nous avons pris la température des deux phases.

III.7 Techniques de mesures

III.7.1 Caractérisation des régimes et comportement des particules

Pour la caractérisation des régimes de l'écoulement et l'analyse du comportement des particules solides, nous avons observé et suivi l'écoulement ainsi que les particules à l'œil nu et aussi avec des prises de photographies et de vidéos.

III.7.2 Mesure du débit de la phase liquide

Ce débit ne peut être mesuré qu'une fois le pompage est amorcé. Pour ce faire, à l'aide d'un chronomètre, on mesure le temps nécessaire pour recueillir un volume qui correspond à deux graduations choisies du bac (7) (voir figure (III.15)).

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

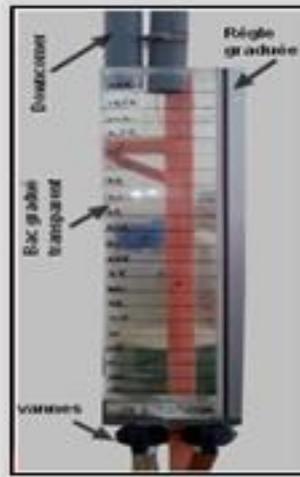


Figure III.15: Bac gradué pour la mesure du débit

III.7.3 Mesure du débit de la phase solide

Pour la mesure du débit de la phase solide, une pochette à base d'un tissu avec un maillage fin (10) qui ne laisse passer que la phase liquide est accrochée à la sortie du downcomer, elle-même liée au bac du débit de la phase liquide (7). De ce fait, quand il y a un pompage solide, les particules sont retenues (piégées) dans cette pochette. A l'aide d'un chronomètre, on mesure le temps nécessaire pour recueillir une masse donnée. La masse recueillie, étant mouillée, est d'abord séchée à l'aide d'un séchoir avant d'être pesée (voir figure (III.16)).

Le débit massique est donc le rapport de cette masse retenue (m) au temps mesuré (t) :

$$Q_s = \frac{m}{t} \quad (\text{III.2})$$

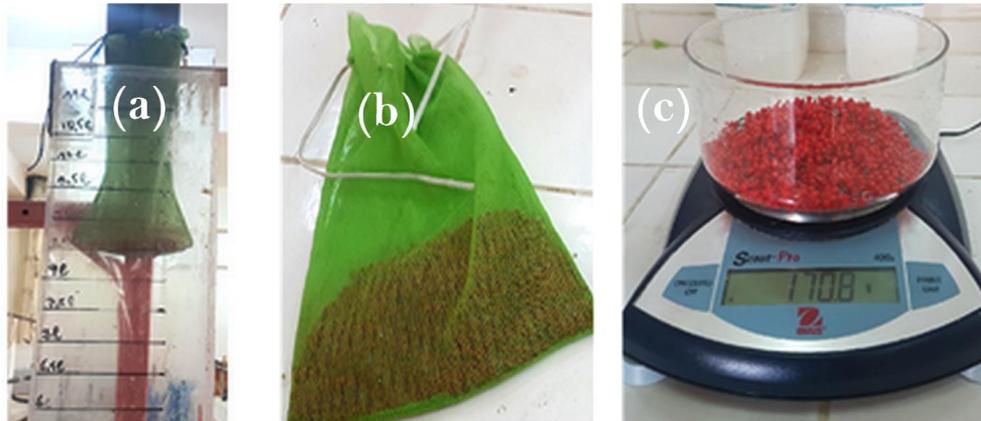


Figure III.16 : Mesure du débit de la phase solide ; (a) : récupération des particules à l'aide de la pochette ; (b) : pochette accrochée à la sortie du downcomer ; (c) : pesée des particules

III.7.4 Mesure des débits minimums

Ce paramètre a été mesuré pour la phase liquide et la phase solide. Pour la phase liquide, il s'agit du débit minimum d'air à injecter pour amorcer le pompage de la phase liquide. Nous l'avons mesuré en variant la hauteur de plongée de 0,3 jusqu'à 0,9 avec un pas de 10 cm sur la règle graduée. Dans le chapitre IV, nous l'avons noté Q_{gl-min}

De même, pour la phase solide, le débit minimum est le débit d'air à injecter pour amorcer le pompage du solide. Nous avons utilisé la même gamme hauteur de plongée. Dans le chapitre IV, nous l'avons noté Q_{gs-min} .

Pour les deux phases, les débits minimums ont été mesurés avec la solution CMC et l'eau. Dans le cas de la phase solide, les mesures ont été effectuées avec les particules D4 et les particules D8.

III.8 Choix de la hauteur de plongée

Nous rappelons que la hauteur de plongée est le rapport de la partie immergée de la colonne à la hauteur totale de la même colonne. Elle est donnée par :

$$H_p = \frac{H}{L} \quad (\text{III.3})$$

Pour les mesures nous avons opté pour quatre hauteurs de plongée (0,4 ; 0,5 ; 0,6 et 0,7). Quant aux débits minimums, le pas de la hauteur de plongée a été raffiné (10 cm).

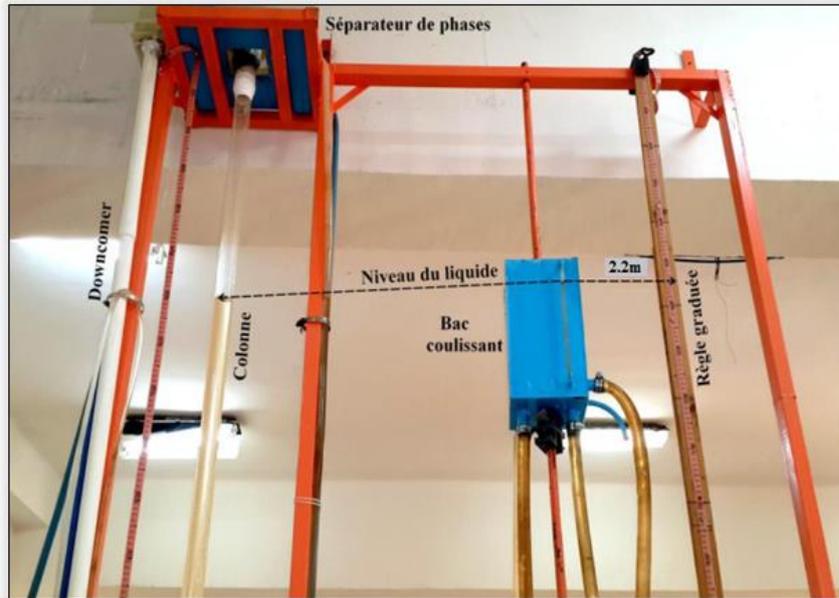


Figure III.17: Exemple du choix de la hauteur de plongée $H_p = 0,7$

III.9 Contraintes expérimentales

- Pour ne pas courir le risque d'endommager le dispositif et aussi en raison des problèmes de débordement, nous avons opté pour une gamme de débit d'air variée de 80 à 4000 L/h.
- Les mesures avec la solution de la CMC(10g/l) sont extrêmement difficiles. La nature rhéologique de cette phase liquide a fait que le remplissage et la vidange de la colonne ne se font pas d'une manière adéquate.
- Il est extrêmement difficile de travailler à des hauteurs de plongée faible ($H_p \leq 0,4$). De très grands débits d'air sont nécessaires pour soulever les particules solides.
- L'alimentation de la colonne en phase solide en mode discontinu rend difficile le contrôle de certains paramètres (débit d'air à haute gamme, débit du solide, le temps des expériences). Il nous a été impossible de travailler avec un mode en continu.



Figure III. 18 : Photographie de l'installation expérimentale

CHAPITRE IV

Résultats et discussions

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

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

IV.1 Caractérisation des régimes d'écoulement

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

a. Régime à bulles

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

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

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

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



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



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

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

b. Régime à poches

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

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

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

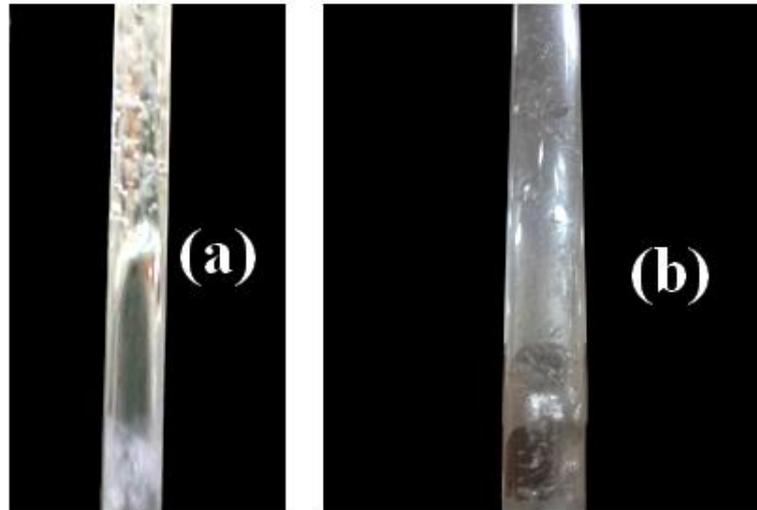


Figure IV.2 : Visualisation du régime à poches dans la moitié inférieure de la colonne

c. Régime turbulent baratté

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

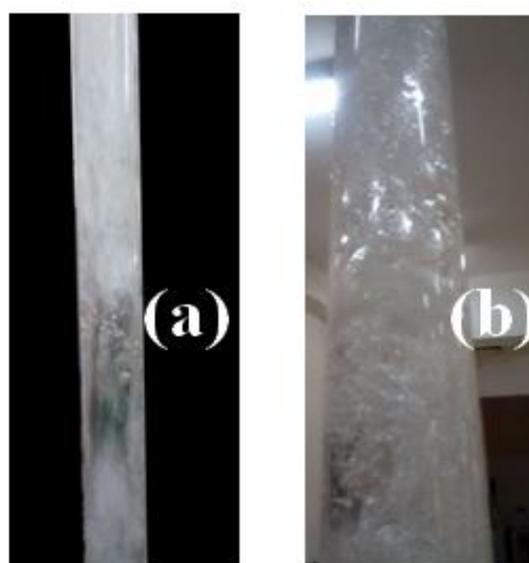


Figure IV.3 : Visualisation du régime turbulent baratté (a): En amont ; (b) : En aval

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

IV.2 Débit de la phase liquide

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

Sur la figure (IV.4) nous avons représenté l'évolution du débit de la phase liquide en fonction du débit d'air injecté pour la hauteur de plongée $H_p = 0,7$. La présente figure montre que l'évolution du débit de la phase liquide se fait suivant trois phases distinctes. La première phase (1) correspond à la gamme des débits d'injection d'air qui n'ont pas produit de pompage. Dans cette phase, la phase liquide n'atteint pas le séparateur de phases. La seconde (2), correspond à la gamme des débits d'air où le pompage a eu lieu. Dans cette étape, on constate que le débit de la phase liquide augmente d'une façon assez sensible avec le débit de la phase gazeuse. Nous avons constaté visuellement que cette phase est associée au régime à bulles et au régime à poches. A la troisième phase, le débit de la phase liquide continue de augmenter avec l'augmentation du débit d'air mais d'une façon moins sensible avec une tendance à se stabiliser.

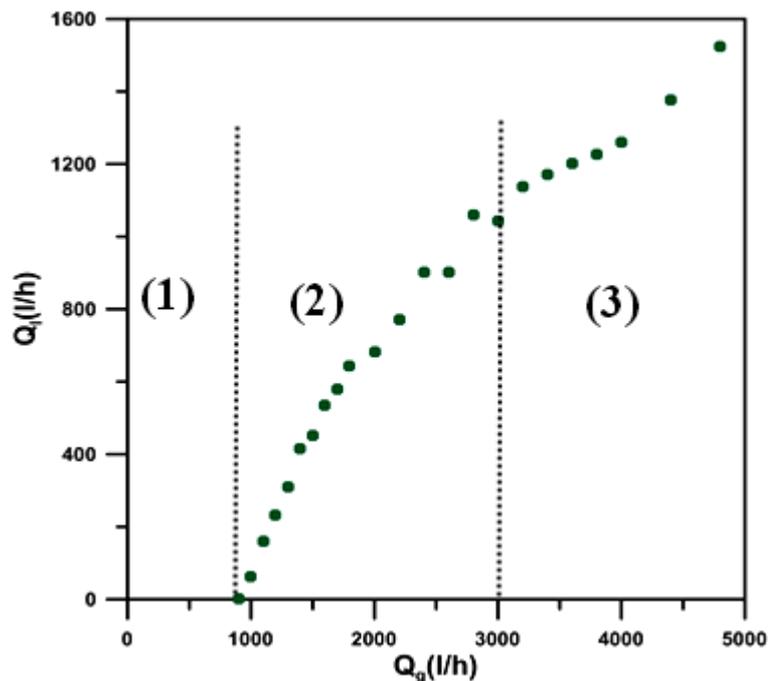


Figure IV.4: Evolution du débit de la phase liquide en fonction du débit de la phase gazeuse pour $H_p = 0,7$

IV.2.2 Reproductibilité des résultats

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

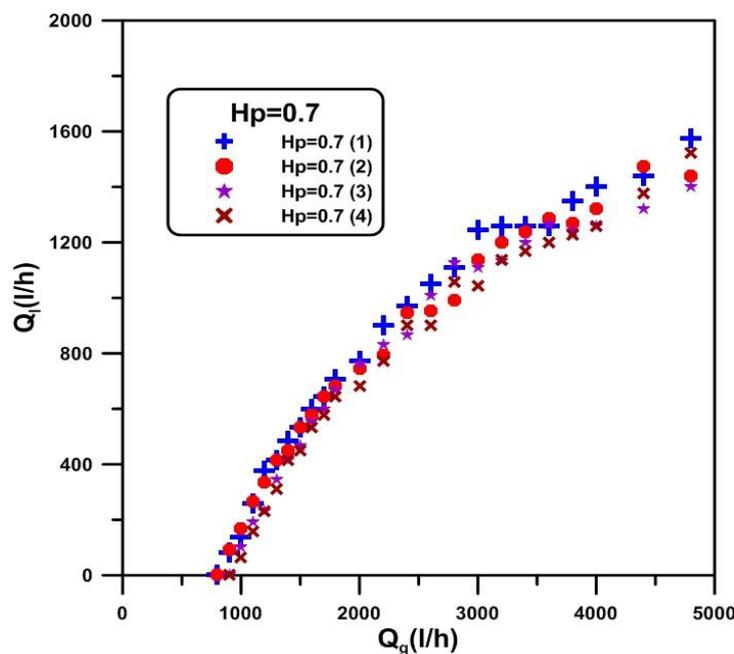


Figure IV.5: Reproductibilité des résultats expérimentaux pour $H_p = 0,7$

IV.2.3 Effet de la hauteur de plongée

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

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

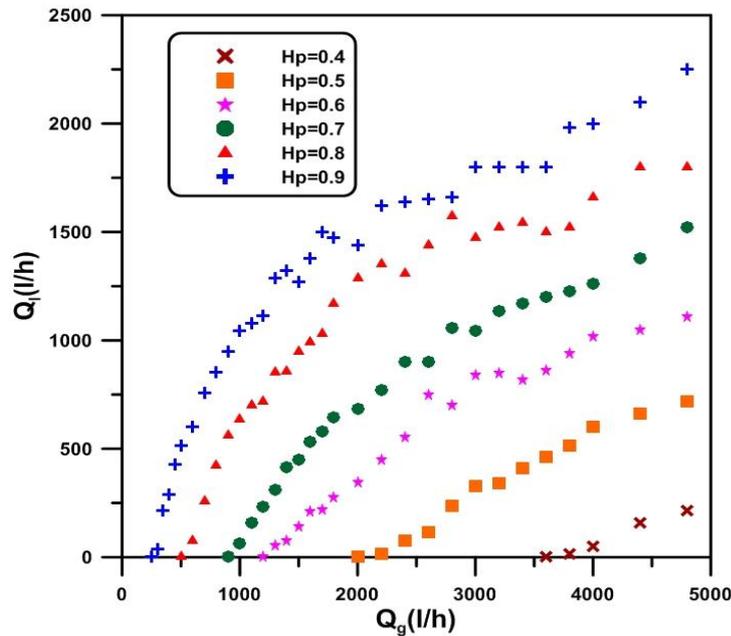


Figure IV.6 : Evolution du débit de la phase liquide en fonction du débit d'air pour diverses hauteurs de plongée

IV.2.4 Comparaison avec un système ordinaire

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

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

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

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

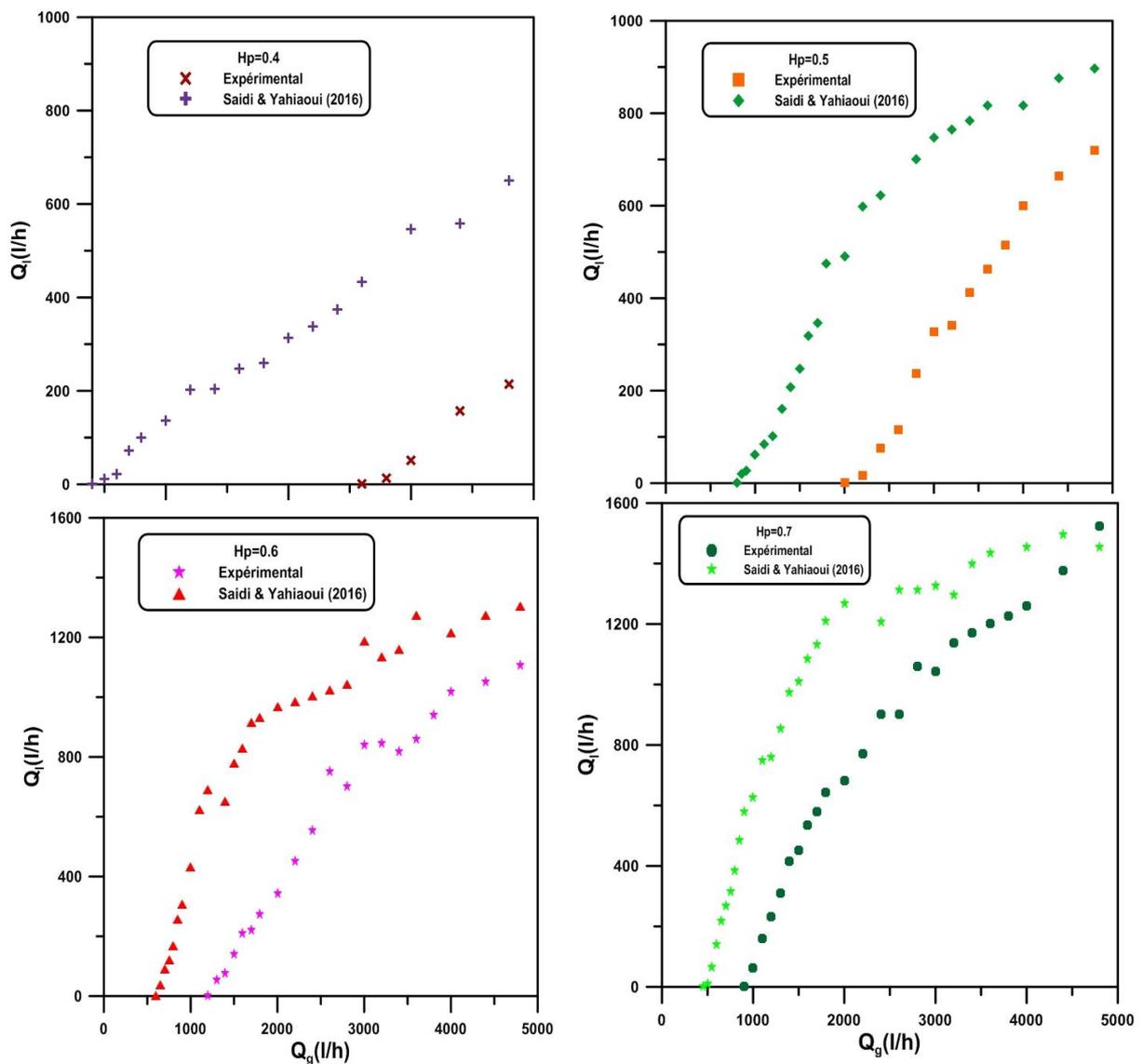


Figure IV.7: Confrontation du débit de la phase liquide de la présente étude avec celui d'un système ordinaire

IV.3 Débit minimum d'injection

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

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

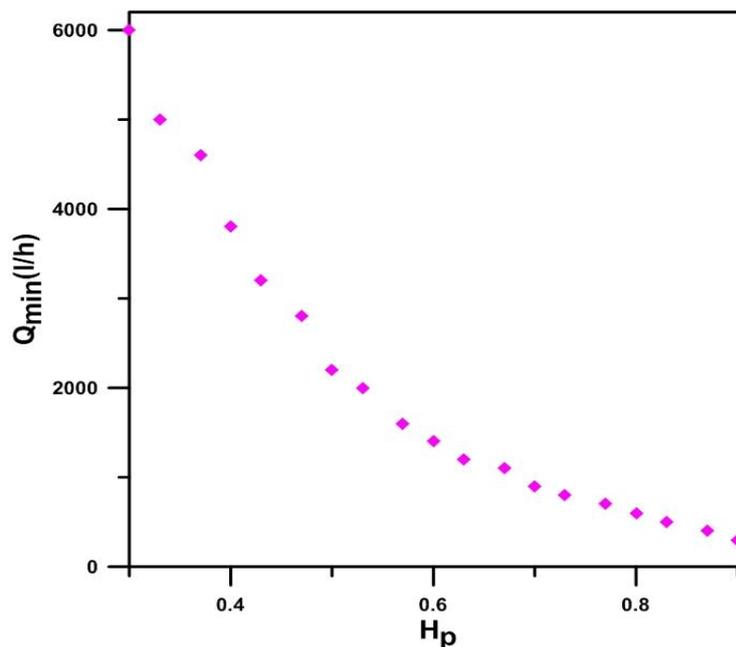


Figure IV.8: Evolution du débit minimum d'injection en fonction des hauteurs de plongée.

IV.3.2 Comparaison avec un système ordinaire

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

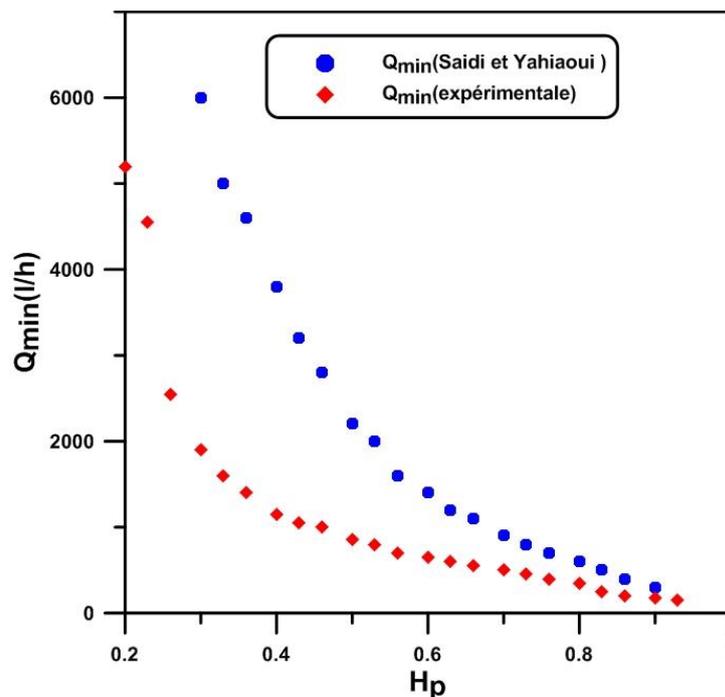


Figure IV.9: Comparaison entre le débit minimum d'injection expérimentale avec celui de Saidi et Yahiaoui

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

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

IV. 4 Rendement

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

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

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

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

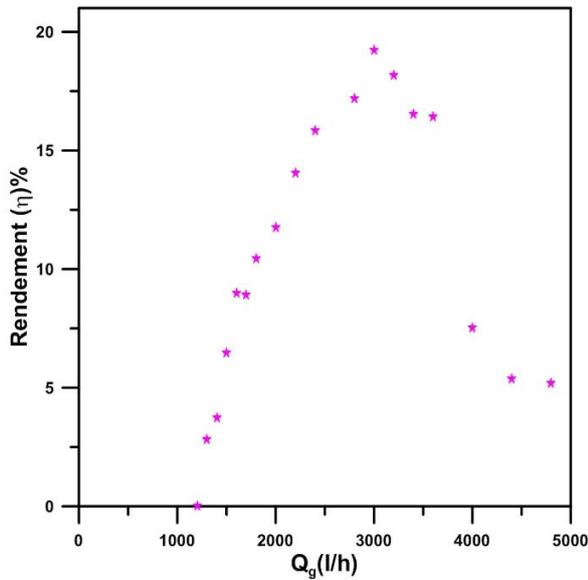


Figure IV.10: Evolution du rendement en fonction du débit d'air pour $H_p = 0,6$

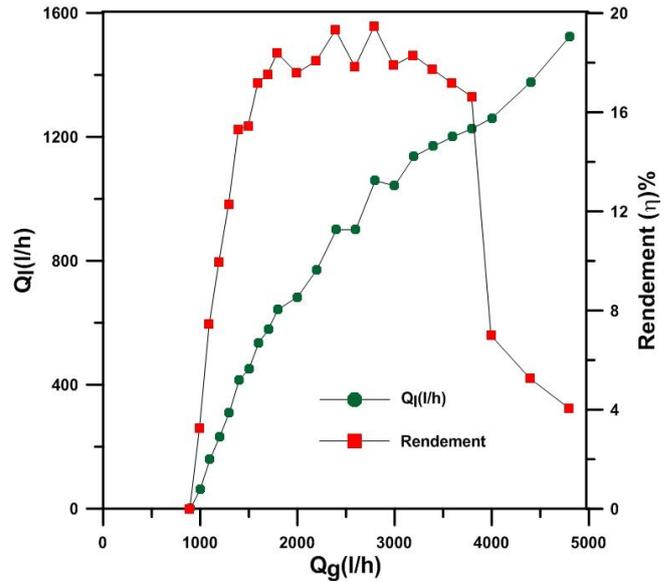


Figure IV.11: Confrontation du rendement et du débit de la phase liquide pour une hauteur de plongée identique.

IV.4.2 Effet de la hauteur de plongée

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

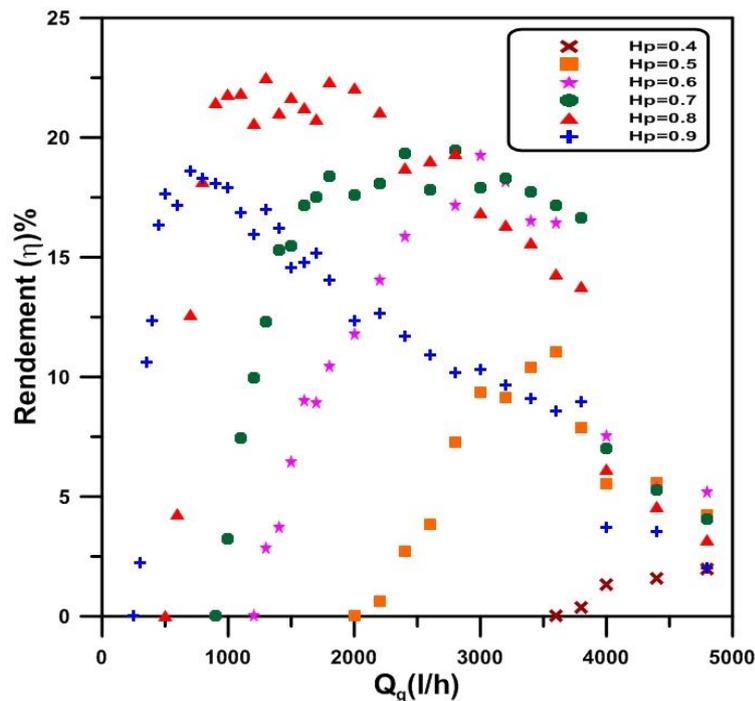


Figure IV.12: Evolution du rendement en fonction du débit d'air pour diverses hauteurs de plongée

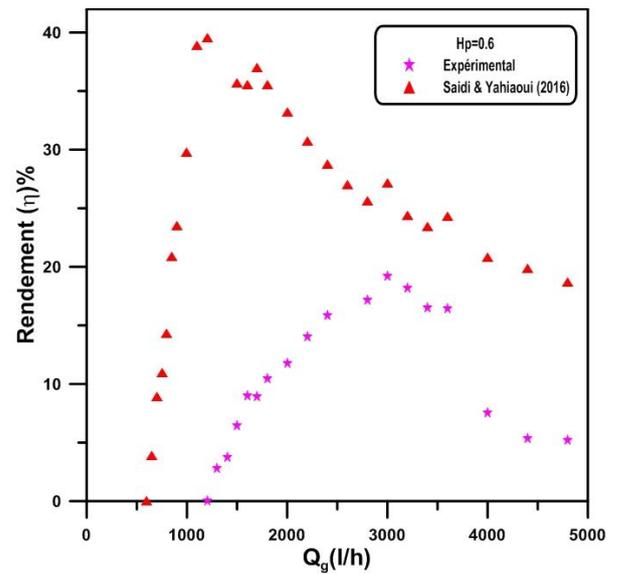
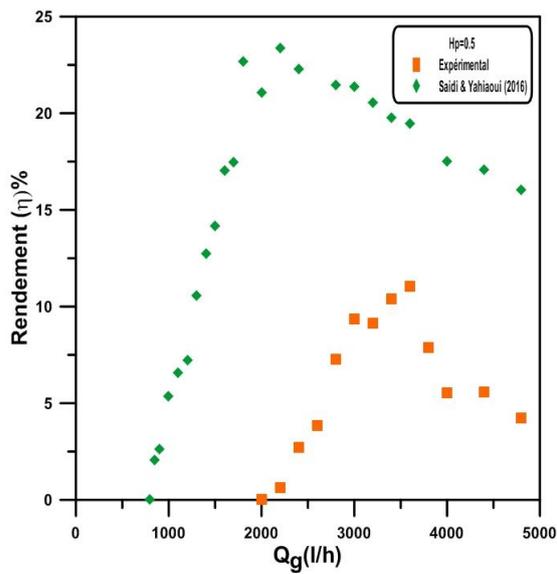
IV.4.3 Comparaison avec un système ordinaire

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

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

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

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



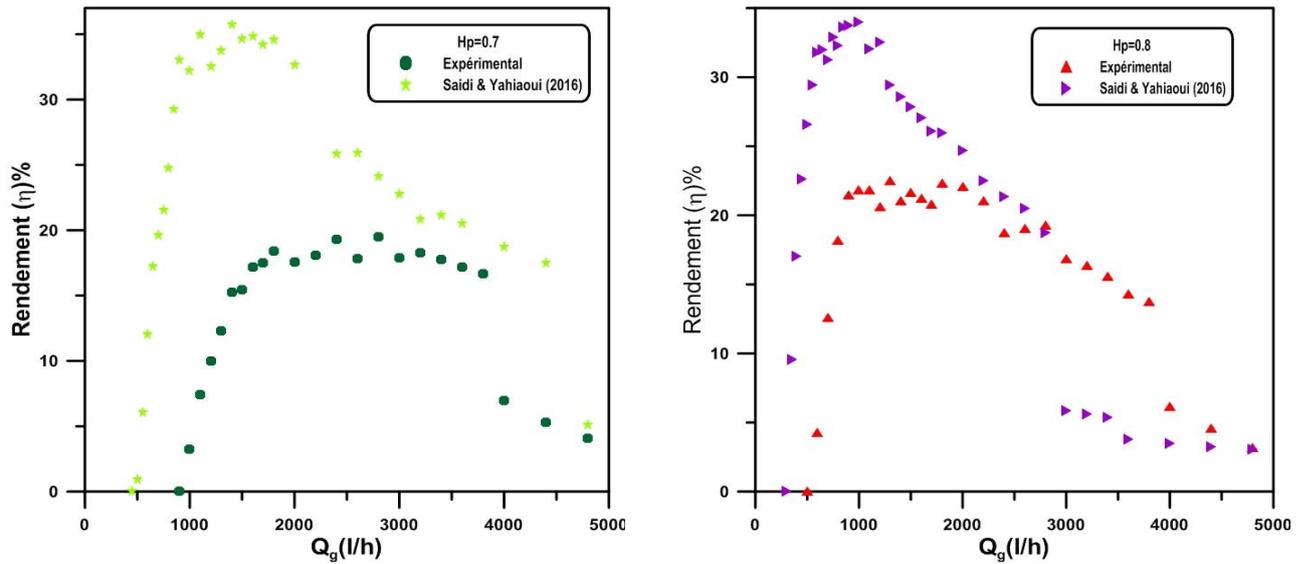


Figure IV.13: Confrontation du rendement de la présente étude avec celui d'un système ordinaire

IV.5 Efficacité

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

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

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

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

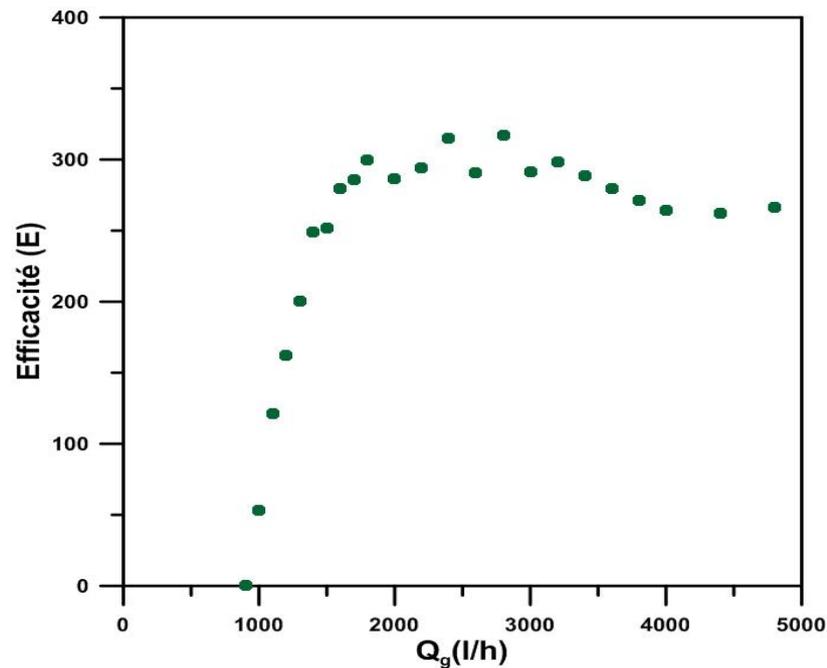


Figure IV.14: Evolution de l'efficacité en fonction du débit d'air pour $H_p = 0,7$

IV.5.2 Effet de la hauteur de plongée

Concernant l'effet de la hauteur de plongée, on a remarqué qu'en termes d'allure l'efficacité évolue de la même manière pour toute les hauteurs de plongées étudiées ($H_p = 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8$ et $0,9$). Une augmentation sensible jusqu'à atteindre un maximum avec un régime à bulles et un régime à poches puis une décroissance avec le régime turbulent. En termes d'ordre de grandeur, ce paramètre augmente avec l'augmentation de la hauteur de plongée. Il est bien visible que les plus grandes valeurs correspondent à la hauteur de plongée $H_p = 0,9$ et les plus faibles à $H_p = 0,4$. Les débits d'air qui correspondent aux maximums sont d'autant plus faibles que la hauteur de plongée augmente.

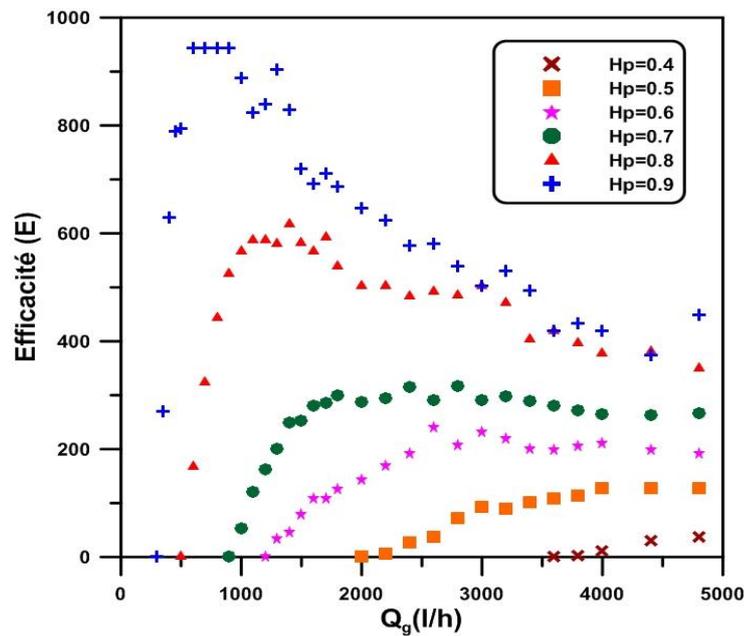


Figure IV.15: Evolution de l'efficacité en fonction du débit d'air
Pour diverses hauteurs de plongée

IV.5.3 Comparaison avec un système ordinaire

La confrontation des résultats obtenus expérimentalement avec ceux obtenus par Saidi et Yahiaoui (2016) correspondant à un système ordinaire de 33 mm de diamètre, donnée sur la figure (IV.16) pour les hauteurs de plongées : 0,5 ; 0,6 ; 0,7 et 0,9, montre que les deux courbes évoluent de même manière mais elle se différencie en termes valeur. A titre d'exemple, pour un même débit d'air (2000 l/h), la valeur de l'efficacité est de 286,39 pour la présente étude contre 525 avec le système ordinaire de Saidi et Yahiaoui (2016). Les explications données pour le rendement peuvent être valables pour le cas de l'efficacité.

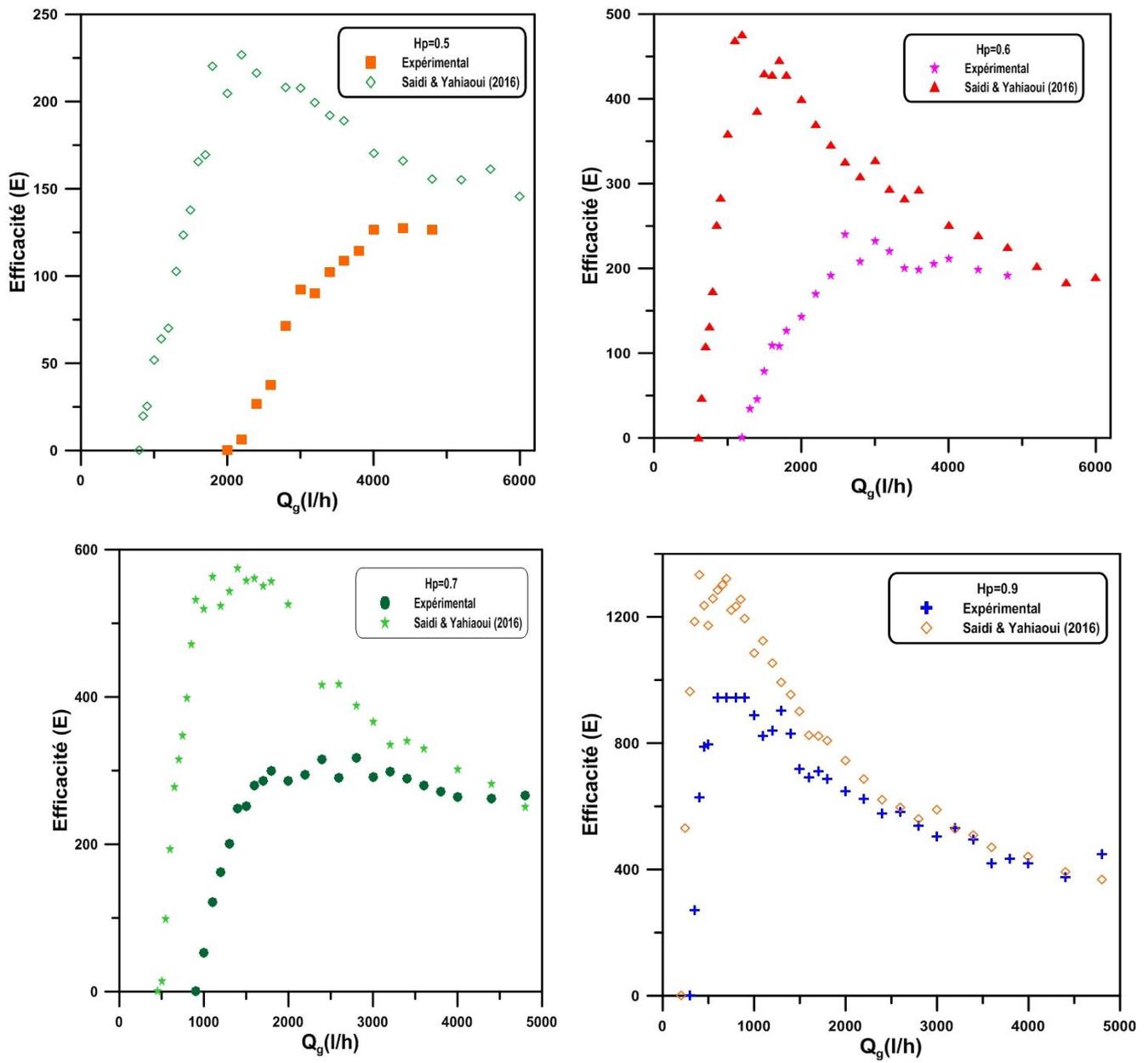


Figure IV.16: Confrontation de l'efficacité de la présente étude avec celui d'un système ordinaire (Saidi et Yahiaoui, 2016)

IV.6 Rapport de glissement (S)

IV.6.1 Analyse pour la présente étude

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 :

$$S = \frac{U_g}{U_l} \tag{IV.3}$$

Sur la figure (IV.17) nous avons représenté l'évolution du rapport de glissement en fonction du débit d'air 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 plongées élucidées. La décroissance se poursuit jusqu'à atteindre un minimum. Une fois le minimum est atteint, le rapport a tendance à augmenter légèrement. Visuellement la 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 des faibles débits d'air. Pour les grands débits, 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. Ceci laisse confirmer l'utilité du rapport de glissement pour une éventuelle utilisation d'un critère de performance.

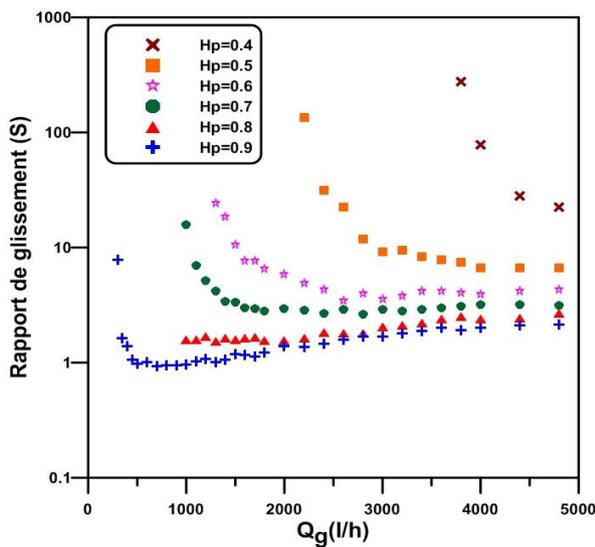


Figure IV.17: Evolution du rapport de glissement (S) en fonction du débit d'air

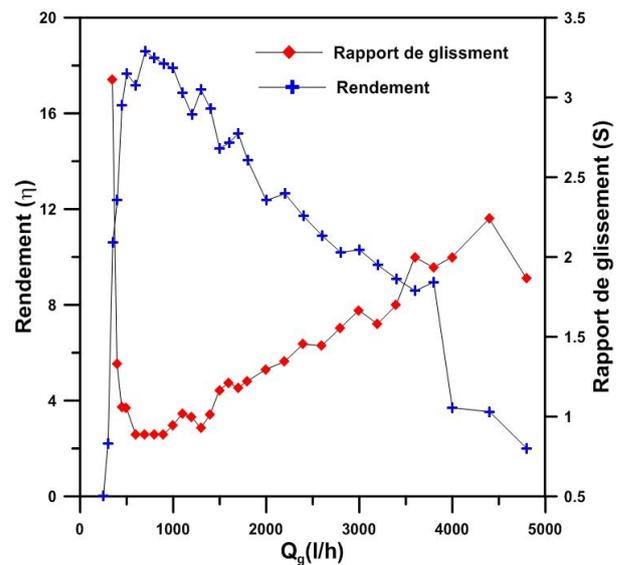
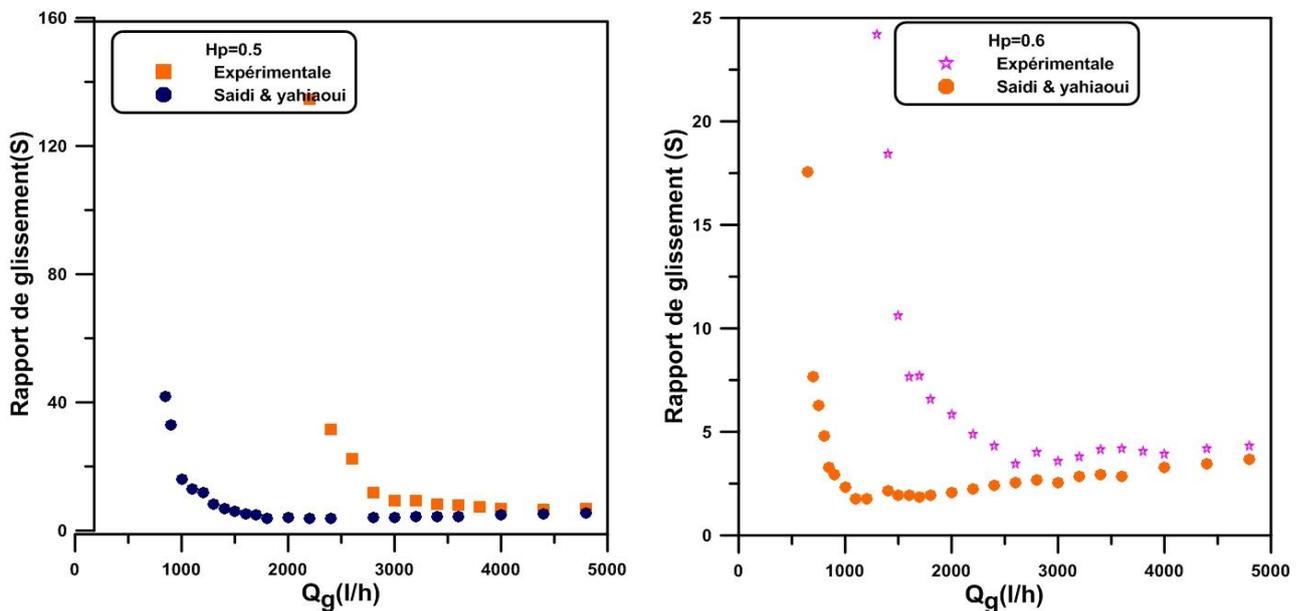


Figure IV.18: Confrontation du rendement et du rapport de glissement pour une hauteur de plongée identique

IV.6.2 Comparaison avec un système ordinaire

La confrontation avec les travaux de Saidi et Yahiaoui (2016) les résultats correspondant à un système ordinaire est représentée sur la figure (IV.19). La représentation montre que le rapport de glissement garde la même allure d'évolution comme celle présentée ci-dessus relatives aux hauteurs de plongée (0,5 ; 0,6 ; 0,7 et 0,8), Concernant la gamme de débits d'air associée aux régimes à bulles et au régime à poches, la figure montre que le glissement entre phases est beaucoup plus important dans le cas du dispositif à élargissement brusque que dans celui de la colonne à diamètre constant. Il est clair que minimum du rapport de glissement est directement lié à la zone optimale du fonctionnement. Pour une hauteur de plongée identique, le minimum le plus faible correspond au système ordinaire et il est atteint à des débits d'air relativement faibles. Comme ce minimum correspond au fonctionnement optimal du système et dans ce cas, il montre clairement que le système ordinaire auquel nous avons fait la comparaison est plus performant. Pour des débits d'air relativement importants le rapprochement entre les deux courbes de chaque hauteur de plongée montre que le glissement entre phase est assez faible dans cette gamme.



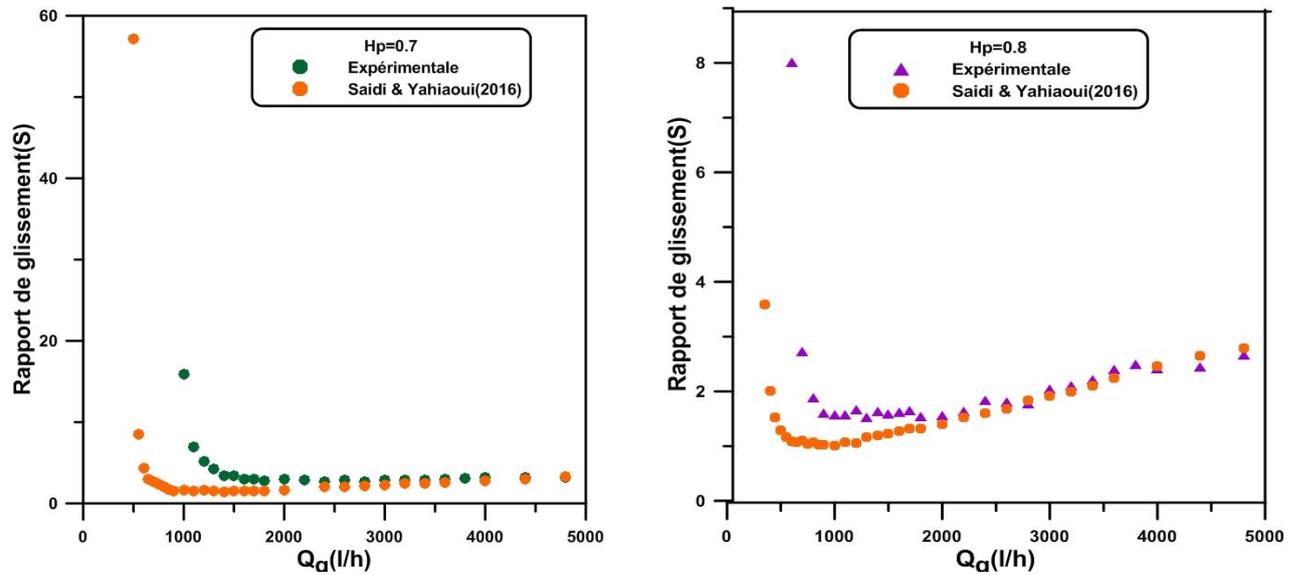


Figure IV.19: Comparaison du rapport de glissement de la présente étude avec celui d'un système ordinaire

IV.7 Taux de vide global (ϵ)

IV.7.1 Analyse du taux de vide global

Nous rappelons dans cette section que le taux de vide global a été mesuré par la technique de vannes à fermeture rapide dans la partie inférieure du dispositif (en aval de la vanne (16)). L'ensemble des mesures ont été effectuées pour cinq hauteurs de plongée ($H_p = 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8$ et $0,9$). Nous soulignons également que la mesure du taux de vide n'a pas été mesurée pour les hauteurs de plongée inférieures à 0,5 et cela pour des raisons techniques. A première vue, l'effet de la hauteur de plongée est bien visible. Plus la hauteur de plongée augmente plus le taux de vide diminue. Les courbes prises individuellement, pour chaque hauteur de plongée, le taux de vide évolue suivant deux étapes différentes : il augmente avec l'augmentation du débit d'air d'une façon quasi linéaire ensuite il continue à augmenter légèrement tout en fluctuant.

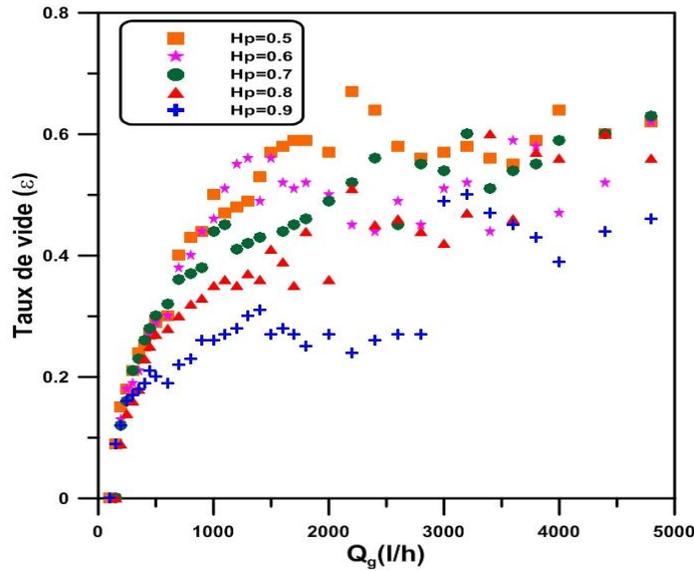
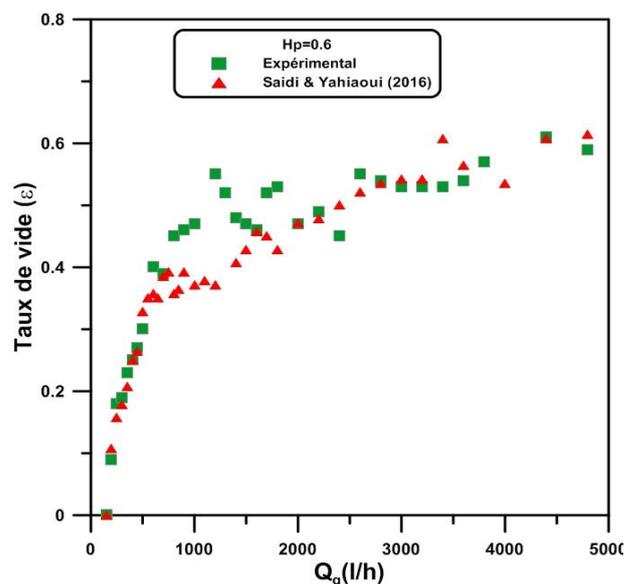
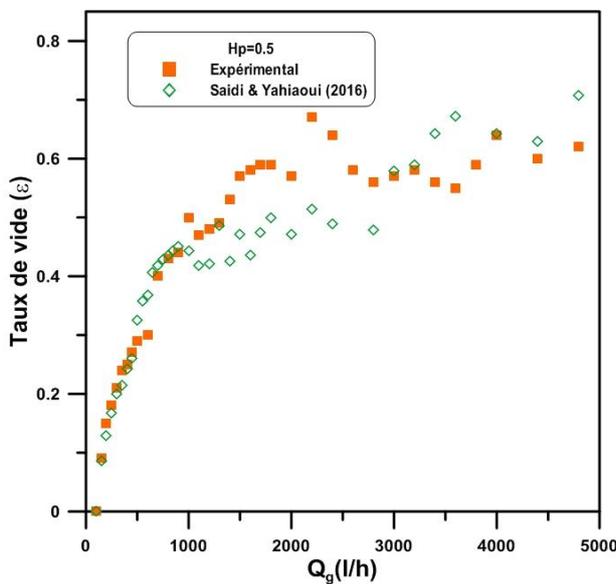


Figure IV.20: Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air.

IV.7.2 Comparaison avec un système ordinaire

La comparaison du taux de vide global de la présente étude avec celui de Saidi et Yahiaoui (2016) donné sur la figure (IV.21) montre que la déformation géométrique réalisée au milieu de la colonne ne produit aucun effet sur son évolution.



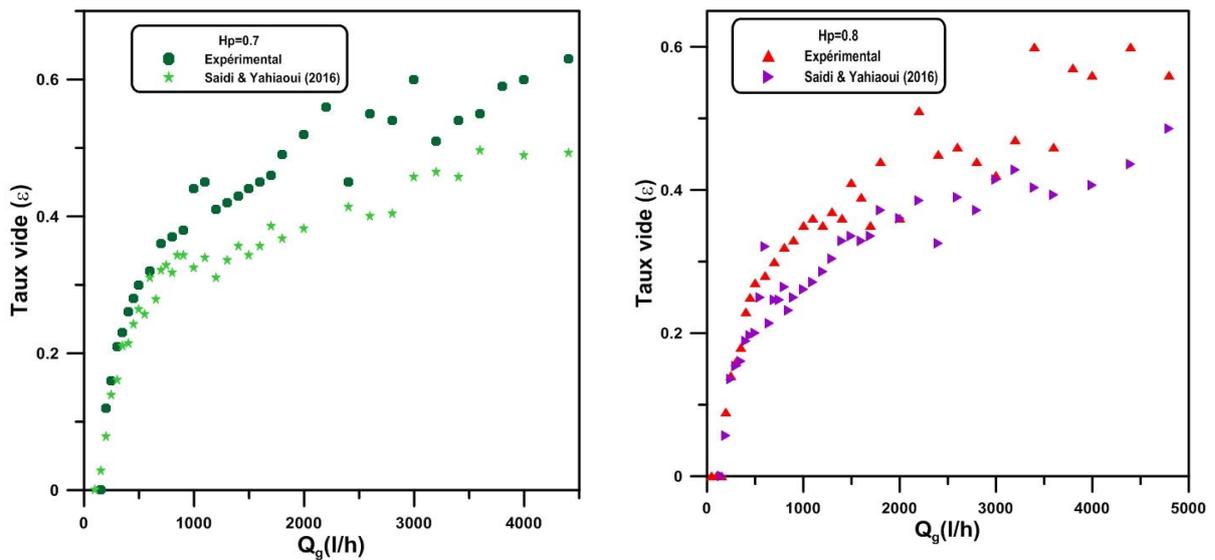


Figure IV.21: Confrontation du taux de vide de la présente étude avec celui d'un système ordinaire

IV.8 Confrontation avec le modèle à écart de vitesses

Le modèle à écart de vitesses (*drift flux model*) est donné par l'équation suivante (voir chapitre II) :

$$\frac{U_g}{\varepsilon} = 1,2(U_g + U_l) + 0,35\sqrt{gD} \quad \text{Avec les coefficients de Nicklin (1963) sont :}$$

$C_0 = 1,2$: Le coefficient de distribution et $0,35\sqrt{gD}$: la vitesse d'entraînement.

Sur la figure (IV.22), nous avons présenté pour la partie amont de la colonne la confrontation du taux de vide expérimental avec le modèle à écart de vitesses (*drift flux model*) avec la version Nicklin (1963). Cette figure montre que les points expérimentaux s'écartent de la droite de Nicklin (1963) dans les gammes de la vitesse de la phase gazeuse correspond au régime à bulles et au régime turbulent baratté. Le rapprochement est plus significatif dans la gamme qui correspond au régime à poches. Ceci concorde fort bien avec les hypothèses de Nicklin (1963) qui suppose l'établissement du régime à poches pour l'élaboration de son modèle. Néanmoins, dans le cas de la partie aval de la colonne, la figure (VI.23) traduit un écart relativement significatif par rapport à la droite de Nicklin (1963). Nous pensons que cet écart est lié au changement de diamètre.

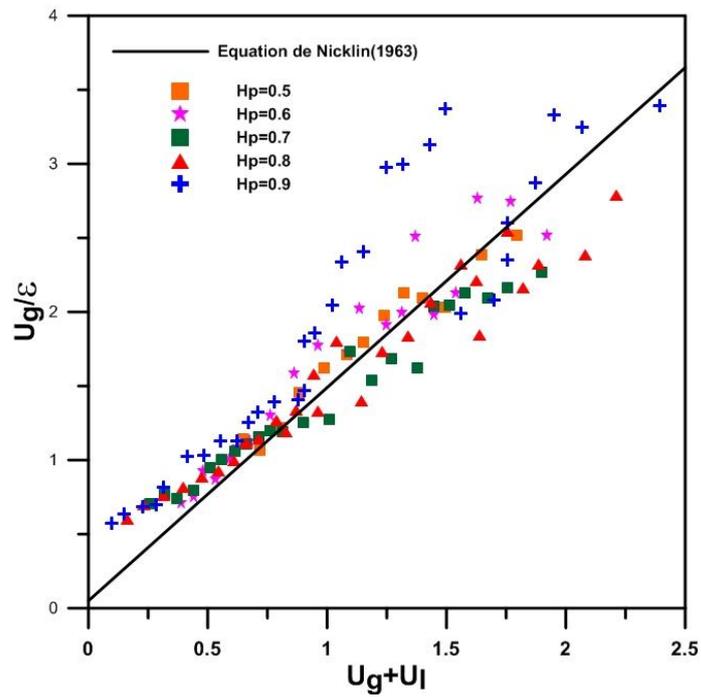


Figure IV.22: Confrontation des résultats expérimentaux avec le modèle à écart de vitesse (partie en amont)

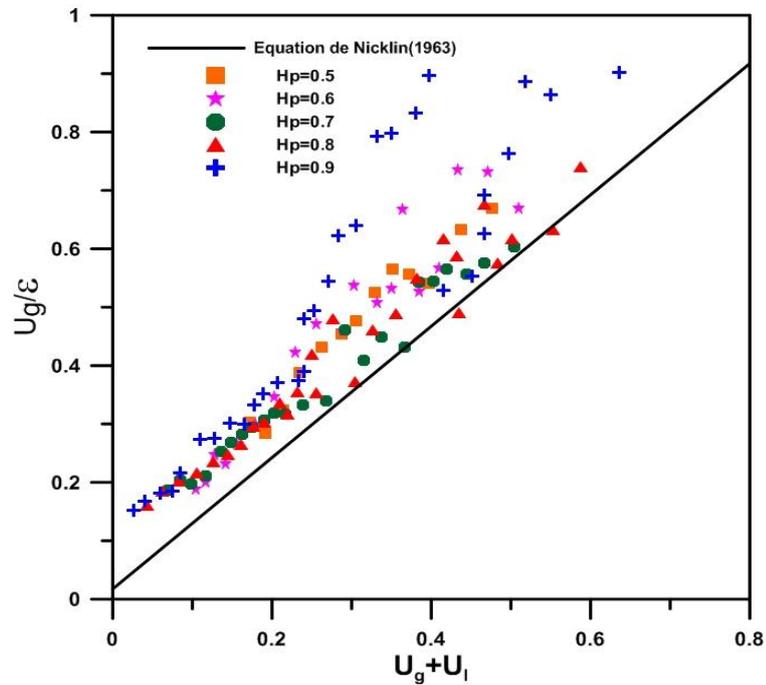


Figure IV.23: Confrontation des résultats expérimentaux avec le modèle à écart de vitesse (partie en aval).

Conclusion

Dans le cadre de ce travail nous avons contribué à l'étude expérimentale des performances d'un système de pompage de type airlift triphasique. Comme phase liquide nous avons utilisée l'eau du robinet, deux solutions de la CMC de concentration 6 et 10g/l. Comme phase solide, des particules en verre, de forme sphérique, de diamètre 4 et 8 mm. Au cours de nos expériences, nous avons procédé la mesure du débit de la phase liquide, le débit de la phase solide, les débits minimums d'injection nécessaire pour amorcer le pompage et enfin nous avons calculé l'efficacité du système.

A l'issue de cette étude, les principales conclusions qu'on peut tirer sont les suivantes :

- La structure de l'écoulement n'a pas été affectée par la présence des particules. Les régimes d'écoulement observés en écoulement diphasique sont identiques à ceux du triphasique.
- Le pompage de la phase solide se produit toujours avant celui de la phase liquide avec un décalage qui dépend de la hauteur de plongée, de la taille des particules et de la nature de la phase liquide.
- Le débit de la phase solide augmente avec l'augmentation du débit d'air.
- Le débit de la phase solide augmente avec l'augmentation de la hauteur de plongée.
- Le transport des particules semble être favorisé en régime turbulent.
- Le débit du pompage solide dépend également de celui de la phase liquide.
- Le débit de la phase solide diminue avec l'augmentation de la taille des particules.
- La nature rhéologique influe sur le débit de pompage des phases liquide et solide. Les débits relatifs à la phase liquide eau sont les plus importants et les débits les plus faibles sont obtenus avec la solution CMC (10g/l).
- Le débit minimum d'injection d'air nécessaire pour amorcer le pompage du solide décroît en fonction de la hauteur de plongée en suivant une allure décroissante pouvant être divisée en deux gammes caractéristiques. Pour $H_p < 0,5$ l'évolution tend à être exponentielle et pour $H_p > 0,5$ l'allure tend vers un aspect linéaire avec rapprochement des valeurs.
- Les grosses particules se caractérisent par un débit minimum important. La comparaison entre les particules D4 et D8 a montré un écart assez marquant pour la gamme $H_p < 0,5$. Cet écart se rétrécit progressivement dans la gamme $H_p > 0,5$. Dans le cadre de ces expériences, l'effet de la taille des particules sur l'amorçage du pompage devient assez faible pour les grandes hauteurs de plongées.

- La confrontation du débit minimum nécessaire pour amorcer le pompage solide et le débit minimum pour amorcer le pompage de la phase liquide se traduit par un écart important dans la gamme $H_p < 0,5$ et par un rapprochement progressif dans la seconde gamme caractéristique ($H_p > 0,5$).
- La variation du débits minimums Q_{gs-min} en fonction du Q_{gl-min} est une fonction linéaire se caractérisant par deux paliers séparés par un changement de pente qui se produit à $H_p = ,05$.
- La nature de la phase liquide ne semble produire aucun effet sur le débit minimum nécessaire pour amorcer le pompage du solide.
- L'efficacité de la fonction du pompage solide dépend du débit d'air, de la hauteur de plongée et de la nature de la phase liquide. Elle augmente avec le débit d'air et la hauteur de plongée diminue avec l'épaississement de la phase liquide.
- Le maximum de l'efficacité relative au pompage solide ne se produit pas au même débit d'air qui correspond au maximum de l'efficacité relative au pompage de la phase liquide.

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.
- Alasadi, A. A. M. H, Habeeb, A. K., 2016. *Analytical and Experimental Investigation for the Effect of Air Injection Angle on the Performance of Airlift Pump*. J.of Engineering 22, 118-137.
- 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.
- Aoudia, N., Tafoukt, K., 2017. *Propriétés rhéologiques de la glycérine et de la carboxyméthylcellulose (CMC)*. Mémoire de master. Université A. Mira de Béjaia.
- Arthur, F. G., Andrea, E. N., Cristiane, C., Fausto Arinos, A. B., Rigoberto, E. M. M., 2012. *Slug to churn transition analysis in upward vertical two-phase flow*. 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, November 18-22, Rio de Janeiro,(Brazil).
- Azzopardi, B.J., Wren, E., 2004. *What is entrainment in vertical two-phase churn flow*. Int. J. Multiphase Flow 30, 89-103.
- Barrut, B., 2011. *Étude et optimisation du fonctionnement d'une colonne airlift à dépression-Application à l'aquaculture*. Thèse de doctorat. Université Montpellier II.
- Barnea, D., Brauner, N., 1986. *Slug/churn transition in upward gas-liquid flow*. Chemical Engineering Science Vol. 4,. No. I, pp 159463.
- Belhadj, O., Oumara, R., 2017. *Etude expérimentale des performances d'un système de pompage de type airlift non-ordinaire*. Mémoire de master. Université A. Mira de Béjaia.
- Bennajah.M., 2007. *Traitement des rejets industriels liquide par électroagulation/électrolocation en récteur airlift*. Thèse de doctorat en Génie des procédés et de l'environnement. Institut national polytechnique de Toulouse(France).
- 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.
- Bhagwat, S. M., Ghajar, A. J., 2014. *A flow pattern independent drift flux model based void fraction correlation for a wide range of gas–liquid two phase flow*. Int. J. Multiph. Flow 59, 186–205.
- 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., 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.

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.

Fraser, R.D, Hill, G.A., 1993. *Hydrodynamic Characteristics of a Spinning Sparger, External Loop Airlift Bioreactor*. *J. of Chemical Engineering* 71, 419-425.

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.

Guet, S., Ooms G., Oliemans R.V.A., Mudde R.F., 2004. *Bubble size effect on low liquid input drift-flux parameters*. *Chem. Eng. Sci.* 59, 3315–3329.

Hanafizadeh, P., Saidi, M. H., Darbandi, M., Kebriae, A., 2010. *Numerical simulation of two-phase flow in airlift pumps using the physical influence scheme, Progress in Computational Fluid Dynamics*. *International Journal.* 10 , 186- 194 .

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

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

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

Honegger, J.L.,1984. *Activation de puits géothermiques par gaz-lift continu*. Institut mixte de recherches géothermiques (Orléans).

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*. *Chemical Engineering Science* 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
- Kassab, S.Z., Kandil, H.A., Warda, H.A., Ahmed, W.H., 2001. *Performance of an airlift pump operating in two-phase flow*. The Seventh International Congress on Fluid Dynamics & Propulsion,Cairo(Egypt).
- 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.
- 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 upriser pipe: An experimental study*. J. Inst. Eng. 84, 114–119.
- 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.
- Merchuk J.C., Gluz M., 1999. Airlift reactors. In: Flickinger MC, Drew SW, editors. Encyclopedia of Bioprocess Technology. New York: John Wiley & Sons; 320–53.

- Monmarson, B., 2015. *Simulation en présence d'incertitude d'un gzosiphon de grande échelle. Application à l'optimisation d'un nouveau système géothermique urbain*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes.
- Nakoryakov, V. E., Kashinsky, O. N., Kozmenko, B. K., 1986. *Experimental study of gas-liquid slug flow in a small diameter vertical pipe*. Int. J. Multiph. Flow 12, 337-355.
- Nicklin, D. J., 1963. *The air-lift pump theory and optimization*. Int. Chem. Eng. 4, 29-39.
- Parker, G. J., 1980. *The effect of footpiece design on the performance of a small air lift pump*. Inter. J. Heat Fluid Flow 2, 245-252.
- Pochet, S., 2012. *Développement d'un système pour la mesure du taux de vide dans un écoulement diphasique par une méthode utilisant des micro-ondes. Mémoire de maîtrise en Sciences Appliquées*. Université de Montréal (Canada).
- Purchas, A. W. 1917. *Some notes on air-lift pumping*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1917 93: 613.
- Reinemann D.J., 1987. *A theoretical and experimental study of airlift pumping and aeration with reference to aquacultural applications*. Thesis. Cornell University.
- Riglin, J., 2011. *Performance characteristics of airlift pumps with vortex induced by tangential fluid injection*. Thesis. Bucknell University.
- 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.
- 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.
- Utiger, M., 1998. *Étude de l'hydrodynamique locale d'un réacteur airlift à boucle externe par Anémométrie à film chaud*. Thèse de Maîtrise en sciences appliquée. Ecole Polytechnique De Montréal (Canada).

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.

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.

Wuillez, J., 2014. *Systèmes diphasiques: élément fondamentaux et applications industrielle*. Edition Lavoisier (France).

Xu, Y., Fang, X., 2014. *Correlations of void fraction for two-phase refrigerant flow in pipes*. Applied Thermal Engineering 64, 242-251

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.

Résumé

Ce travail est consacré à l'étude expérimentale des performances d'un système de pompage de type airlift triphasique. Le dispositif expérimental utilisé est composé d'une colonne verticale de 3 m de longueur et de 33 mm de diamètre intérieur. Comme phase solide, nous avons utilisé des particules sphériques en verre de diamètres 4 et 8 mm. Comme phase liquide nous avons utilisé de l'eau du robinet et deux solutions de la CMC de concentrations 6 et 10 g/l. Nous avons procédé à l'analyse de l'écoulement du comportement des particules, à la mesure du débit de la phase solide en fonction du débit d'air et à la mesure du débit minimum d'injection du gaz en fonction de la hauteur de plongée. En mesurant ces paramètres nous avons étudié l'effet de la taille des particules et de la nature de la phase liquide. Les résultats ont montré que le débit du solide se produit avant celui du liquide, augmente avec le débit du gaz, diminue avec le diamètre des particules et la viscosité de la phase liquide. Le débit minimum d'injection relatif au solide en fonction de la hauteur de plongée est une fonction décroissante. Le calcul de l'efficacité suit le même aspect d'évolution du débit de la phase solide

Mots –clé : *Airlift, Pompage, triphasique, CMC, débit minimum d'injection, performances.*

Abstract

This work is devoted to the experimental study of the performance of an airlift pump gas-liquid-solid. The experimental device used consists of a vertical column of 3 m length and 33 mm inner diameter. As solid phase, we used spherical particles of diameter 4 and 8 mm. As liquid phase we used water and two solutions of CMC (6 and 10 g / l). We proceeded to the analysis of the triphasic flow and the behavior of the particles, the solid flow rate as a function of the air flow rate and to the measurement of the minimum value of air flow rate needed to induce the circulation of solid. By measuring these parameters we studied the effect of particle size and the nature of the liquid phase. The results showed that the flow of the solid occurs before that of the liquid, increases with air flow rate, decreases with the diameter of the particles and the viscosity of the liquid phase. The minimum injection rate relative to the solid as a function of submergence ration is a decreasing function. The calculation of the efficiency follows the same aspect of evolution of the flow of the solid phase.

Keywords: *Airlift pump, triphasic, gas-liquide-solide, CMC, efficiency*