

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie des Procédés



## Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de

### MASTER

En Génie des Procédés

**Option : Génie Chimique**

Présenté par :

M<sup>lle</sup> AIT BAZIZ Narimene

M<sup>lle</sup> BARAT Nouria

**Thème :**

**Conception, réalisation et caractérisation hydrodynamique  
d'un réacteur airlift à boucle externe**

**Soutenu le: 04 juillet 2017**

**devant le jury composé de :**

M <sup>me</sup> HAMAIDI N.	MCB (U. A. M. Béjaïa)	Présidente
M <sup>me</sup> KECHROUD N.	MCB (U. A. M. Béjaïa)	Examinatrice
M <sup>r</sup> TIGHZERT H.	MCB (U. A. M. Béjaïa)	Promoteur

**Juin 2017**



# *Dédicace*

*À mes parents les plus chers, dont leur rêve était toujours de me voir réussir,  
pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leur encouragement  
tout au long de mes études.*

*À mes chers grands parents AIT BAZIZ Mohand lakhel, AIT BAZIZ Zouina, BRAHNA  
Mohand Ouyahya, OUFFAI Houria.*

*À mes chers frères Hassan, Massinissa e pour leur soutien et leurs encouragements.*

*À mon cher petit frère Aksil.*

*À ma chère petite sœur Sara.*

*À mes chers oncles, tantes, cousins et cousines.*

*À toute la famille AIT BAZIZ.*

*Narimene*



# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à la mémoire de ma grand-mère dieu ait son âme*

*A mes très chers parents qui ont sacrifié leurs temps et force pour assurer ma réussite  
et mon épanouissement dans mes études*

*A mes frères et sœurs : Boualam ; Atika ; Abderezak ; Zakia ; Salem et Abdelhak.*

*A mes neveux et mes nièces belles-sœurs et beaux-frères.*

*A toute la famille BARAT.*

*A mon binôme Narimene et à toute sa famille.*

*A mes très chères amies qui sans elles je ne saurais pouvoir en arriver là.*

*A toute la promotion Génie Chimique 2017.*

*Nouria*

# *Remerciements*

*Nous tenons à remercier en premier lieu le bon Dieu tout Puissant qui nous a guidées dans le bon chemin de la science et de la connaissance, et qui nous a donné la volonté, le courage, et la patience pour accomplir ce travail de fond.*

*Nous tenons à remercier profondément notre promoteur Mr Tighzert. H pour l'encadrement tant moral que scientifique le long de cette étude.*

*Nous remercions aussi les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.*

*Nous remercions également à l'équipe du Hall de technologie de l'université A. Mira de Bejaia pour leur aide précieuse lors de la réalisation de l'installation expérimentale.*

*Nous remercions nos enseignants qui ont participé à notre formation du primaire jusqu'à l'université.*

*Nos remerciements vont également à tous ceux qui nous ont aidées de près ou de loin, que ce soit par leurs conseils, soutien, et compréhension en particulier M<sup>lle</sup> BENACHOUR Louiza.*

*Sans oublier nos amis et nos collègues.*

*Merci à vous tous*

## SOMMAIRE

<i>Remerciements</i> .....	<i>I</i>
<i>Liste des figures</i> .....	<i>VI</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>IX</i>
<i>Nomenclature</i> .....	<i>X</i>
<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I</b>	
<b>Etude bibliographique sur les réacteurs airlift</b>	
I.1 Qu'appelle-t-on un réacteur airlift ?.....	3
I.2 Types des réacteurs .....	3
• Réacteur à boucle externe.....	3
• Réacteur à boucle interne.....	3
I.3 Principe de fonctionnement d'un réacteur airlift .....	4
I.4 Régimes d'écoulement.....	4
I.4.1 Régimes à bulles (Bubble flow).....	5
I.4.2 Régime à chapeaux de Taylor .....	5
I.4.3 Régime à poches (Slug flow) .....	5
I.4.4 Régime turbulent baratté (Churn flow) .....	5
I.4.5 Régime annulaire (Annular flow) .....	5
I.4.6 Autre désignation .....	6
I.5 Cartes d'écoulement.....	8
I.6 Paramètres influençant le fonctionnement d'un réacteur airlift.....	9
I.7 Domaines d'application des réacteurs airlifts .....	10
I.8 Avantages des réacteurs airlift .....	11
I.9 Taux de vide dans les réacteurs airlifts .....	12
I.9.1 Taux de vide global .....	12

I. 9.2 Taux de vide surfacique .....	12
I.9.3 Taux de vide volumétrique.....	12
I.9.4 Techniques de mesure du taux de vide.....	13
a) Technique d'expansion de volume.....	13
b) Technique de vanne à fermeture rapide.....	13
c) Méthode manométrique.....	13
d) Technique acoustique.....	14
e) Technique radiative.....	14
f) Technique de sonde électrique.....	14
g) Technique d'anémomètre à fil chaud.....	14
I.10 Vitesse de la phase liquide .....	15
I.10.1 Technique par mesure du débit .....	15
I.10.2 Méthode conductimétrique.....	15
I.10.3 Méthode de vélocimétrie laser.....	16
I.10.4 Modèle de Chisti et al., (1988) .....	16
I.11 Effet du disperseur .....	17
I.12 Nature du mélange dans le réacteur .....	18
I.13. Masse volumique du mélange.....	19
I.14 Gradient de pression .....	19

## **Chapitre II**

### **Conception et réalisation du réacteur**

II.1 Eléments constituant le réacteur .....	22
a. Section de base.....	22
b. Disperseur.....	24
c. Colonne (riser).....	25
d. Downcomer (tube descendant) .....	25
e. Séparateur de phases.....	25
f. Jonction riser-downcomer.....	26
g. Tuyau de vidange.....	26

h. Prise de pressions.....	27
i. Régulateur de pression.....	27
II.2 Montage et assemblage des pièces du réacteur .....	27
II.2.1 Matériaux et produit utilisés .....	27
II.2.2 Etapes de réalisation du réacteur.....	29
II.3 Accessoires et instruments de mesure .....	35
1) Compresseur à air.....	35
2) Manomètre .....	35
3) Règle graduée.....	35
4) Débitmètres.....	36
5) Vanne à air.....	37
6) Seringue .....	37
II.4 Mise en fonctionnement du réacteur.....	37

## **Chapitre III**

### **Caractérisation hydrodynamique du réacteur**

III. Caractérisation hydrodynamique du réacteur.....	38
III.1 Caractéristiques des fluides utilisés.....	38
a) la carboxyméthylcellulos (CMC).....	38
b) Glycérine.....	38
III.2 Caractérisation des régimes d'écoulement.....	39
III.2.1 Phase liquide eau .....	39
a) Réacteur à volume plein.....	39
b) Réacteur partiellement rempli.....	42
III.2.2 Phase liquide CMC (20 g/l).....	42
III.2.3 La phase liquide CMC (10 g/l).....	46
III.2.4 Phase liquide CMC (5 g/l) :.....	47
III.2.1 Phase liquide glycérine (80 %).....	48
III.3 Mesure de la vitesse de la phase liquide .....	48

<b>a.</b> Méthode conductimétrique.....	49
<b>b.</b> Méthode de colorant.....	50
III.4 Mesure du taux de vide global .....	53
<b>a.</b> Phase liquide eau.....	53
<b>b.</b> Phase liquide CMC(20g/l).....	54
<b>c.</b> Phase liquide glycérine (80%).....	56
<b>d.</b> Comparaison entre les trois phases liquides.....	57
<b>CONCLUSION</b> .....	60
<b>LISTE DES REFERENCES</b> .....	62



## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Réacteur à boucle externe utilisé par Vial et al., (2000-2005) .....	3
<b>Figure I.2:</b> Schéma de différentes configurations d'un réacteur airlift (Ghourich,2006).....	4
<b>Figure. I.3:</b> Régime d'un écoulement diphasique (Monmarson, 2015).....	6
<b>Figure I.4:</b> Régimes observés par Midoux et Poncin.....	6
<b>Figure I.5 :</b> Régime d'écoulement dans un réacteur airlift (Vial, 2000).....	7
<b>Figure I.6:</b> Caractérisation des régimes dans une colonne à bulles (Vial et al., 2000)....	8
<b>Figure I.7:</b> Exemple de cartes d'écoulement (Chisti 1987) .....	8
<b>Figure I.8:</b> Exemple des pics issus dans la méthode conductimétrique (bennajah, 2007).....	16
<b>Figure I.9:</b> Disperseurs utilisés par Vial et al., (2000).....	18
<b>Figure II.1:</b> Schéma du réacteur airlift à boucle externe à réaliser.....	23
<b>Figure II.2:</b> Schéma de la section de base .....	24
<b>Figure II.3 :</b> Photographie du disperseur .....	24
<b>Figure II.4:</b> Riser (a), Downcomer (b) .....	25
<b>Figure III.5:</b> Séparateur de phase .....	26
<b>Figure II.6 :</b> Photographie des jonctions utilisées .....	26
<b>Figure II.7 :</b> Prise de pression.....	27
<b>Figure II.8:</b> Régulateur de pression .....	27
<b>Figure II.9:</b> Silicone à pistolet .....	29
<b>Figure II.10:</b> Différentes colles utilisées .....	29
<b>Figure II.11:</b> Structure métallique fixée au sol.....	29
<b>Figure II.12 :</b> Plaque en bois fixée sur la structure métallique .....	30
<b>Figure II.13:</b> Montage de la jonction riser-downcomer.....	30
<b>Figure II.14 :</b> Montage du disperseur dans la section de base.....	30
<b>Figure II.15 :</b> Fixation de la section de base sur la structure métallique .....	31

<b>Figure II.16</b> : Sortie pour l'alimentation en air.....	31
<b>Figure II.17</b> : Plaque en bois pour supporter le séparateur de phases .....	31
<b>Figure II.18</b> : Fixation du séparateur de phases.....	31
<b>Figure II.19</b> : Montage de la jonction supérieur .....	32
<b>Figure II.20</b> : Fixation du séparateur de phases sur la structure métallique .....	32
<b>Figure II.21</b> : Montage du riser et du downcomer sur la structure métallique .....	33
<b>Figure II.22</b> : Photographie du réacteur réalisé .....	34
<b>Figure II.23</b> : Compresseur utilisé .....	35
<b>Figure II.24</b> : (a) : Manomètre, (b) : Règle graduée .....	36
<b>Figure II.25</b> : Débitmètres .....	36
<b>Figure II.26</b> : Vanne à air .....	37
<b>Figure II.27</b> : Seringue utilisée .....	37
<b>Figure III.1</b> : Formule brute de la CMC.....	38
<b>Figure III.2</b> : Formule chimique de la glycérine .....	39
<b>Figure III.3</b> : Régimes d'écoulement observés pour la phase liquide eau à faibles débit d'air.....	40
<b>Figure III.4</b> : Régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide eau à débits d'air moyens .....	41
<b>Figure III.5</b> : Régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide eau à débits d'air élevés .....	41
<b>Figure III.6</b> : Préparation de la solution de CMC 20 g/l .....	42
<b>Figure III.7</b> : Photographies de régime d'écoulement pour la phase liquide CMC 20g/l à faibles et moyens débits d'air.....	43
<b>Figure III.8</b> : Régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide CMC 20g/l de $Q_g=1000$ à $1500$ l/h .....	44
<b>Figure III.9</b> : Régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide CMC 20g/l de $Q_g=1600$ à $2400$ l/h .....	45
<b>Figure III.10</b> : Régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide CMC 20g/l pour des débits d'air élevés .....	45

<b>Figure III.11</b> : Régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide CMC 10g/l à différents débits d'air .....	46
<b>Figure III.12</b> : Configuration obtenue pour la CMC (5 g/l) à différents débits de gaz..	47
<b>Figure III.13</b> : Visualisation des régimes d'écoulement pour la glycérine (80%) .....	48
<b>Figure III.14</b> : Injection du sel (a) ; Sonde (b) ; Conductimètre (c) .....	49
<b>Figure III.15</b> : Injection du colorant (a); Colorants alimentaires utilisés (b) .....	50
<b>Figure III.16</b> : Evolution de la vitesse d'eau en fonction du débit d'air pour $H_1=1m$ ..	51
<b>Figure III.17</b> : Evolution de la vitesse d'eau en fonction du débit d'air pour $H_1=1m$ ..	51
<b>Figure III.18</b> : Evolution de la vitesse d'eau en fonction du débit d'air pour le volume plein .....	52
<b>Figure III.19</b> : Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour l'eau $H_1=0,6m$ .....	54
<b>Figure III.20</b> : Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour l'eau à différentes hauteurs .....	54
<b>Figure III.21</b> : Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour la CMC à 20g/l à différentes hauteurs .....	55
<b>Figure III. 22</b> : Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour la CMC à différentes concentrations .....	56
<b>Figure III.23</b> : Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour la glycérine à différentes hauteurs .....	57
<b>Figure III.24</b> : Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour tous les fluides utilisés à $H=1m$ .....	58
<b>Figure III.25</b> : Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour tous les fluides utilisés à $H=0,6m$ .....	58

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1 :</b> Tableau récapitulatif des matériaux et outils utilisés et leur fonction. ...	28
<b>Tableau II.2 :</b> Tableau récapitulatif des accessoires du réacteur et leur fonction.....	28
<b>Tableau II.3 :</b> Tableau récapitulatif des différents outils lors de la réalisation du réacteur .....	28
<b>Tableau III.1 :</b> Les caractéristiques des phases liquides utilisées .....	39
<b>Tableau III.2 :</b> Tableau récapitulatif des vitesses de chaque fluide pour le même débit... .....	52

## ***NOMENCLATURE***

### **Lettres latines**

$A_d$ : Section du downcomer	( $m^2$ )
$A_g$ : Aire occupée par la phase gazeuse	( $m^2$ )
$A_l$ : Aire occupée par la phase liquide	( $m^2$ )
$A_r$ : Section du riser	( $m^2$ )
$C_0$ : Coefficient de distribution (modèle à écart de vitesses)	(-)
$C_1$ : Constante à écart de vitesses (drift-flux model)	(m/s)
$D$ : Diamètre de la colonne	(m)
$g$ : Accélération de la pesanteur	( $m/s^2$ )
$h_D$ : Hauteur de dispersion gaz-liquide (modèle de Chisti et al., 1988)	(m)
$H_l$ : Hauteur du liquide	(m)
$H_m$ : Hauteur du mélange	(m)
$K_B$ : Coefficient de frottement à l'entrée de la colonne (modèle de Chisti et al. 1988)	(-)
$K_T$ : Coefficient de frottement à la sortie de la colonne (modèle de Chisti et al.1988)	(-)
$Q_g$ : Débit volumétrique occupée par la phase gazeuse	( $m^3/s$ )
$Q_l$ : Débit volumétrique occupée par la phase liquide	( $m^3/s$ )
$U_g$ : Vitesse superficielle de la phase gazeuse	(m/s)
$U_{gl}$ : Vitesse relative du gaz par rapport au mélange diphasique	(m/s)
$U_l$ : Vitesse superficielle de la phase liquide	(m/s)
$U_L$ : Vitesse superficielle de la phase liquide (modèle de Chisti, (1988))	(m/s)
$U_{Ld}$ : Vitesse du liquide dans le downcomer	(m/s)
$U_{Lr}$ : Vitesse du liquide dans le riser	(m/s)
$U_s$ : Vitesse de glissement	(m/s)

$V_g$  : Volume de la phase gazeuse dans la colonne (m<sup>3</sup>)

$V_l$  : Volume de la phase liquide dans la colonne (m<sup>3</sup>)

**Lettres grecques**

$\varepsilon$  : Taux de vide global (-)

$\varepsilon_d$  : Taux de vide dans le downcomer (-)

$\varepsilon_r$  : Taux de vide dans le riser (-)

$\rho_g$  : Masse volumique de la phase gazeuse (Kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_l$  : Masse volumique de la phase liquide (Kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_m$  : Masse volumique du mélange diphasique (Kg/m<sup>3</sup>)

$\tau$  : Contrainte de cisaillement (Pa)

$\Delta H$  : Différence de hauteur entre deux points de la colonne (m)

$\Delta p$  : Gradient de pression le long de la colonne (Pa)

$\Delta p_{ac}$  : Gradient de pression dû à l'accélération (Pa)

$\Delta p_{fr}$  : Gradient de pression dû aux frottements (Pa)

$\Delta p_g$  : Gradient de pression dû à la gravité (Pa)

$\Delta Z$  : Dénivellation manométrique (m)

---

# **Introduction**

---

L'utilisation des réacteurs airlifts, appelés aussi *gazosiphons*, ne cesse de croître ces dernières décennies. D'abord employés comme réacteurs biologiques pour la fermentation, ces applications se sont vite multipliées pour s'étendre à des domaines diversifiés. Maintenant utilisés dans de nombreux bioprocédés (aération, agitation, culture de micro-organismes, réaction biochimiques...etc.), ils servent aussi au traitement des eaux et dans l'industrie chimique pour l'hydrogénation et l'oxydation de produits organiques pour ne citer que ces exemples. Le réacteur airlift permet un bon contact entre les phases, assurant ainsi le transfert de masse, de chaleur et un bon mélange à une faible consommation d'énergie. La double fonction de la phase gazeuse qui est l'aération et l'agitation fait aussi partie de ses avantages. Par rapport au réacteur agité, il est simple de construction et présente l'avantage de ne présenter aucune pièce mobile, ce qui facilite le maintien de l'étanchéité ou de la stérilité, selon les besoins. Bien que les colonnes à bulles soient plus simples de construction, les réacteurs airlifts sont de plus en plus utilisés en raison de leurs structures d'écoulements clairement définies. Les paramètres d'optimisation de la conception d'un réacteur airlift varient selon les applications (maximisation de transfert de masse, du mélange, du transfert de chaleur, minimisation de la consommation énergétique et du cisaillement) mais il ne serait possible d'accéder à des résultats sans disposer d'un dispositif pilote pour mener des études expérimentales.

Dans le présent travail, nous nous fixons comme objectif de concevoir et de réaliser un réacteur airlift à boucle externe à l'échelle du laboratoire capable de servir pour une variété importante de tâches de recherches du domaine des écoulements diphasiques et des applications liées à ce type de réacteur. A l'issue de la réalisation, le réacteur fera l'objet d'une batterie de tests. Il fera également l'objet d'une caractérisation hydrodynamique dans la mesure du possible.

Pour la réalisation de ce travail, nous avons réparti le mémoire comme suit :

Dans le premier chapitre nous abordons les notions générales sur les réacteurs airlifts. Nous donnons quelques définitions, quelques techniques de mesures pour certains paramètres voire quelques travaux de la littérature.



Dans le second chapitre, nous présentons le schéma du réacteur conçu, les éléments utilisés pour le montage ainsi que les accessoires du dispositif avec les étapes de réalisation détaillées.

Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation hydrodynamique du réacteur. Pour ce faire, trois phases liquides différentes sont utilisées à différentes hauteurs. La caractérisation des régimes, la mesure du taux de vide, la mesure de la vitesse de la phase liquide seront parmi les paramètres qui sont les paramètres abordés. Nous clôturons enfin le manuscrit par une conclusion et quelques recommandations.

# **CHAPITRE I**

---

## **Etude bibliographique sur les réacteurs airlifts**

---

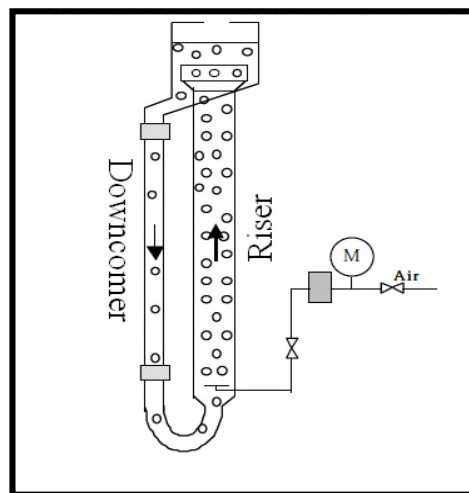
## I.1 Qu'appelle-t-on un réacteur airlift ?

Un réacteur airlift appelé *gazosiphon*, est le résultat de la modification d'une colonne à bulles. Le réacteur airlift, est un réacteur pneumatique qui se divise en deux zones. Dans la première, appelée tube ascendant ou *riser*, à la base de laquelle on injecte du gaz tandis que la seconde, appelée tube descendant ou *downcomer*, séparé physiquement du riser, permet une recirculation du liquide. La nature de la configuration reliant le downcomer et le riser détermine le type du réacteur qui peut être à boucle interne ou à boucle externe.

## I.2 Types des réacteurs

- **Réacteur à boucle externe**

Pour ces réacteurs, le riser et le downcomer sont séparés et connectés par deux sections horizontales(ou inclinées) à la base et au sommet du dispositif. Le liquide monte dans la colonne (riser) où l'on injecte le gaz et descend dans l'autre partie (downcomer). La séparation des deux phases se fait facilement à la sortie dans une zone appelée « séparateur de phases » (Bennajah, 2007 ; Chisti, 1989 ; Chisti, 1993, Vial et al. (2000-2005) (voir figure I.1)

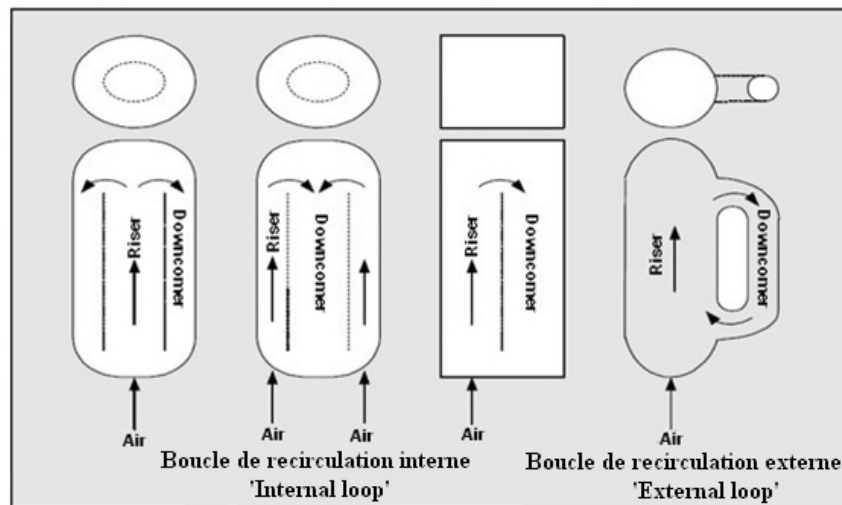


**Figure I.1:** Réacteur à boucle externe utilisé par Vial et al. (2000-2005)

- **Réacteur à boucle interne**

Dans ce type de réacteur, le riser et le downcomer sont dans la même enceinte. Ils sont séparés par une paroi (chicane) cylindrique ou plane. Le gaz est souvent injecté

dans la colonne intérieure. Pour ce type de réacteur diverses configurations peuvent être rencontrées Chisti, 1989 ; Chisti, 1993, Vial et al, (2000-2005) (voir figure I.2).



**Figure I.2:** Schéma de différentes configurations d'un réacteur airlift

(Ghourich, 2006)

### I.3 Principe de fonctionnement d'un réacteur airlift

Le gaz est injecté à la base du riser par un disperser, créant un mélange diphasique (gaz-liquide), la densité de ce dernier est inférieure à celle du liquide présent initialement ce qui cause sa montée (écoulement co-courant ascendant), alors qu'au downcomer le liquide redescend vers le bas du réacteur. L'injection du gaz dans le riser provoque une différence de pression entre les deux zones aérée et non aérée, une force motrice est alors créée, induisant la circulation du liquide dans le réacteur. (Chisti et al. 1988).

### I.4 Régimes d'écoulement

En écoulements diphasiques, la distribution des deux phases liquide et gazeuse est caractérisée par plusieurs types de régimes d'écoulement. Cette distribution dans le cas des réacteurs airlifts, qui sont aussi siège de l'écoulement diphasiques, s'avère d'une grande importance et pour l'optimisation du fonctionnement du réacteur et pour la tâche à laquelle on le destine. Le choix d'un régime dépend de l'application. Les plus fréquents s'enchaînent de la manière suivante : le régime à bulles ; le régime à chapeaux de Taylor ; le régime à poches ; le régime turbulent baraté et le régime annulaire (voir figure I.3 ; figure I.4).

#### **I.4.1 Régimes à bulles (Bubble flow)**

Ce type de régime apparaît à faibles débits d'air où le gaz est sous forme de bulles qui se disperse d'une manière homogène dans la phase liquide continue. Le diamètre des bulles est toujours très inférieur au diamètre de la colonne.

#### **I.4.2 Régime à chapeaux de Taylor**

A partir d'un certain débit d'air, la proximité des bulles augmente de sorte que les phénomènes de coalescence se multiplient. On a ainsi l'apparition des bulles plus grosses qui ne sont plus sphériques, appelées *chapeaux de Taylor*, dont le sommet est arrondi et la base plus émousée (Monmarson, 2015).

#### **I.4.3 Régime à poches (Slug flow)**

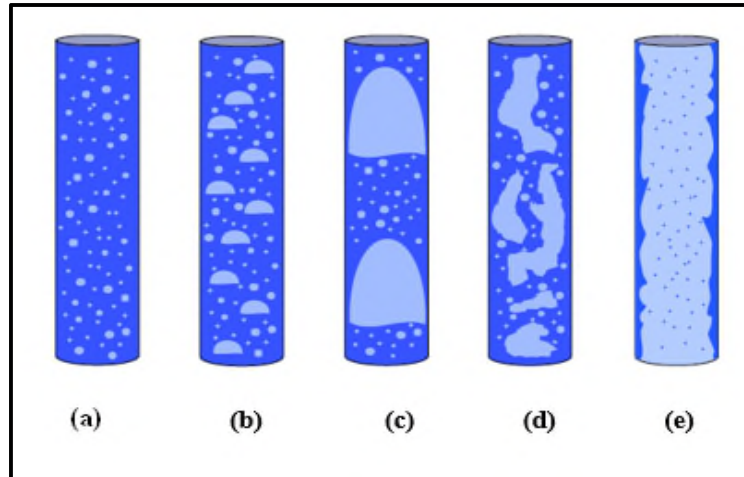
Ce régime s'établit, lorsqu'on augmente le débit d'air ce qui provoque l'augmentation de la coalescence pour former de grosses bulles ayant la forme d'une calotte sphérique en aval et une forme plus ou moins aplatie en amont. Ces bulles sont appelées *poches* leur diamètre atteint presque celui de la colonne. La longueur des poches varie en fonction du débit d'air. Les poches sont séparées par des bouchons liquides qui sont en général parsemés de petites bulles de dimension homogène. Entre les poches et la paroi de la colonne circule vers le bas un film liquide.

#### **I.4.4 Régime turbulent baratté (Churn flow)**

C'est le régime qui vient après le régime à poches en augmentant le débit d'air. Cette augmentation conduit à la déformation des poches d'air pour laisser place à un écoulement aléatoire et complètement désordonné par fois mousseux.

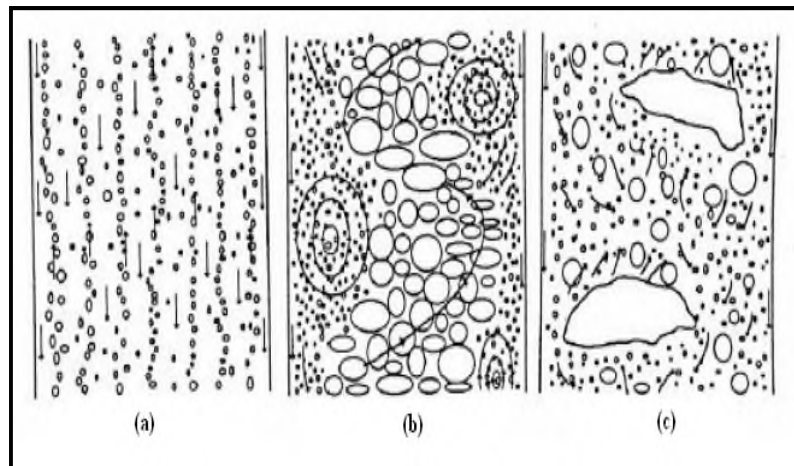
#### **I.4.5 Régime annulaire (Annular flow)**

C'est le régime qu'on peut atteindre après le régime turbulent. Ce dernier est visualisé à des débits d'air élevé où le gaz se déplace au milieu de la colonne et la phase liquide forme un film autour de la paroi du côté intérieur. Ce régime est indésirable dans les systèmes airlifts.



**Figure. I.3:** Régime d'un écoulement diphasique (Monmarson, 2015)

Régime à bulles (a) ; Régime à chapeaux de Taylor (b) ; Régime à poches (c) ; Régime turbulent baratté (d) ; Régime annulaire (e).

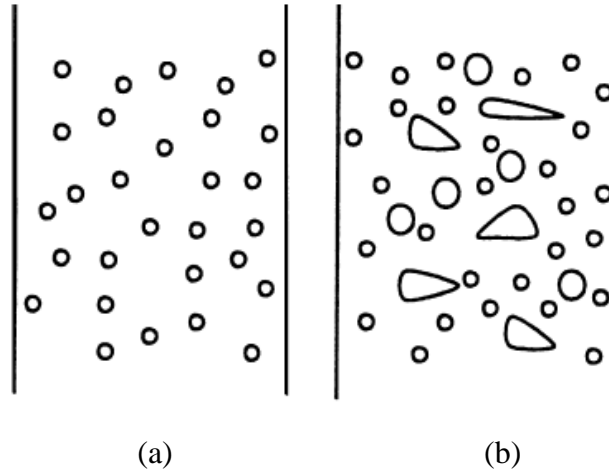


**Figure I.4 :** Régimes observés par Midoux et Poncin.

Régime à bulles dispersé (a) ; Régime hélicoïdal (b) ; Régime turbulent (c).

#### I.4.6 Autres désignations

Par ailleurs, dans la littérature traitant les réacteurs airlifts, pour la caractérisation des régimes, la structure de l'écoulement diphasique est scindée en deux catégories formant deux régimes principaux, à savoir le régime homogène et le régime hétérogène. Le régime homogène n'est autre que le régime à bulles défini précédemment. Le régime hétérogène englobe les autres régimes (voir figure I.5), (Vial et al, 2000)



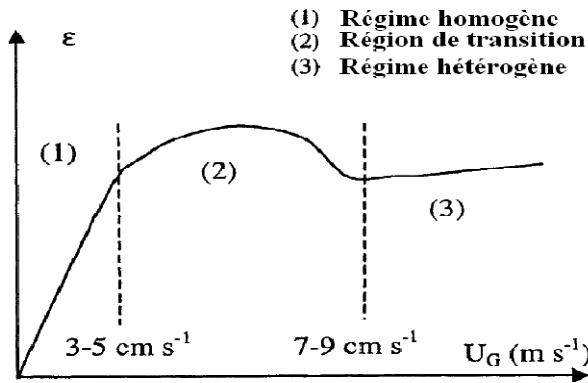
**Figure I.5:** Régime d'écoulement dans un réacteur airlift (Vial, 2000).

Régime homogène (a) ; régime hétérogène (b)

Dans le but d'un raffinement plus net des limites entre régimes, comme alternative aux méthodes classiques, certains auteurs recourent à d'autres techniques, qualifiées de seconde catégorie, basées sur le traitement des signaux relatifs à la structure de l'écoulement, à savoir les fluctuations des pression, le taux de vide local, les fluctuations de températures, le transfert de masse à la paroi, allant jusqu'à l'exploitation des propriétés acoustique et optique des phases. (Vial et al. 2000, 2001), résumant l'ensemble des techniques et paraissent leur exposé par une étude comparative en présentant les outils mathématiques nécessaires pour l'exploitation de ces signaux en l'occurrence : l'analyse spectrale, l'analyse fractale, l'analyse statistique, l'analyse chaotique et les fonctions d'auto-corrélation.

Dans le même contexte de la caractérisation des régimes, Vial et al (2000, 2001) trouvent efficace l'utilisation du modèle à écart de vitesse (*drift-flow model*) pour la caractérisation de ces régimes. Dans le cas d'un réacteur airlift, l'expression de Zuber et Findly (1965) est suggérée ( $\frac{U_g}{\varepsilon} = C_0(U_g + U_l) + C_1$ ). La procédure adoptée par les auteurs consiste à tracer ( $\frac{U_g}{\varepsilon}$ ) en fonction de la vitesse superficielle du mélange diphasique ( $U_g + U_l$ ). Dans une colonne à bulle fermée, ils proposent de présenter la vitesse d'entraînement de Wallis (1969) donnée par ( $U_{gl} = (1-\varepsilon) U_g$ ) en fonction du taux de vide  $\varepsilon$ . Dans les deux cas (colonne à bulles et réacteurs) le changement de pente traduit la transition de régime homogène au régime hétérogène. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que les pentes sont assez faibles pour pouvoir les distinguer.

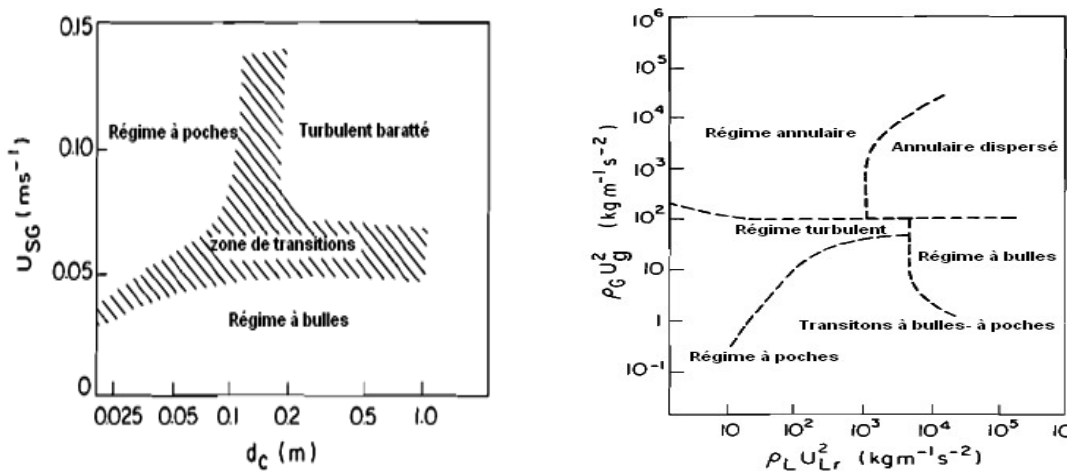
Une autre méthode, qualifiée de classique, consiste à présenter le taux de vide  $\epsilon$  en fonction de la vitesse superficielle de la phase gazeuse. Lorsque la transition se produit, la courbe se caractérise par une coupure bien distincte (figure I.6) ce comportement du taux de vide est fortement observable lors de l'utilisation d'un disperseur efficace (multi-orifice). La zone relative à la transition est indétectable dans le cas du disperseur à orifice unique.



**Figure I.6:** Caractérisation des régimes dans une colonne à bulles (Vial et al. 2000)

### I.5 Cartes d'écoulement

Les cartes d'écoulement est un autre moyen permettant la situation ou l'identification des régimes d'écoulement en fonction de différents paramètres qui sont placés comme ordonnées et abscisses sur les axes des cartes, comme paramètres on trouve : la vitesse (la plus part des temps sur l'axe des abscisses), le taux de vide, les nombres adimensionnels (Reynolds, Froude, Pecklet...etc.), le diamètre de la colonne.



**Figure I.7:** Exemple de cartes d'écoulement (Chisti 1987)



## I.6 Paramètres influençant le fonctionnement d'un réacteur airlift

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

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

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

Selon la géométrie et la configuration du système, la nature du séparateur de phases joue un rôle. En effet, dans les systèmes avec séparateur de phases largement ouvert, le gaz est évacué avant d'atteindre le downcomer, par conséquent dans ce dernier, l'écoulement est purement monophasique, seul le riser est caractérisé par le taux de vide et la circulation du liquide rencontre moins de résistance. Dans certaines configuration du séparateurs de phases, le downcomer se caractérise par un certain taux de vide ( $\varepsilon_d$ ). Dans ce cas, les deux taux de vides sont liés par une relation de proportionnalité (Chisti, 1989; Chisti et al., 1993) :

$$\varepsilon_d = k \cdot \varepsilon_r \quad (\text{I.1})$$

Où  $k \approx 0,9$ .

Dans ce cas le taux de vide global relatif au riser et au downcomer peut être calculé par :

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_r A_r + \varepsilon_d A_d}{A_r + A_d} \quad (\text{I.2})$$

Avec  $\varepsilon_r$ ,  $A_r$  le taux de vide et la section relatifs au riser et  $\varepsilon_d$ ,  $A_d$  le taux de vide et la section relatifs au downcomer,  $k$  est une constante donnée par Chisti (1989).

Dans la littérature on rapporte que les propriétés physiques du liquide telles que la densité, la viscosité, la tension superficielle et la force ionique ont une grande influence sur l'hydrodynamique du système. L'effet du changement des propriétés physiques du milieu dépend en outre de la géométrie du réacteur et des pertes de charges qui en résultent. Certains auteurs affirment que lorsque la viscosité du liquide ou la tension superficielle augmentent, le diamètre des bulles augmente, et leur vitesse ascensionnelle aussi, et par conséquent, le taux de vide diminue.

Snape et al. (1992), ont montré que l'influence de la tension superficielle est faible tant que la vitesse du gaz reste modérée; pour des vitesses de gaz supérieures à  $6 \text{ cm. s}^{-1}$ , la rétention augmente en présence d'électrolytes.

## **I.7 Domaines d'application des réacteurs airlifts**

Ce type de réacteur est utilisé dans tout processus nécessitant un contact intime gaz-liquide ou gaz-liquide-solide et dans d'autres opérations qui exigent des contraintes de cisaillement faibles. Ils sont employés pour mettre en contact un gaz et un liquide, les réacteurs airlifts ont de nombreuses applications. Ils sont utilisés notamment en fermentation (Chisti, 1989), pour le traitement de l'eau et dans l'industrie chimique pour l'hydrogénation et l'oxydation de produits organiques (Hsu et Dudukovic, 1980). Parmi les applications industrielles on peut citer la production de protéines unicellulaires la fabrication d'anticorps monoclonaux par des cellules de mammifère et l'hydrogénation des huiles lourdes. Dans les applications triphasiques, beaucoup d'applications existent. On peut citer entre autre la mise en contact d'un catalyseur solide avec les phases liquides et gazeuse. Les réacteurs airlifts sont aussi utilisés dans l'industrie minière.

Ces dispositifs ont de nombreuses autres applications à savoir :

- Le traitement des eaux usées tels que la nitrification et la nitrification/dénitrification simultanées (Ghourich, 2006) ;
- Comme photobioréacteur pour la culture des algues à haute valeurs ajoutées (Ghourich, 2006);
- Le lavage des gaz en vue de l'élimination des effluents gazeux toxiques et des composés organiques volatiles (Ghourich, 2006) ;
- Pour les procédés nécessitant la présence d'une troisième phase solide, la fluidisation est assurée par une simple circulation du liquide (Ghourich, 2006);
- Dans l'industrie chimique et biotechnologique et des bioprocédés (par exemple, la production du vinaigre ou l'acide acétique (Olmos et al, 2001) ;
- Dans l'industrie chimique pour l'hydrogénation et l'oxydation des produits organiques (Hsu et Dudukovic, 1980) ;
- Pour des opérations mettant en œuvre des cinétiques relativement lentes (oxygénations, halogénations, hydrogénation...).

### **I.8 Avantages des réacteurs airlifts**

Les réacteurs airlift sont de très avantageux dispositifs, ces derniers ont la particularité d'avoir une boucle de recirculation qui améliore le transfert de matière gaz-liquide et aussi la capacité du mélange par rapport aux colonnes à bulles, sans avoir besoin de l'agitation mécanique, ce qui réduit le coût énergétique (Bauut, 2011). Ces réacteurs semblent être une solution simple et peu coûteuse en énergie pour mettre en œuvre des réactions en milieu triphasique. En effet, ils permettent de travailler à des concentrations élevées en solide ou en biomasse. Ces dispositifs assurent un meilleur transfert de quantité de mouvement entre le gaz et le liquide et donc une meilleure circulation.

Par rapport aux réacteurs agités, ils ont l'avantage de ne présenter aucune pièce mobile. Ceci facilite le maintien de l'étanchéité pour les réactions à haute pression et la stérilité pour les applications biologiques. De plus, l'apport d'énergie requis est faible et se limite à la puissance nécessaire à l'injection du gaz. Par ailleurs, en comparaison aux colonnes à bulles, les réacteurs airlifts présentent un écoulement clairement établi, facilitant le transfert de chaleur dans le cas de réactions endo- ou exothermiques

## I.9 Taux de vide dans les réacteurs airlifts

Le taux de vide ou la rétention gazeuse est la fraction du gaz dans le mélange diphasique, il dépend de différents facteurs tels que le débit du gaz, la pression d'injection et les propriétés physico-chimiques des deux phases. Il peut être défini différemment, selon le contexte d'utilisation.

La connaissance du taux de vide est un paramètre hydrodynamique important déterminant dans un nombre d'applications aussi diverses que variées. Plusieurs techniques de mesure intrusives et non intrusives ont été développées ces dernières décennies utilisant la différence des propriétés physiques des fluides lorsqu'ils se trouvent à l'état liquide ou gazeux (Pochet, 2012). Le taux de vide ou la rétention de la phase gazeuse est une caractéristique hydrodynamique importante. Il contribue à la détermination des autres paramètres : la nature des régimes d'écoulement, le coefficient de transfert de matière et l'aire interfaciale.

### I.9.1 Taux de vide global

C'est la fraction volumique du gaz dans le mélange diphasique, c'est le rapport entre le volume de la phase gazeuse et le volume du mélange diphasique. (Chisti, 1989)

$$\varepsilon = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (\text{I.3})$$

Avec,  $V_g$  est le volume de la phase gazeuse et  $V_l$  est celui de la phase liquide.

### I. 9.2 Taux de vide surfacique

C'est le rapport entre l'aire occupée par le gaz et l'aire occupée par le mélange diphasique, (Chisti, 1988).

$$\varepsilon = \frac{A_g}{A_g + A_l} \quad (\text{I.4})$$

Avec,  $A_g$  est l'aire occupée par la phase gazeuse et  $A_l$  est celle occupée par la phase liquide.

### I.9.3 Taux de vide volumétrique

C'est le rapport du débit volumique de la phase gazeuse au débit volumique du mélange diphasique.

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

Avec,  $Q_g$  est le débit volumique occupé par la phase gazeuse et  $Q_l$  est celui occupé par la phase liquide.

#### I.9.4 Techniques de mesure du taux de vide

Il existe plusieurs techniques qui sont utilisées pour la mesure du taux de vide, parmi les plus connues on trouve les suivantes :

##### a) Technique d'expansion de volume

Cette technique est utilisée beaucoup plus dans les colonnes à bulles de section uniforme où il n'y a pas recirculation du liquide, le taux de vide dans ce cas est calculé par la mesure de la hauteur du liquide au repos et la hauteur du mélange diphasique après expansion. Cela permet de mesurer la fraction de la phase liquide. L'obtention du taux de vide se fait en soustrayant la fraction du liquide de l'unité. Donc le taux de vide est calculé avec l'expression suivante :

$$\varepsilon = 1 - \frac{H_l}{H_m} \quad (\text{I.6})$$

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

##### b) Technique de vanne à fermeture rapide

Elle consiste à arrêter l'alimentation des deux phases liquide et gazeuse simultanément par la fermeture des deux vannes bien conçues pour cette tâche. La vanne coupant l'alimentation de la colonne doit être placée à une position bien choisie le long du riser. Le taux de vide est mesuré en déterminant le volume occupé par le gaz entre les deux sections. Cette technique est la plus fréquente et la plus précise. Elle est généralement utilisée quand il s'agit de colonnes à faible diamètre. Dans les colonnes à large diamètre la fermeture nécessite plus de temps, ce qui peut fausser les mesures (Tighzert, 2016).

##### c) Méthode manométrique

Elle est utilisée pour mesurer le taux de vide global entre deux sections de la colonne séparée par une hauteur  $\Delta H$ . Les deux sections sont dotées de deux prises de pression reliées à un manomètre en forme U. Le principe de la technique consiste à

exploiter les lois fondamentales de l'hydrostatique. Si la dénivellation lue sur le manomètre est de  $\Delta z$ , le taux de vide global est mesuré par l'expression suivante (Hills, 1976; Hikita et al., 1973, 1980; Akita et al., 1988; Chisti, 1989 ;Chisti, 1995 ; Vial et al., 2002 ; Tighzert, 2016 ; Caramasa et al., 1999) :

$$\varepsilon = \left( \frac{\rho_m - \rho_l}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{\Delta z}{\Delta H} \quad (\text{I.7})$$

#### d) Technique acoustique

Cette technique se base sur la différence de la vitesse du son selon le milieu de propagation de l'onde. En l'occurrence lorsqu'un ultrason est émis et rencontre une interface gaz-liquide, il se produit un phénomène de réflexion dû à la différence d'impédance du milieu. La mesure du taux de vide se base donc sur l'exploitation des propriétés acoustiques des deux phases (Pochet, 2012).

#### e) Technique radiative

Cette technique se base sur l'exploitation des propriétés d'absorption des rayonnements des deux phases gazeuse et liquide. Les rayonnements utilisés sont les rayons X,  $\beta$ ,  $\gamma$  et les neutrons. Les rayons les plus utilisés sont les rayons X et  $\gamma$  (Pochet, 2012).

#### f) Technique de sonde électrique

La technique de sonde électrique est basée sur la variation d'impédance due à la variation de la conductivité du mélange. La conductivité d'un liquide n'étant pas la même qu'un gaz, donc le taux de vide peut être calculé par la mesure de la conductivité du fluide circulant à l'extrémité de la sonde (Pchet, 2012).

#### g) Technique d'anémomètre à fil chaud

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

de taux de vide, de vitesse moyenne du liquide, de fluctuation de vitesse et d'intensité de turbulence.

## **I.10 vitesse de la phase liquide**

La vitesse du liquide est un des paramètres les plus importants dans l'hydrodynamique des réacteurs airlifts. Elle dépend directement de la vitesse superficielle du gaz dans la section ascendante. À débit de gaz faible, la vitesse du liquide augmente rapidement avec la vitesse du gaz, puis quand le gaz commence à recirculer dans la section descendante, cette augmentation est plus lente. La vitesse du liquide et le taux de vide sont intimement couplés. En effet la vitesse du liquide, contrôlée par les taux de vide dans le riser et le downcomer, affecte à son tour ces rétentions en augmentant ou en diminuant la vitesse d'ascension des bulles (Utiger 1998). La géométrie du réacteur influence de façon considérable la vitesse du liquide. Le séparateur gaz-liquide joue notamment un rôle majeur puisqu'il détermine la quantité de gaz qui sera recirculée et affecte par la même occasion les pertes de charge.

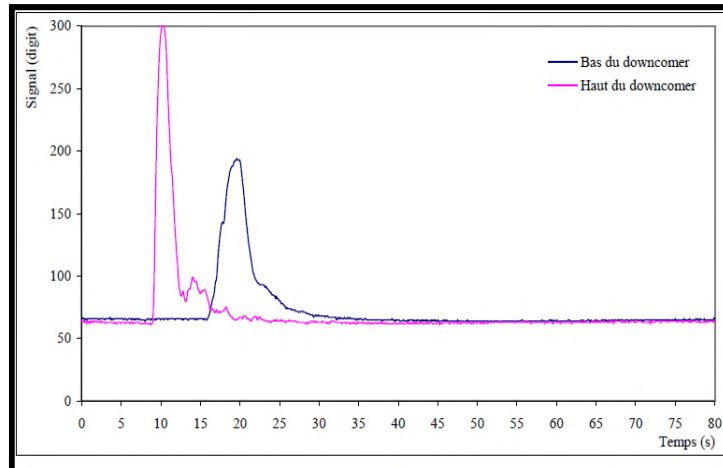
### **I.10.1 Technique par mesure du débit**

Cette technique est basée sur la mesure du débit de la phase liquide pompée en un temps précis. Elle nécessite l'installation d'une pompe pour assurer le fonctionnement en continu du réacteur (Kassab et al., 2009 ; Khalil et al., 1999 ; Hanafizadeh et al., 2011 ; Tighzert et al., 2013).

### **I.10.2 Méthode conductimétrique**

La vitesse du liquide dans le riser ou le downcomer peut être mesurée en utilisant la technique de traçage salin basée sur la mesure de la conductivité. Pour cela, deux sondes conductimétriques sont placées, l'une à l'entrée et l'autre à la sortie du riser (ou du downcomer). Une quantité d'une solution de sel saturé utilisée comme traceur est injectée à la base de la colonne. La détection du traceur se fait par ces deux sondes conductimétriques. L'estimation de la vitesse du liquide est obtenue par la division de la distance entre les deux électrodes par le temps de transit, déterminée à partir des moyennes des deux pics successifs détectée par les deux sondes (figure I.8). La vitesse du liquide dans le downcomer peut être déduite par la loi de conservation de masse (bennajah, 2007, Vial et al., 2000).

$$U_{Lr} = \frac{A_d}{A_r} U_{Ld} \quad (\text{I.8})$$



**Figure I.8:** Exemple des pics issus dans la méthode Conductimétrique (bennajah, 2007).

### I.10.3 Méthode de vélocimétrie laser

La vélocimétrie laser est la technique de double diffusion. Deux rayons laser se croisent et forment le volume de mesure qui est le siège d'un réseau de franges d'interférences. Des particules fines traversent ce volume de mesure et diffusent la lumière laser avec une fréquence qui dépend de l'interfrange  $i$  (distances qui sépare deux franges) et du module de la composante de la vitesse perpendiculaire au plan des franges (Kechroud, 2012).

### I.10.4 Modèle de Chisti et al

Dans la littérature il est fréquent de rencontrer des modèles semi-empiriques utilisés pour l'estimation de la vitesse de la phase liquide. Le modèle le plus récurrent est sans doute celui de Chisti (1988). Avec ce modèle la vitesse de circulation du liquide dans un réacteur airlift est déterminée par l'écriture du bilan d'énergie. L'énergie mise en jeu dans le système provient de l'expansion isotherme du gaz qui évolue dans le riser. Cette énergie se décompose en quatre termes comme suit : le premier terme est lié à la dissipation dans le sillage créé par les bulles, le second à la dissipation au cours des changements de direction au niveau des jonctions reliant le riser et le downcomer, le troisième est relatif à la stagnation du gaz dans le downcomer et le dernier terme représente la partie dissipée dans les frottements avec la paroi. En tenant compte de l'ensemble de ces composantes, l'équation de la vitesse de circulation de la phase liquide s'écrit comme suit :



$$U_L = \left[ \frac{2gh_D(\varepsilon_r - \varepsilon_d)}{\frac{K_T}{(1-\varepsilon_r)^2} + K_B \left(\frac{A_r}{A_d}\right)^2 \frac{1}{(1-\varepsilon_d)^2}} \right]^{0.5} \quad (\text{I.9})$$

Pour un système airlift à boucle externe, l'énergie dissipée à la sortie de la colonne peut être négligée devant celle de l'entrée. Par conséquent,  $K_T \ll K_B$ . L'équation (I.9) devient sous cette forme

$$U_L = \left[ \frac{2gh_D(\varepsilon_r - \varepsilon_d)}{K_B \left(\frac{A_r}{A_d}\right)^2 \frac{1}{(1-\varepsilon_d)^2}} \right]^{0.5} \quad (\text{I.10})$$

Où  $K_B$  est un coefficient de frottement à l'entrée du réacteur qui dépend des caractéristiques géométriques et qui est donnée par l'expression suivante :

$$K_B = 11.402 \left(\frac{A_d}{A_b}\right)^{0.789} \quad (\text{I.11})$$

Pour un système airlift à boucle externe, Chisti et al. (1988) supposent que la géométrie à l'entrée et à la sortie de la colonne est presque identique, ce qui les amènent à supposer que les coefficients  $K_B$  et  $K_T$  sont presque égaux. De ce fait l'équation donnant la vitesse  $U_{Lr}$  s'écrit :

$$U_L = \left[ \frac{2gh_D(\varepsilon_r - \varepsilon_d)}{K_B \left( \frac{1}{(1-\varepsilon_r)^2} + \left(\frac{A_r}{A_d}\right)^2 \frac{1}{(1-\varepsilon_d)^2} \right)} \right]^{0.5} \quad (\text{I.12})$$

### I.11 Effet du disperseur

Le type et la position du disperseur peuvent aussi affecter l'hydrodynamique d'un réacteur airlift. Traditionnellement, on installe le disperseur en fond de réacteur. Pour une meilleure distribution du gaz il est toutefois préférable de le placer juste au début de la zone ascendante, soit après le point d'entrée du liquide provenant du downcomer (Chisti, 1989). Chisti (1989) recommande un disperseur de type "échelle" en tube perforé car il permet une bonne distribution du gaz et du liquide sur toute la section du riser. Il existe des disperseurs plus efficaces tels les frittés, les plaques perforées et les distributeurs à membranes mais ceux-ci entravent davantage le passage du liquide. L'utilisation d'un distributeur rotatif a aussi été proposée.

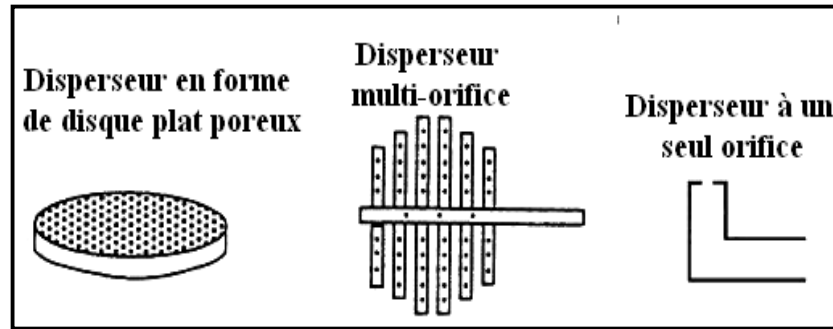


Figure I.9: Disperseurs utilisés par Vial et al. (2000)

## I.12 Nature du mélange dans le réacteur

La nature du mélange dans le réacteur peut influencer le fonctionnement du réacteur. En général deux situations extrêmes de mélange peuvent être décrites, en l'occurrence l'écoulement parfaitement mélangé dans lequel les concentrations sont uniformes à travers le fluide et l'écoulement piston où aucun mélange ne se produit selon le sens de l'écoulement. En pratique, le mélange est intermédiaire entre ces deux modèles idéaux, se rapprochant plus ou moins de l'un ou de l'autre. Le modèle fréquemment utilisé est le modèle piston avec dispersion qui comporte un seul paramètre, le coefficient de dispersion axiale. Les études portant sur le mélange de la phase liquide dans les réacteurs airlift ont d'abord évalué le temps de mélange et la dispersion axiale sur une circulation complète. Le temps de mélange diminue évidemment avec l'augmentation du débit de gaz. Certains chercheurs ont fait ressortir la contribution significative au mélange global des zones en haut et en bas de réacteur. Par la suite, on a démontré l'importance de considérer séparément la contribution des différentes sections du airlift (zone ascendante, zone descendante, séparateur de phases et changement de direction en bas du réacteur (Utiger, 1998).

Verlaan et al. (1989) (cité par Utiger (1998)) ont étudié la dispersion axiale dans ces différentes sections. Ils ont trouvé que l'écoulement se rapproche le plus d'un écoulement piston dans la zone descendante et que la dispersion axiale est plus importante dans la section ascendante en raison de la présence du gaz. La dispersion est la plus grande dans le séparateur gaz-liquide et l'écoulement dans cette partie du réacteur ne peut être considéré de type piston.

L'effet sur le mélange des paramètres géométriques et des propriétés physiques du liquide a aussi été étudié. Ainsi, plusieurs travaux montrent que la forme et la taille

du séparateur gaz-liquide ainsi que la hauteur du liquide qui s'y trouve influencent considérablement le mélange. La qualité du mélange dans le réacteur augmente d'abord avec la hauteur du liquide puis se stabilise. Cette observation peut être expliquée par la formation de deux zones, l'une où passe le liquide et l'autre au-dessus, plus ou moins stagnante dont la taille varie. L'existence d'une hauteur de liquide critique dans le séparateur gaz-liquide avait déjà été constatée par Chisti (1989). L'augmentation du rapport  $A_d/A_r$  diminue la dispersion dans le réacteur. Le rapport du temps de mélange sur le volume du réacteur demeure cependant environ constant. Si la résistance à l'écoulement est trop grande, il est probable que des recirculations internes puissent se former dans la zone ascendante ce qui contribue à augmenter la dispersion axiale dans cette section du réacteur.

### I.13. Masse volumique du mélange

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

$$\rho_m = \varepsilon\rho_g + (1 - \varepsilon)\rho_l \quad (\text{I.13})$$

$\rho_m$  : est la masse volumique du mélange diphasique ;

$\varepsilon$ : Le taux de vide global ;

$\rho_g$  Et  $\rho_l$ : Sont respectivement les masses volumiques de la phase gazeuse et de la phase liquide.

### I.14 Gradient de pression

Pour un écoulement diphasique vertical le gradient de pression est donné par la somme de trois composantes dont la première est liée au poids du fluides ( $\Delta P_g$ ), la seconde à l'accélération du fluide ( $\Delta P_{ac}$ ) et la troisième aux frottements entre les deux phases et avec la paroi ( $\Delta P_{fr}$ ) (De Cachard et Delhaye, 1996):

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

$\Delta P_g$  : Cette composante dû à la gravité, est appelée aussi « perte gravitaire ». Selon Nicklin(1963), cette composante est donnée par :

$$\Delta P_g = \left(\frac{dp}{dz}\right)_g = -\rho_l(1 - \varepsilon)g \quad (\text{I.15})$$

$\Delta P_{ac}$  : Ce terme dû à l'accélération est souvent négligé dans les calculs. On n'en tient compte que dans le cas d'un changement de phase lors de l'écoulement. Pour son estimation, De Cachard et Delhaye (1996) proposent l'équation suivante :

$$\Delta P_{ac} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{ac} = -\rho_l \frac{d}{dz} [V_l^2 (1 - \varepsilon)] = -\rho_l U_l^2 \frac{d}{dz} \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (\text{I.16})$$

$\Delta P_{fr}$  : Ce terme dû aux frottements est souvent négligé dans la littérature. Mais certains auteurs recommandent de le prendre en compte dans certaines conditions géométriques (Clark et Dabolt, 1986 ; De Cachard et Delhaye, 1996, François et al., 1996). Pour son estimation, cette équation est proposée :

$$\Delta P_{fr} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{fr} = 4 \frac{\tau}{D} \quad (\text{I.17})$$

$\tau$ : Contrainte de cisaillement (Pa).

## **CHAPITRE II**

---

### **Conception et réalisation du réacteur**

---

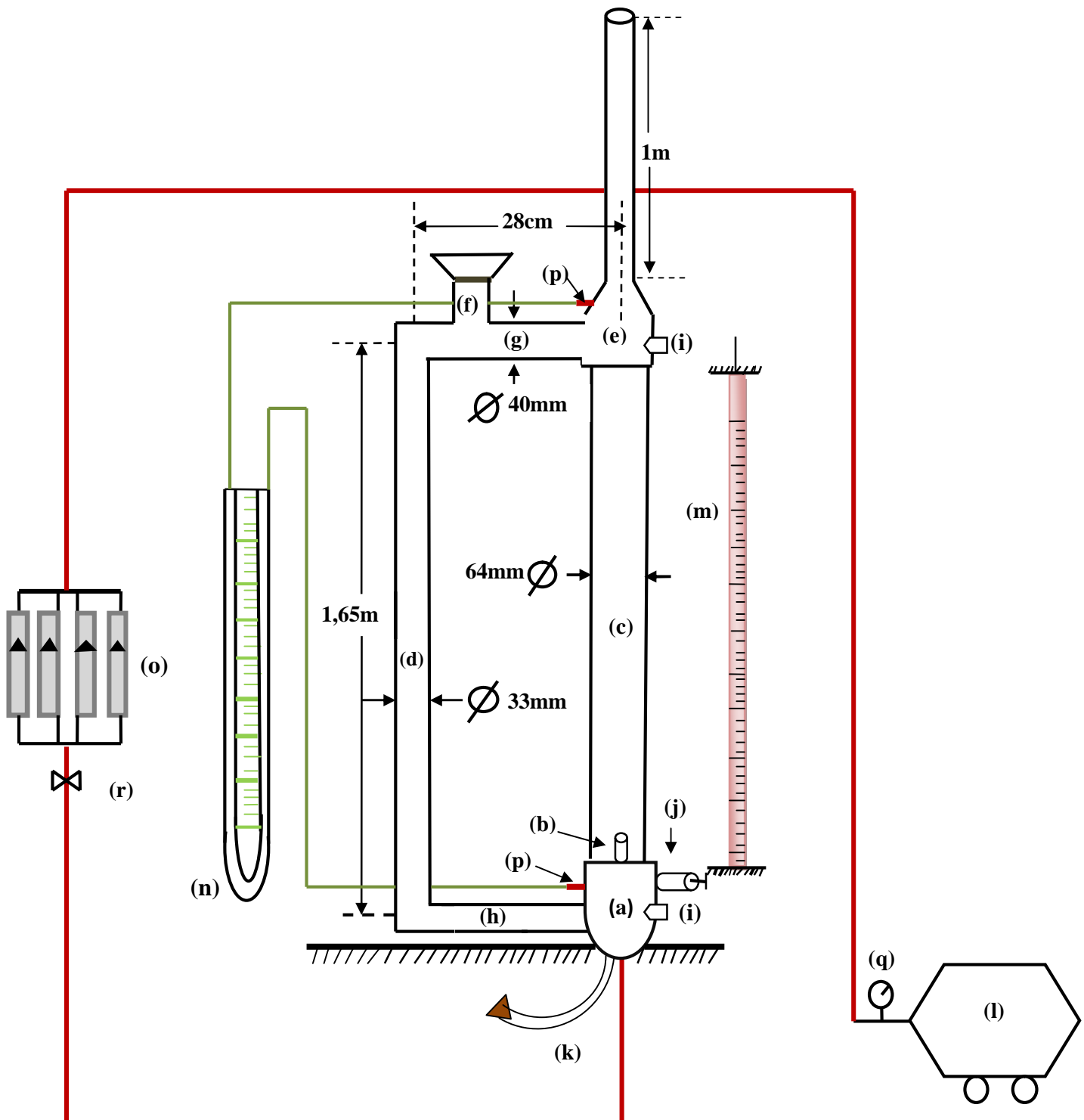
Dans ce chapitre nous présentons le réacteur airlift conçu et réalisé. L'ensemble des éléments qui le constituent, les différents matériaux utilisés seront détaillés ainsi que les étapes de la réalisation. A l'achèvement de la réalisation, le réacteur sera soumis à une batterie de tests hydrodynamiques. Divers fluides sont utilisés pour cette tâche. La caractérisation des régimes d'écoulement, la mesure du taux de vide global, la mesure de la vitesse de la phase liquide, le gradient de pression sont parmi les paramètres étudiés.

Nous tenons à rappeler que le dispositif qui fait l'objet de la présente étude a été réalisé au sein du laboratoire d'hydrodynamique de l'université A. Mira de Bejaïa. Le choix et les détails de la configuration sont inspirées de la littérature '(Chisti, 1989, Vial et al.(200-2005).

## II.1 Eléments constituant le réacteur

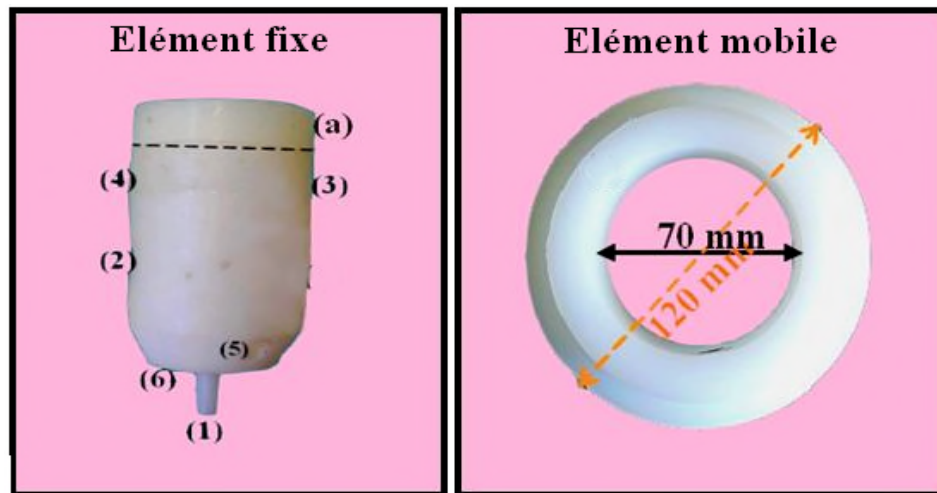
Le dispositif à réaliser se compose des éléments suivants :

- a. Section de base :** c'est une pièce cylindrique d'un diamètre intérieur de 70 mm et d'un diamètre extérieur de 120 mm fabriquée en téflon. La pièce est composée de deux éléments dont l'un est fixe et l'autre mobile. C'est dans ce dernier que la colonne est insérée. Comme son nom l'indique, la section de base est installée à la base du réacteur, elle sert à supporter le disperseur et le tube montant (riser) et relier ce dernier au tube descendant (downcomer) par une jonction (voir la figure II.2). La section de base est également dotée de trois orifices taraudés dont l'un est conçu pour l'insertion de la sonde du conductimètre, le second pour placer une prise de pression et le troisième pour insérer une seringue pour injection de solution ou colorant. Pour le besoin de la vidange une sortie est réalisée à la base de la section de sorte à ce que le drainage se fasse facilement.



**Figure II.1:** Schéma du réacteur airlift à boucle externe à réaliser

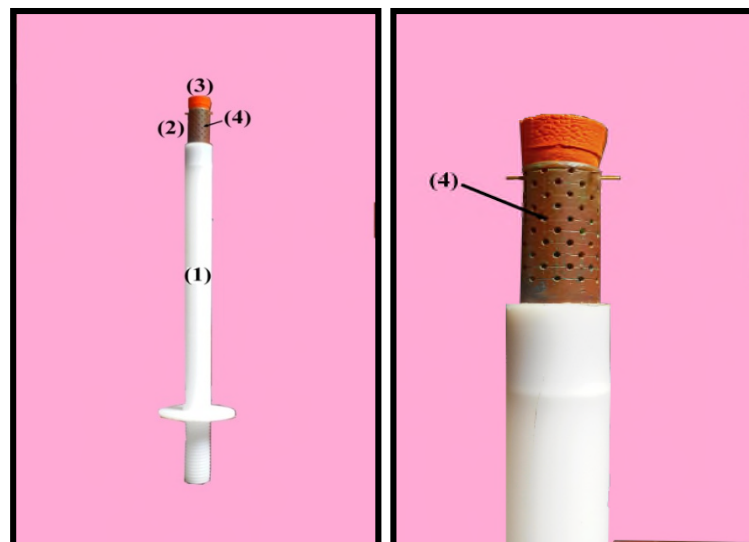
- |                                     |                                 |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| (a) : Section de base               | (j) : seringue pour l'injection |
| (b) : Disperser                     | (k) : tube de vidange           |
| (c) : Tube montant (riser)          | (l) : compresseur               |
| (d) : tube descendant (downcomer)   | (m) : règle graduée             |
| (e) : séparateur de phases          | (n) : manomètre                 |
| (f) : alimentation en liquide       | (o) : débitmètres à air         |
| (g) : jonction du sommet            | (p) : prises de pression        |
| (h) : jonction de base              | (q) : Régulateur de pression    |
| (i) : Entrée de la sonde électrique | (r) : vanne                     |



**Figure II.2:** Schéma de la section de base

- (1) : Alimentation en gaz ; (2) : Entré de la jonction de base  
 (2) : Orifice pour seringue ; (3) : Orifice pour prise de pression ;  
 (4) : Orifice pour la sonde du conductimètre

- b. Disperseur :** C'est un tube cylindrique en cuivre, de diamètre intérieur de 10 mm et de longueur de 195 mm, inséré soigneusement dans un tube en téflon. Le tube en cuivre dispose de 96 trous, répartis d'une façon uniforme sur sa surface latérale. Son extrémité est obstruée par un bouchon en caoutchouc assurant ainsi une bonne distribution radiale du gaz dans la phase liquide.



**Figure II.3 :** photographie du disperseur

- (1): Tube en téflon, (2) : tube en cuivre  
 (3) : bouchon, (4) : trous

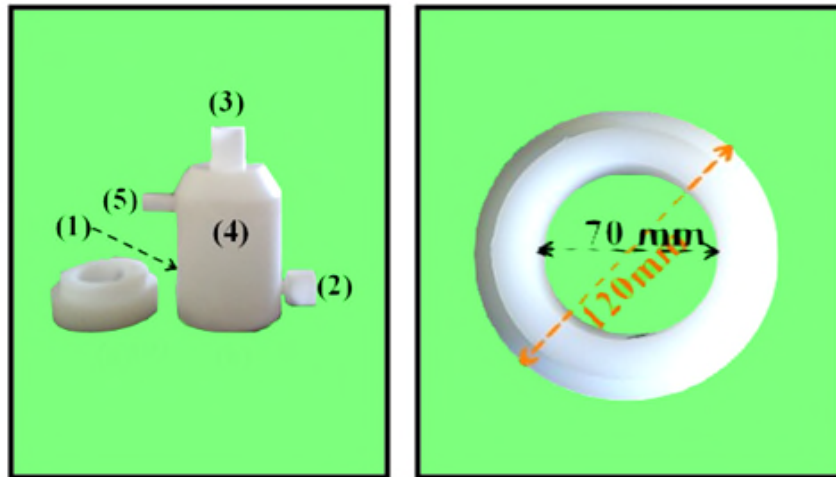


- c. **Colonne (riser)** : c'est un tube cylindrique transparent fabriqué en plexiglas ayant un diamètre intérieur de 64 mm et une longueur de 150cm. Cette partie du réacteur est siège d'un écoulement diphasique (gaz-liquide), sa transparence nous permet d'assurer visualisation, et sa composition en plexiglas lui donne une certaine résistance aux chocs et assure une manipulation aisée et sécurisée.
- d. **Downcomer (tube descendant)** : c'est un tube cylindrique transparent fabriqué en plexiglas d'un diamètre intérieur de 33 mm de même longueur que le riser. Cette partie du réacteur est siège d'un écoulement descendant.



**Figure II. 4:** Riser (a); Downcomer (b)

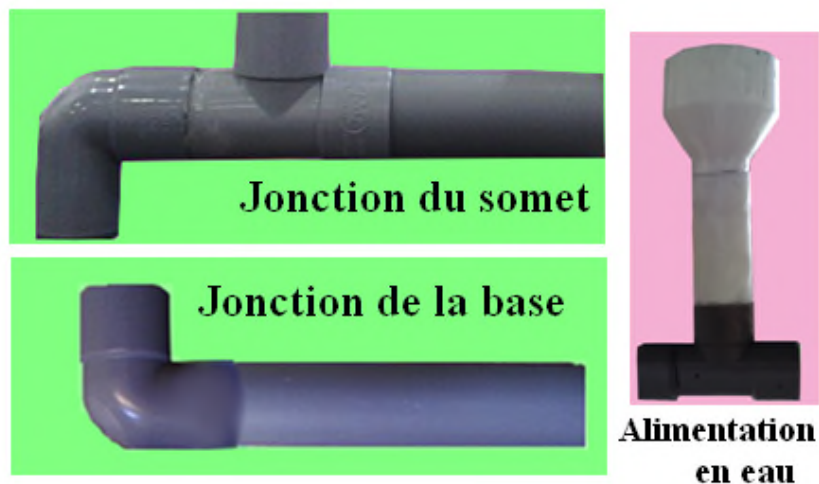
- e. **Séparateur de phases** : c'est un cylindre en téflon composé de deux pièces ayant un diamètre intérieur de 70mm et un diamètre extérieur de 120mm permettant ainsi l'insertion sur mesure de la colonne. Du côté latéral le séparateur dispose d'un trou circulaire conçu pour y installer une jonction reliant le riser et downcomer (voir figure II.5).



**Figure III.5:** Séparateur de phases

- (1) Sortie de la phase liquide
- (2) Orifice pour sonde
- (3) Evacuation du gaz
- (4) Corps du séparateur

f. **Jonction riser-downcomer:** le riser et le downcomer sont reliés à la base et au sommet par deux tubes cylindriques en PVC de diamètre intérieur égal à 40 mm et d'une longueur de 25 cm. Les jonctions comportent deux coudes de sorte à ce que l'angle formé avec le downcomer soit droit. La jonction de la sortie dispose d'une ouverture sous forme d'un T permettant d'alimenter le réacteur en phase liquide (Figure II.6).



**Figure II.6 :** Photographie des jonctions riser-downcomer.

g. **Tuyau de vidange :** c'est une sortie à la section de base, portant un bouchon à l'extrémité nous sert à vider le liquide contenant dans le réacteur

- h. Prise de pressions :** deux prises de pression l'une située au sommet du réacteur au séparateur de phase, l'autre située à la section de base servant à mesurer le gradient de pression, (voir figure II.17).



**Figure II.7 :** prise de pression

- i. Régulateur de pression :** c'est un élément du compresseur, avec lequel on contrôle la pression d'injection du gaz comprimé. Il permet la lecture de la pression d'injection en différentes unités (voir figure II.8)



**Figure II.8:** Régulateur de pression

## II.2 Montage et assemblage des pièces du réacteur

### II.2.1 Matériaux et produits utilisés

Dans les tableaux ci-dessous nous présentons l'ensemble des matériaux et outils utilisés pour la réalisation du réacteur.

**Tableau II.1** : Tableau récapitulatif des matériaux et outils utilisés avec leur fonction.

<b>Matériaux et Outils</b>	<b>Fonction ou utilité</b>
Structure métallique Tubes en plexiglas Téflon usinée Eléments en PVC Plaque en bois Disperseur	Sert de support pour le réacteur Sert à en faire le riser le downcomer Section de base, jonctions, séparateur de phases Jonction riser-downcomer, tube d'évacuation du gaz Support pour section de base et séparateur de phases Sert à disperser la phase gaz dans le liquide

**Tableau II.2** : Tableau récapitulatif des accessoires du réacteur et leur fonction

<b>Accessoires externes du réacteur</b>	<b>Fonction ou utilité</b>
Compresseur	Pour l'injection de l'air comprimé
Manomètre	Evaluer le gradient de pression
Règle graduée	Fixer ou estimer la hauteur du liquide dans le riser
Conductimètre	Pour mesurer la conductivité
Seringue (5 et 10 ml)	Pour injection des solutés
Prise de pression	Pour relier le riser au manomètre
Tuyaux fins	Pour relier le manomètre au downcomer
Thermomètre	Mesurer la température des deux phases
Bouchon en caoutchouc	Obstruer les orifices en cas de besoin.

**Tableau II.3** : Tableau récapitulatif des différents outils lors de la réalisation du réacteur

<b>Outils</b>
Perceuse
Visseuse
Tronçonneuse
Scie
Plaque chauffante
Araldite (colle) (b)
Silicone (colle)
Colle à base cyanoacrylate (a)
Colle à base de dichloro-éthane et débris de plexiglas ©



**Figure II.9:** Silicone à pistolet



(a)

(b)

(c)

**Figure II.10:** Différentes de colles utilisées

### II.2.2 Etapes de réalisation du réacteur

Après avoir préparé et réuni toutes les pièces nécessaires pour la réalisation du réacteur, nous avons procédé à l'assemblage et au montage des différentes pièces. Le montage du réacteur se fait sur une structure métallique bien conçue pour cette tâche, suivant les étapes suivantes.

1) Cette structure est fabriquée en acier et elle est fixée soigneusement au sol par des chevilles en plastique. Nous avons veillé à ce que les vibrations soient amorties au maximum lors du fonctionnement (voir figure II.11).



**Figure II.11:** Structure métallique fixée au sol

- 2) La structure métallique est percée en différents endroits pour pouvoir y placer des vis pour la fixation des autres éléments, notamment à la base et au sommet pour installer deux plaques en bois (50X30cm) qui vont servir de support pour la section de base et le séparateur de phases.
- 3) La jonction riser-downcomer fabriquée avec un morceau de PVC (40mm) est jointe à la section de base via l'orifice réalisé pour l'y placer. Le collage est réalisé avec l'araldite du côté intérieur de la pièce pour préserver l'aspect esthétique du montage (voir figure II.13).



**Figure II.12** : plaque en bois fixée sur la structure métallique



**Figure II.13**: Montage de la jonction riser-downcomer

- 4) Le disperser est vissé au centre de la section de base de sorte à ce que la partie faite en cuivre soit située exactement à la base du riser. De l'autre côté de la section de base, face au sol, une pièce complémentaire au disperser est vissée aussi à la section de base. Cette pièce est de forme cylindrique sert à être reliée au tuyau à gaz provenant du compresseur. Elle est fabriquée en téflon, de diamètre intérieur égal à 8 mm et elle partage le même axe vertical que le disperser. (figure II.14)



**Figure II.14** : Montage du disperser dans la section de base

- 5) Une fois le disperseur est fixé, la section de base dispose de trois supports métalliques pour la fixer sur la plaque en bois, l'ensemble est ensuite posé et vissé sur la plaque en bois (voir figure II.15).



**Figure II.15 :** Fixation de la section de base sur la structure métallique

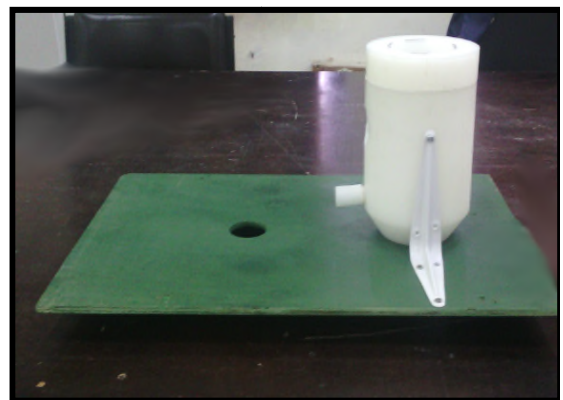


**Figure II.16 :** Sortie pour l'alimentation en air

La deuxième plaque en bois sert de support pour le séparateur de phases. Pour cela deux trous sont réalisés sur la plaque comme le montre la figure (II.17). Le séparateur de phases dispose aussi de trois supports métallique pour fixation sur la plaque en bois de sorte à ce que la sortie d'évacuation soit de même axe que le trou du côté droit. Le trou du côté gauche est conçu pour y insérer un tube en PVC qui va servir d'une entrée pour alimentation (voir figure II.18).



**Figure II.17 :** Plaque en bois pour supporter le séparateur de phases

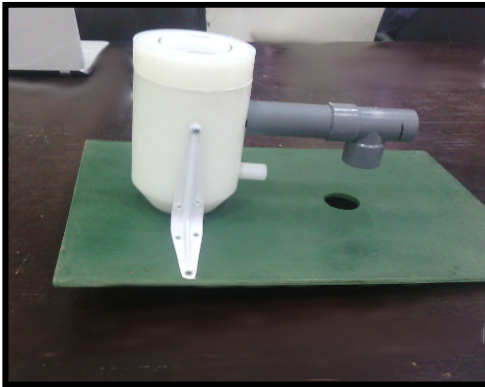


**Figure II.18 :** Fixation du séparateur de phases

- 6) La jonction riser/downcomer de la partie supérieure du réacteur est réalisée de la même façon que celle de la section de base. Elle a été assemblée à l'aide de

l'araldite du côté intérieur. Cette jonction comporte un T en PVC servant d'orifice pour l'alimentation en phase liquide.

- 7) L'ensemble de ces éléments (séparateur de phases, jonction) sont fixés sur la plaque en bois comme le montre la figure (II.19), la pièce en bois est à son tour fixée sur la structure métallique comme la figure (II.20) le montre.



**Figure II.19 :** Montage de la jonction supérieure



**Figure II.20 :** Fixation du séparateur de phases sur la structure métallique

- 8) Le tube de 64 mm qui constitue le riser est maintenant inséré délicatement dans la section de base et le séparateur de phases. Le tube de 33 mm constituant le downcomer est aussi monté entre les deux jonctions en PVC. L'assemblage est représenté sur la figure II.21.





**Figure II.21 :** Montage du riser et du downcomer sur la structure métallique

- 9) L'étanchéité a été assurée par l'application de la silicone au niveau de tous les joints. Il a été aussi nécessaire de vérifier la verticalité du dispositif.
- 10) Le manomètre est fixé par des vis sur la structure métallique et relié au riser par de fins tuyaux et deux prises de pression.
- 11) Afin d'éviter le retour du liquide au compresseur le branchement du tuyau à gaz est fait de sorte à ce qu'il passe au-dessus du séparateur de phases.
  - ❖ Le réacteur airlift à boucle externe réalisé est représenté sur la figure II.22



**Figure II.22** : Photographie du réacteur réalisé

### II.3 Accessoires et instruments de mesure

- 1) **Compresseur à air** : de marque IUOWEI, de volume de 100 l et de pression maximale de 8bar, cet appareil à pour rôle de comprimer l'air et de l'envoyer aux débitmètres puis au disperseur (voir figure II.23).



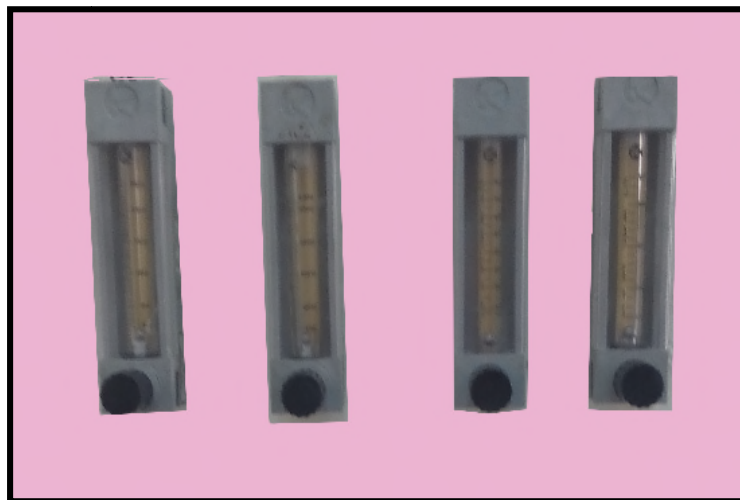
**Figure II.23** : Compresseur utilisé

- 2) **Manomètre**: il est en forme U, il sert à mesurer la différence de pression gradué il nous sert à mesurer le gradient de pression entre la base et le sommet du réacteur (voir figure II.24).
- 3) **Règle graduée** : elle est fabriquée en bois, fixée verticalement aux deux extrémités à la structure métallique. Elle permet d'estimer la hauteur du liquide dans le réacteur (voir figure II.24).



**Figure II.24 :** Manomètre (a) ;  
Règle graduée (b)

- 4) **Débitmètres :** quatre débitmètres placés en parallèle avec lesquelles on contrôle le débit du gaz injecté par le compresseur avant de passer au réacteur (voir figure II.25).



**Figure II.25 :** Débitmètres à air

- 5) **Vanne à air** : située à la sortie des débitmètres elle sert à contrôler l'alimentation en air des débitmètres avec laquelle on contrôle le passage du gaz au réacteur (voir figure II.26).



**Figure II.26** : Vanne à air

- 6) **Seringue** : c'est une seringue de 5mm qui sert à injecter soit la solution saturée en sel soit le colorant.



**Figure II.27**: Seringue utilisée

## II.4 Mise en fonctionnement du réacteur

A l'issue de la réalisation du réacteur nous avons vérifié son étanchéité. Nous avons également procédé au chargement du compresseur. Vient par la suite l'étape du remplissage du réacteur à un niveau bien défini. On allume le compresseur et on procède au réglage de la pression d'injection puis on ajuste les débitmètres à air à la valeur choisie. Pour un débit bien déterminé, la phase liquide devient siège d'un écoulement diphasique dans le riser et on assiste un écoulement en boucle (riser-downcomer). Ainsi le réacteur réalisé est mis en fonctionnement. Le dispositif est donc prêt à subir les différents tests et les différentes mesures des paramètres hydrodynamiques qui seront détaillés dans le chapitre qui va suivre.

## **CHAPITRE III**

---

# **Caractérisation hydrodynamique du réacteur**

---

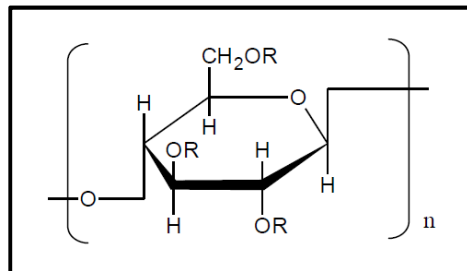
### III. Caractérisation hydrodynamique du réacteur

Cette partie est consacrée à la caractérisation hydrodynamique du réacteur réalisé. Il s'agira de procéder à la caractérisation des régimes d'écoulements, à la mesure du taux de vide, la vitesse de la phase liquide et le gradient de pression pour des volumes différents du réacteur. Comme fluides de test nous avons utilisé l'eau du robinet, la solution de la glycérine et la solution de la carboxyméthylcellulos (CMC) à différentes concentration.

#### III.1 Caractéristiques des fluides utilisés

##### a) la carboxyméthylcellulos (CMC)

C'est une poudre granuleuse ou fibreuse, blanche ou légèrement jaunâtre ou grisâtre, légèrement hygroscopique inodore et insipide, elle est préparée uniquement à partir de bois par traitement avec de la soude et de l'acide monochloroacétique ou son sel de sodium. Cette poudre lorsqu'elle est dissoute dans l'eau devient une solution plus ou moins visqueuse (selon de la concentration). La formule chimique de cette substance est la suivante :



**Figure III.1** formule brute de la CMC, Où  $R=CH_2COONa$

##### b) Glycérine

La glycérine ou glycérol est un alcool qui se présente sous la forme d'un liquide transparent, visqueux, incolore, inodore, non toxique, soluble dans l'eau grâce à la fonction alcool. C'est un produit issu de la réaction de saponification, sa formule chimique brute est de la forme  $C_3H_8O_3$  ( $HOH_2C-CHOH-CH_2OH$ ).

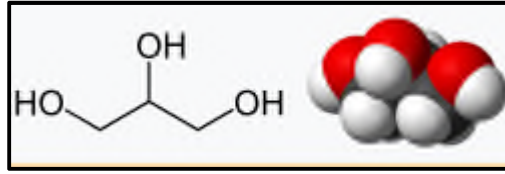


Figure III.2 : Formule chimique de la glycérine

La masse molaire de ce composé est de 92,0938g/mol, sa température de fusion et celle d'ébullition sont respectivement 18,2°C et 290°C.

Tableau III.1 : Les caractéristiques des phases liquides utilisées

Fluides utilisés	Eau	CMC (5g/l)	CMC (10g/l)	CMC (20g/l)	Glycérine à 80%
Température (°C)	24	25	25	25	24
Masse volumique (g/l)	1000	970	974	987	1172
Viscosité(Pl)	1	Voir Annexe (A)	Voir Annexe (B)	Voir Annexe (C)	$4,833.10^{-2}$
Nature	Newtonien	Non-newtonien	Non-newtonien	Non-newtonien	Newtonien

## III.2 Caractérisation des régimes d'écoulement

### III.2.1 Phase liquide eau

#### a. Réacteur à volume plein ( $H_1=1,5$ m)

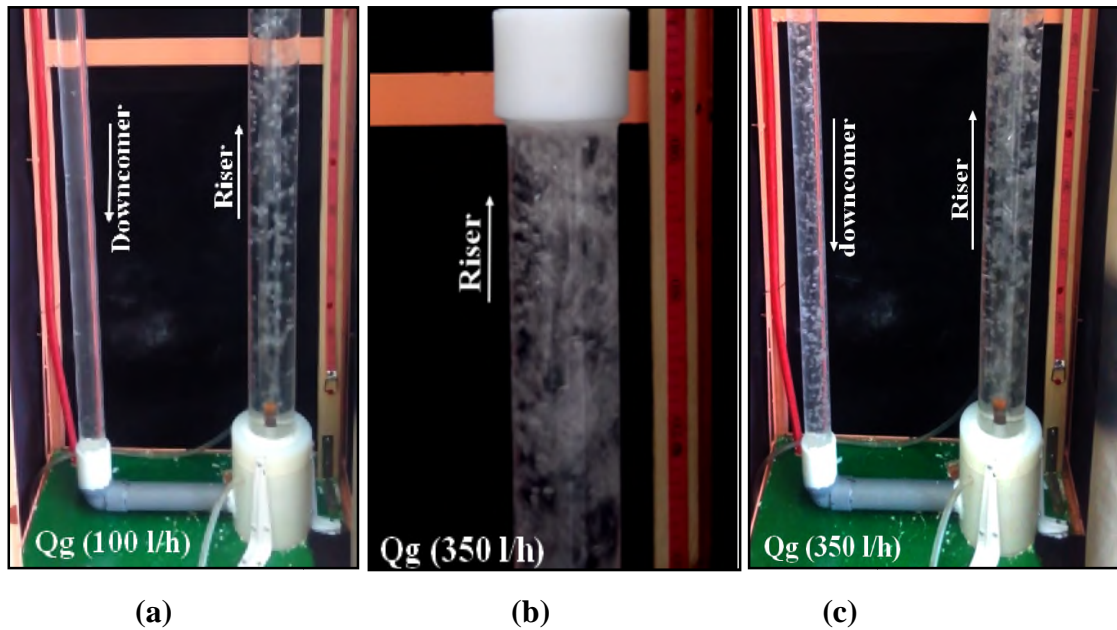
Après avoir réglé l'étanchéité du réacteur, on remplit le réacteur avec l'eau de robinet à volume plein (8 litres) en laissant le compresseur se charger d'air, une fois le compresseur est chargé, on a procédé au réglage de la pression d'injection et au choix du débit d'air à utiliser. Le plus faible débit d'air est de 80 l/h. Il a été varié jusqu'à 1300 (l/h) avec un pas de 50 (l/h). Pratiquement toutes les expériences ont été suivies en vidéo et en photographie.

**[80-200] (l/h)** : Pour cette gamme de débits, au niveau du riser, nous avons obtenu un régime à bulles. Ce régime se caractérise par la dispersion des bulles d'une manière



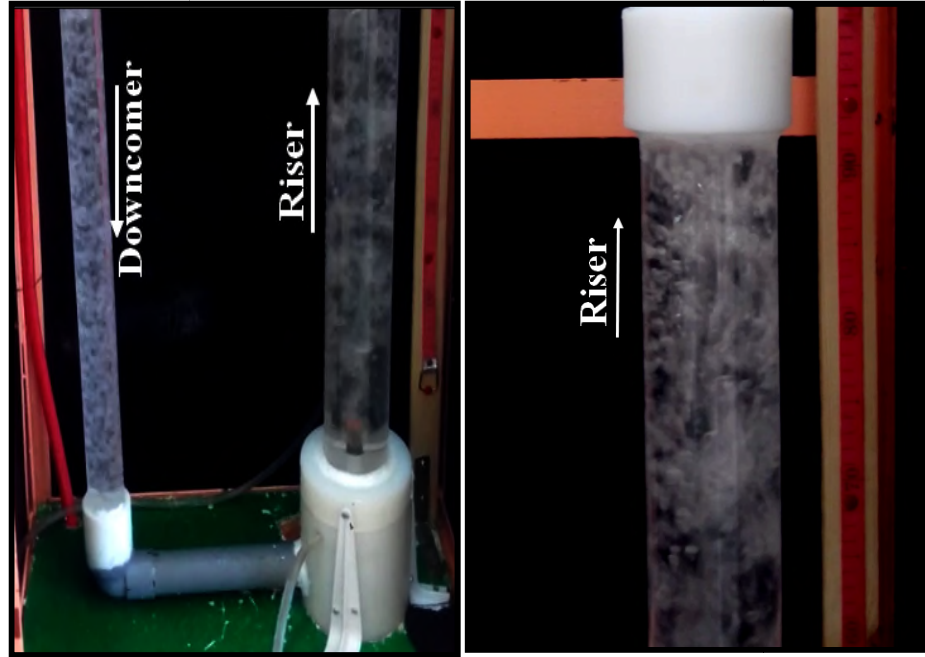
homogène le long de la colonne. La taille des bulles est relativement petite et de densité moyenne (Figure III.3-a). Pour cette gamme de débit nous n'avons remarqué aucune bulle dans le downcomer,

**[200-550] (l/h)** : dans le riser le régime à bulles paraît être ondulatoire et la densité des bulles augmente avec l'augmentation du débit avec un début de coalescence. Dans le downcomer, il y a apparition du régime à bulles plus fin que celui observé dans le riser. La recirculation de la phase liquide devient visible avec une zone morte au niveau du coude de la jonction riser-downcomer (figure III.3-b-c).



**Figure III.3** Régimes d'écoulement observés pour la phase liquide eau à faibles débits d'air

**[600-1000] (l/h)** : Dans cette gamme on observe que la coalescence s'accroît et les bulles se déplacent en forme de blocs avec tentative de se transformer en poches en y parvenant que d'une façon éphémère (des poches qui se détruisent à leur naissance) : c'est la transition du régime à bulles vers le turbulent baratté. Dans le downcomer le régime à bulles homogène s'établit avec une augmentation de densité de bulles et une recirculation relativement plus rapide (Figure III.4).



**Figure III.4** Régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide eau à débits d'air moyens

$Q_g > 1000$  (l/h) : Dans cette gamme le régime à bulles disparaît complètement en laissant place à un écoulement chaotique, aléatoire et désordonné, se faisant dans tous les sens : c'est l'établissement du régime turbulent baratté. Dans le downcomer le régime à bulles déjà établi reste inchangé. Sauf que la densité devient de plus en plus importante. (Figure III.5)



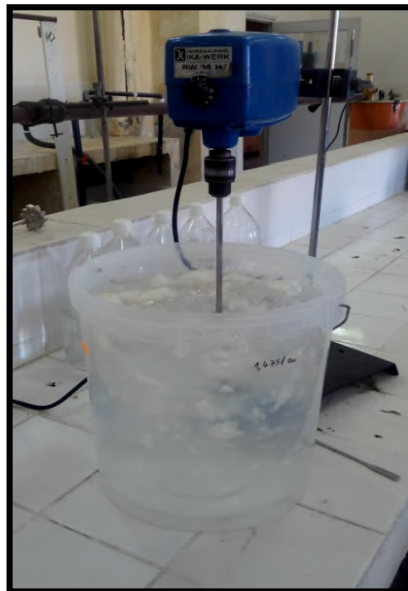
**Figure III.5** Régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide eau à débits d'air élevés

**b. Réacteur partiellement rempli ( $H_1= 0,6$  à  $1$  m)**

Pour mieux approfondir la caractérisation, nous avons procédé à la caractérisation des régimes dans le cas d'un réacteur partiellement rempli. Dans le premier cas, le réacteur est rempli à  $H_1=0,6$  m (soit 4 litres) dans le second à  $H_1=1$  m (soit 5,5 litres). Au cours des observations nous n'avons noté aucune différence en matière de régimes et dans le riser et dans le downcomer. La seule différence enregistrée réside dans le débit d'air nécessaire pour provoquer la recirculation.

**III.2.2 Phase liquide CMC (20 g/l)**

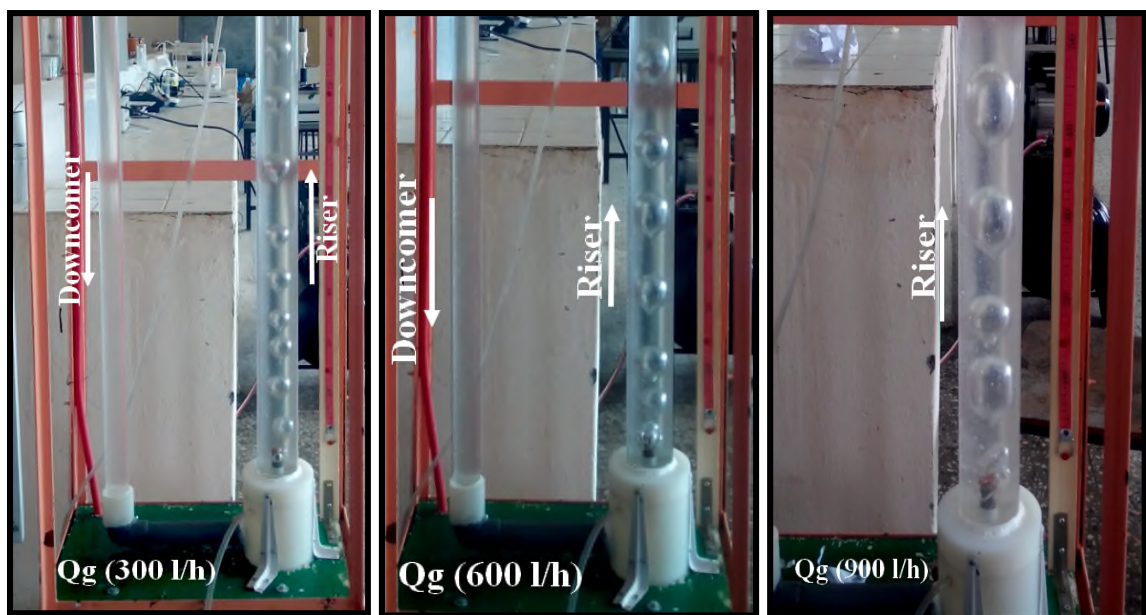
La préparation de cette solution consiste à dissoudre 180 g dans 9 litre de l'eau. Un volume suffisant pour le remplissage total du réacteur. La nature rhéologique du mélange nécessite une agitation d'environ 24 h pour une dissolution complète (Figure III.6). Une fois la solution est prête (dissolution complète) nous avons procédé à la mesure de la densité à l'aide d'un pycnomètre et la viscosité à l'aide d'un viscosimètre de type Couette. Lors de la mise en marche du réacteur avec la CMC pour la caractérisation nous avons pris des photos et des vidéos pour différents débits (50 à 1500 l/h). Les photographies et les vidéos ont donné lieu aux observations suivantes :



**Figure III.6** préparation de la solution de CMC 20 g/l

**[80-900](l/h)** : pour cette gamme de débit, nous avons observé une coalescence qui se fait directement à la sortie du disperseur pour former une seule bulle de forme sphérique

ayant une queue fine dans la région son de sillage. A des temps réguliers, les petites gouttes de la CMC sortant du disperseur se coalescent instantanément à la sortie du disperseur et se transforment en une seule goutte dont la géométrie est décrite ci-dessus. Le long de l'axe de la colonne de grosses gouttes (environ 5 cm de diamètre) s'écoulent d'une façon symétrique au milieu de la phase liquide. Nous avons remarqué que la fréquence de naissance de ces bulles augmente avec l'augmentation du débit d'air. Notons qu'à l'intérieur du downcomer nous n'avons noté aucune bulle de dimension visible, (Figure III.7).



**Figure III.7** photographies de régime d'écoulement pour la phase liquide CMC 20g/l à faibles et moyens débits d'air

[1000-1500] : Dans cette gamme, la vitesse des bulles font que la coalescence s'accroît davantage. La collision entre deux bulles successives le long de l'axe du riser transforme ces dernières en une grosse poche de forme ellipsoïdale presque de diamètre de la colonne, elles se déplacent toujours le long de l'axe d'une façon périodique. Dans la plupart des cas les poches sont séparées par une autre poche de dimension inférieure. A un niveau de la jonction horizontale supérieure nous avons remarqué une zone de recirculation dans la partie visible à la sortie coudée. Dans le downcomer nous n'avons enregistré que de fines gouttes presque invisibles. (Figure III.8).

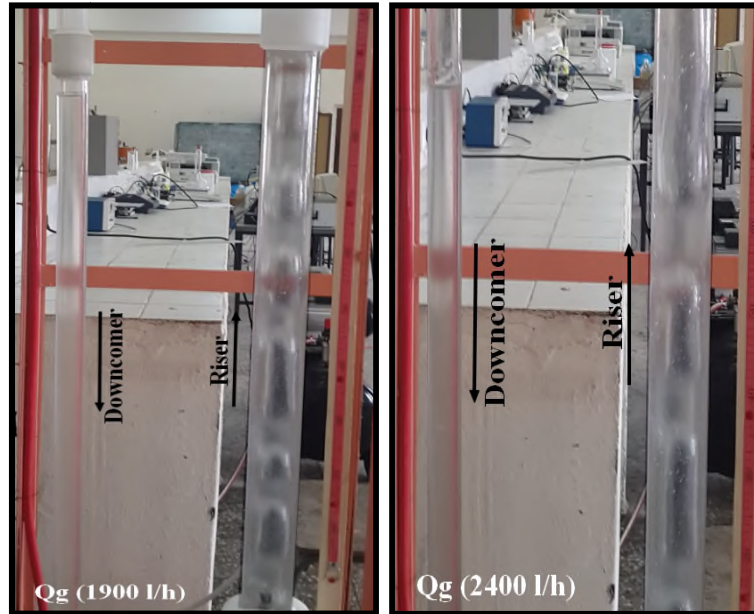


**Figure III.8** régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide CMC (20g/l) de  $Q_g = 1000$  à 1500 l/h

**Remarque :** Pour le volume plein ( $H_1=1,5\text{m}$ ), pour des raisons de débordement au séparateur de phases, nous avons été limités à un débit 1500 l/h.

La procédure opératoire avec des volumes remplis respectivement à ( $H_1=1\text{m}$  et  $H_1=0,6\text{ m}$ ) a montré que les régimes d'écoulement observés sont identiques. Le volume du réacteur dans le cas de la CMC semble n'avoir aucun effet sur la structure de l'écoulement.

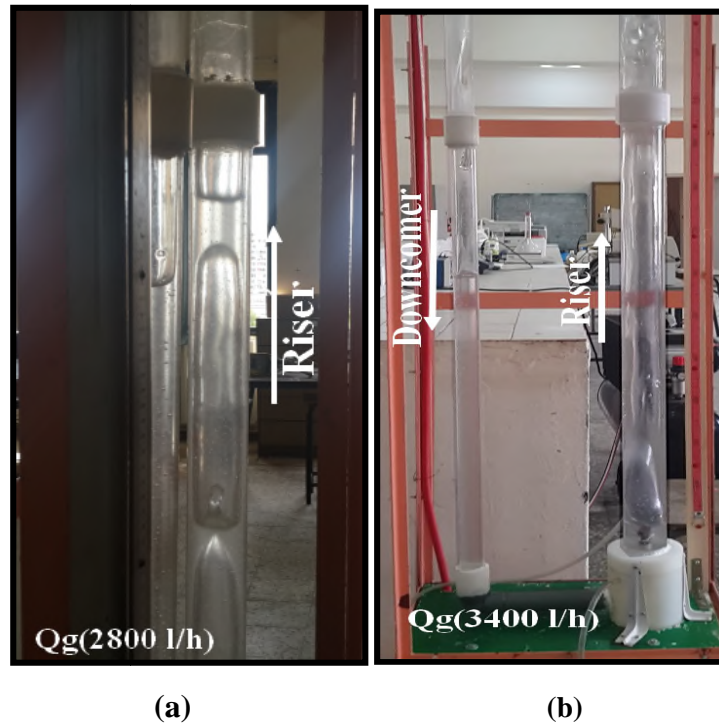
**[1600-2400] (l/h) :** Nous avons observé d'emblé un régime à poches. Une coalescence directe à la sortie du disperseur qui engendre la formation des poches de forme ellipsoïdale plus longues qui occupent presque la totalité du diamètre de la colonne avec une recirculation du film liquide vers le bas. On remarque aussi une recirculation lente au downcomer à partir du débit de 2400 l/h pour une hauteur initiale de 1m (figure III.9).



**Figure III.9** régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide CMC 20g/l de  $Q_g = 1600$  à  $2400$  l/h

**[2500-3000] (l/h)** : Les poches décrites précédemment s'allongent davantage et elles ne sont séparées entre elles que par un film liquide mince ce qui donne visuellement l'aspect d'un régime semi-annulaire, (Figure III.10-a).

**[3000-4000] (l/h)** : La partie centrale est occupée par le gaz et le film liquide s'écoule sur la paroi, c'est le régime annulaire, (Figure III.10-b).



**Figure III.10** régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide CMC 20g/l pour des débits d'air élevés

**Remarque :** la tentative d'estimer visuellement la fréquence des bulles et des poches s'est avérée infructueuse.

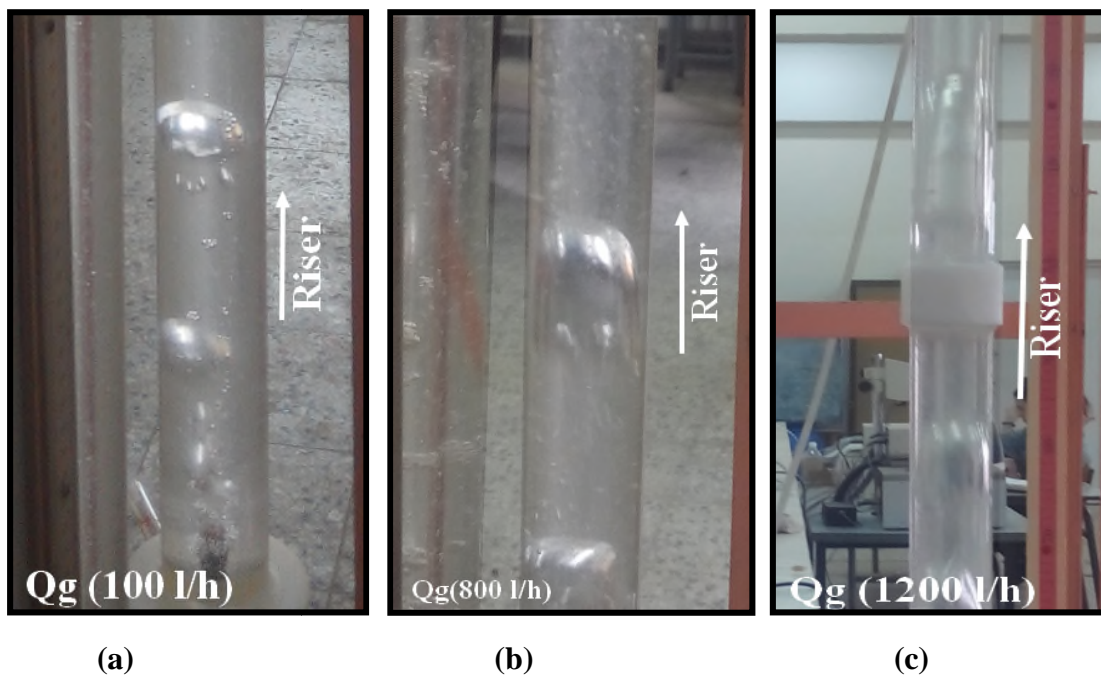
### III.2.3 La phase liquide CMC (10 g/l)

La préparation de cette solution consiste à dissoudre 90 g de la CMC en poudre dans 9l d'eau de robinet. Le même procédé d'agitation a été suivi pendant près de 24 h

**[80-200](l/h) :** on remarque une coalescence directe à la sortie du disperseur formant des bulles de forme de calotte sphérique, centrées le long du riser, (Figure III.11-a).

**$Q_g > 250$  l/h :** on a observé la formation de courtes poches qui grandissent en augmentant le débit, ces poches montent d'une façon instable lors de la sortie du disperseur, mais elles se stabilisent à partir 1m de la colonne, (Figure III.11-b-c).

Au downcomer, on a noté une recirculation a partir de 100 l/h, la formation de petites bulles qui se regroupent et qui tentent de se libérer mais à cause de l'effet de la viscosité et le profil de vitesse qui diminue à la paroi, elles deviennent piégées.



**Figure III.11** régime d'écoulement obtenu pour la phase liquide CMC 10g/l à différents débits d'air

### III.2.4 Phase liquide CMC (5 g/l) :

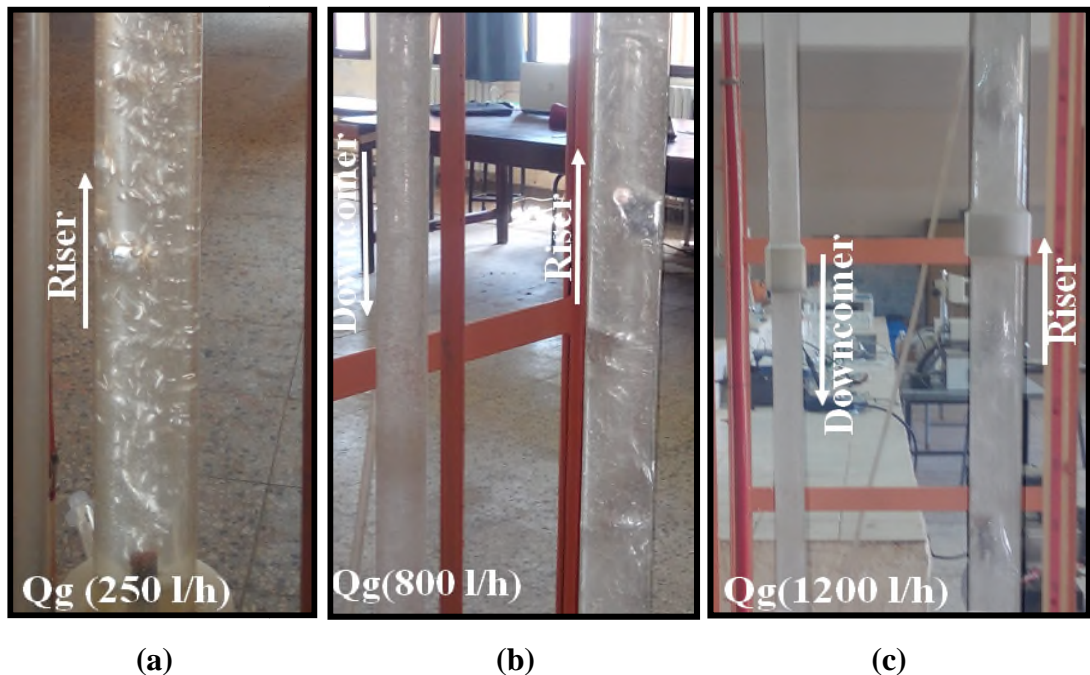
Nous avons suivi le même procédé de préparation de la solution que celui décrit ci-haut. Dans le cas de la CMC de 5g/l, nous avons observé ce qui suit :

Dans le riser, à faibles débits d'air, nous avons obtenu un régime à bulles légèrement hétérogène. C'est-à-dire des bulles de petites dimension mais de formes géométriques différentes. Le phénomène de la coalescence a fortement diminué et contrairement aux deux autres concentrations (10 et 20 g/l) les bulles sortantes continuent à se disperser dans la phase liquide. (Figure III.12-a-b). La viscosité semble avoir un effet sur le régime à bulles

**$Q_g > 1000$  l/h :** Avec l'augmentation du débit d'air, le phénomène de la coalescence commence à apparaître en s'accroissant avec la croissance de ce débit. Ceci mène à la formation de poches de formes irrégulières à l'extrémité du riser. (Figure III.12-c). Une géométrie de poche qui n'a pas été observée avec les autres concentrations.

Le downcomer est siège d'un régime à bulles avec une circulation de la phase liquide vers le bas bien visible au centre de la colonne et tentative d'une circulation dans le sens contraire près des deux parois.

**Remarque :** En raison du problème débordement nous avons été contraints de limiter le débit à 1200 l/h.



**Figure III.12** Configuration obtenue pour la CMC (5 g/l) à différents débits de gaz



### III.2.1 Phase liquide glycérine (80 %)

Pour cette caractérisation, on a utilisé une solution de glycérine diluée à 80% en volume. Pour des raisons de la disponibilité du produit nous avons été contraints de travailler à volume rempli à ( $H_1=1m$ ) de hauteur. Comme observation nous avons noté ce qui suit:

**80-500 l/h** : on a obtenu un régime à bulles hétérogène, des bulles de petites dimension et de différentes formes. Les bulles sont dispersés le long de la colonne. La coalescence et la densité des bulles augmentent avec l'augmentation du débit d'air injecté. (Figure III.13).

**$Q_g > 250$  l/h** : le liquide commence à devenir mousseux à cause de l'agitation créée par le gaz en formant de fines bulles. Le mélange diphasique perd sa transparence et devient complètement blanc. La caractérisation ne peut plus se faire, nous avons été contraints d'arrêter à **500 l/h** car à ce débit la visualisation est devenue impossible (voir figure III.13)

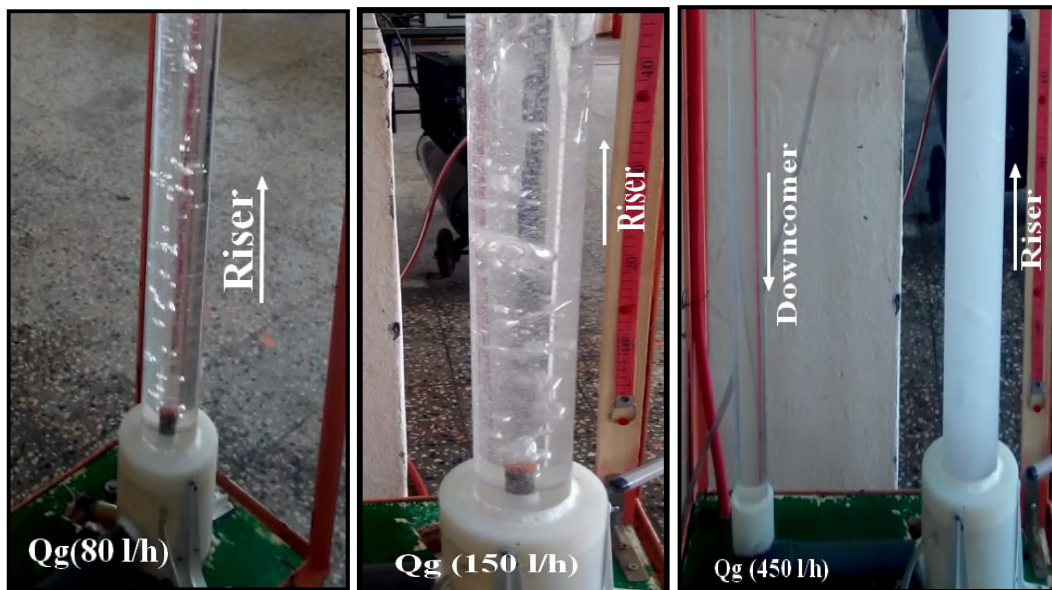


Figure III.13 visualisation des régimes d'écoulement pour la glycérine (80%)

### III.3 Mesure de la vitesse de la phase liquide

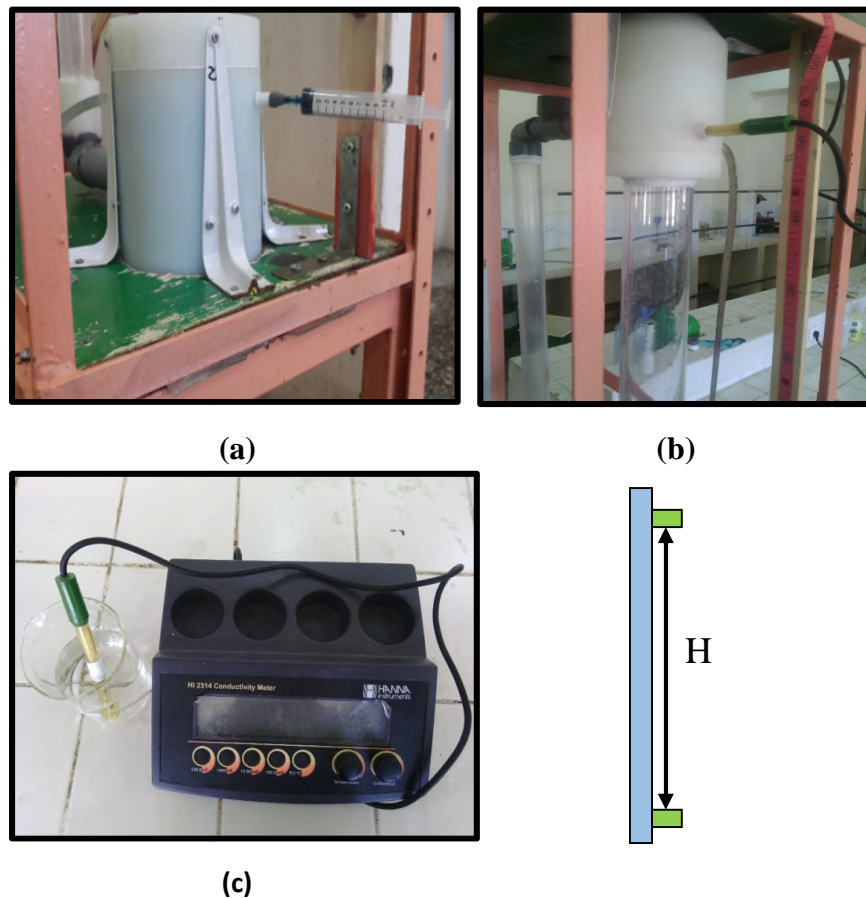
Dans cette partie nous avons tenté de mesurer la vitesse de la phase liquide dans le riser en utilisant différentes deux méthodes, à savoir la méthode de conductimétrie et la méthode des colorants.

### a. Méthode conductimétrique

Cette technique est adoptée en se référant à quelques travaux de la littérature (Bennajah, 2007 ; Vial et al., 2000). Cette technique consiste à placer la sonde du conductimètre dans l'orifice qui se trouve dans le séparateur de phases. La solution de NaCl saturée est injectée avec une seringue de 5 ml au bas de la colonne, précisément dans un orifice situé sur le côté latéral de la section de base. Au même instant de l'injection, on déclenche le chronomètre et mesure le temps nécessaire pour que le conductimètre enregistre une valeur. Le temps mesuré correspond au temps mis par le traceur pour aller du point injection au point où l'on a placé la sonde. La distance qui sépare les deux points est de 1,5 m. Donc la vitesse de la phase liquide est donnée par le rapport de la distance qui sépare les deux points ( $H_l$ ) au temps mis pour parcourir cette distance (voir figure III.14)

$$U_{Lr} = \frac{H_l}{t} \quad \text{III.1}$$

Avec,  $H$  est la hauteur qui sépare le disperseur et le point d'injection en (m), et  $t$  est le temps de passage du traceur en (s).

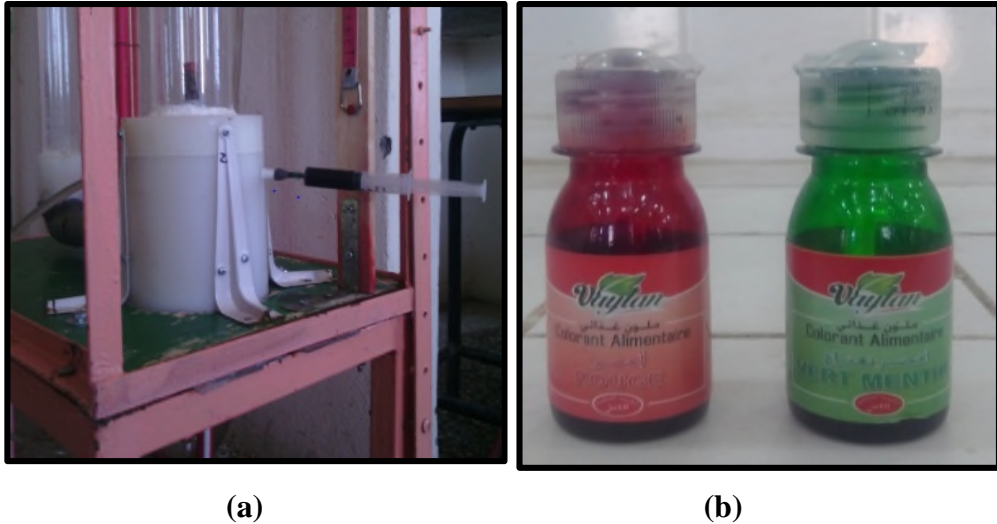


**Figure III.14** : Injection du sel (a); Sonde (b); Conductimètre (c).

Pour la présente technique, les temps enregistrés sont presque identiques pour tous les débits d'air utilisés. Ceci laisse entendre que la vitesse de la phase liquide reste constante ce qui ne peut être le cas. Pour des raisons que nous n'avons pas encore élucidées nous avons préféré ne pas les exploiter et par conséquent nous avons omis de les présenter dans ce manuscrit.

### b. Méthode de colorant

Avec cette technique nous avons utilisé des colorants alimentaires liquides comme traceurs en vue de suivre le trajet du soluté le long d'une distance bien choisie avec une vidéo chronométrée. Pour cela nous avons utilisé une seringue pour injection comme la figure III.15 le montre, et un enregistreur vidéo pour prendre des séquences.



**Figure III.15** : Injection du colorant (a); Colorants alimentaires utilisés (b)

Au préalable nous avons mélangé le colorant avec une quantité d'eau de sorte à ce qu'il acquière les mêmes propriétés que la phase liquide tout en restant concentré. La procédure consiste à injecter d'une façon instantanée le colorant et le laisser se propager jusqu'à ce qu'il arrive à la surface libre du mélange diphasique, on note le temps et on mesure l'expansion du disperseur jusqu'à la surface libre, ensuite on calcule la vitesse par la formule (III.2). Cette procédure est reprise pour chaque débit d'air en allant d'un pas de (200 l/h). Le réacteur est vidé pour chaque expérience

$$U_{lr} = \frac{H_l}{t} \quad \text{III.2}$$

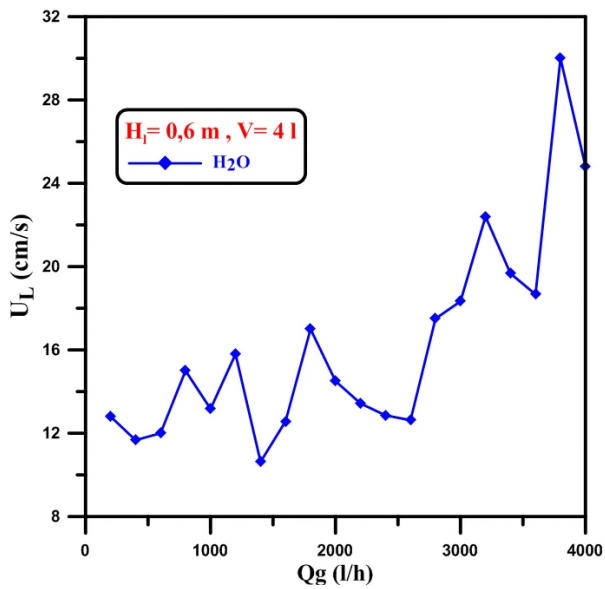
Avec,  $H_l$  est la hauteur qui sépare le disperseur et l'injection en (m), et  $t$  est le temps de passage du traceur en (s).

Ce type de colorants est utilisé pour les raisons suivantes :

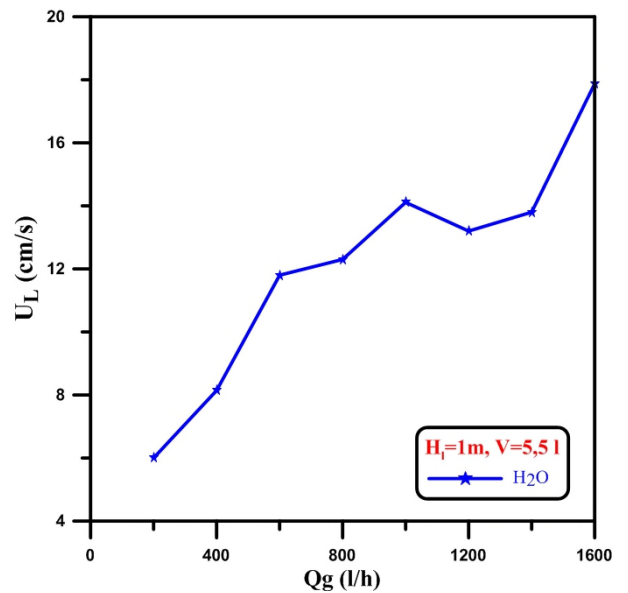
- Sa disponibilité
- Manipulations pratique sans risque (facile à nettoyer, non toxique)
- Visualisation de l'écoulement avec la couleur choisie tout en gardant l'aspect de la transparence.
- Sa miscibilité avec les fluides utilisés.

L'inconvénient de cette méthode réside dans la difficulté de la détection de la couleur. Par exemple la couleur verte foncée vire à plusieurs nuances de vert durant le trajet.

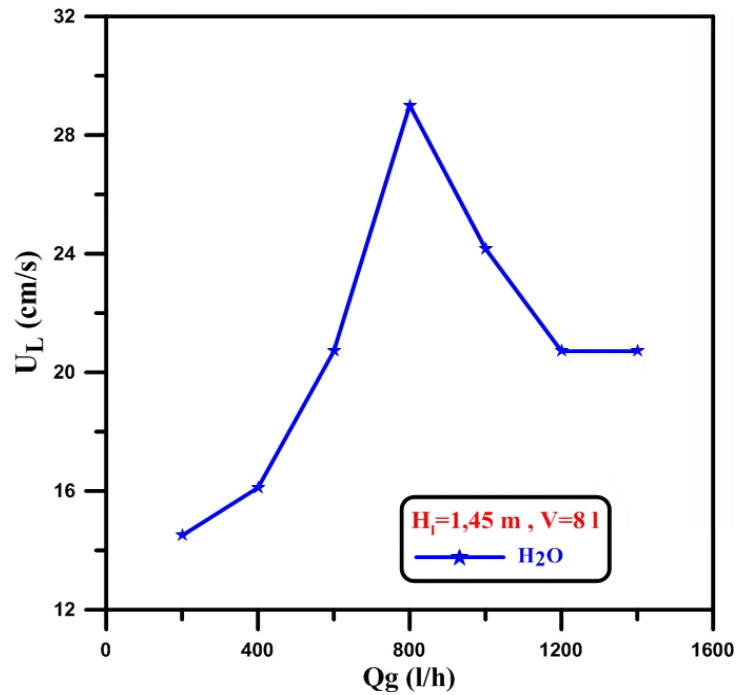
Les résultats obtenus par cette technique en utilisant l'eau sont présentés dans les figures III.16, 17,18.



**Figure III.16 :** Evolution de la vitesse d'eau en fonction du débit d'air pour  $H_1=1\text{m}$



**Figure III.17 :** Evolution de la vitesse d'eau en fonction du débit d'air pour  $H_1=1\text{m}$



**Figure III.18 :** Evolution de la vitesse d'eau en fonction du débit d'air pour le volume plein

Les trois figures montrent que la vitesse de la phase liquide augmente avec le débit d'air. Cette allure a été déjà présentée dans beaucoup travaux de la littérature. Néanmoins l'évolution de cette vitesse semble être fluctuante.

Pour les autres fluides (CMC, Glycérine), on n'a pas pu mesurer les vitesses pour chaque débit d'air pour des raisons de disponibilité du produit. Il aurait fallu vider le réacteur à chaque fois (pour chaque débit) pour renouveler le colorant. Pour cette raison nous avons pensé à fixer la hauteur du liquide ( $H_l=1\text{m}$ ) et le débit d'air ( $Q=500\text{l/h}$ ) et calculer une seule vitesse pour chaque fluide, les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

**Tableau III.2 :** Tableau récapitulatif des vitesses de chaque fluide pour le même débit.

Fluide utilisé	Eau (H <sub>2</sub> O)	CMC à 20g/l	CMC à 5g/l	Glycérine à 80%
Vitesse U (cm/s)	7,7	7	7,9	6,2

### III.4 Mesure du taux de vide global

Pour la mesure de ce paramètre nous avons opté pour la technique d'expansion de volume qui consiste à mesurer la hauteur du liquide au repos ( $H_l$ ) et celle du mélange diphasique après expansion ( $H_m$ ). Le taux de vide est déterminé en calculant d'abord la fraction de la phase liquide ensuite, cette dernière est soustraite de l'unité pour obtenir la fraction de la phase gazeuse qui est le taux de vide recherché comme l'indique l'expression (III.3)

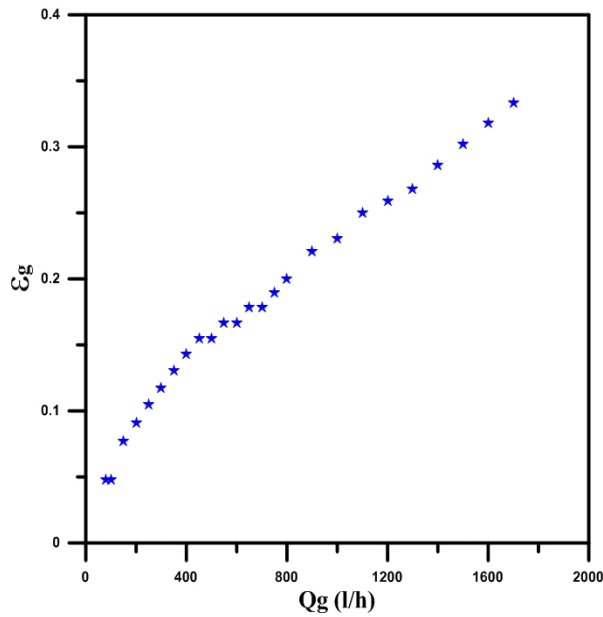
$$\varepsilon = 1 - \frac{H_l}{H_m} \quad \text{III.3}$$

Dans cette partie nous avons mesuré le taux de vide pour les différents fluides, à savoir l'eau du robinet, la solution de la CMC (5, 10 et 20 g/l) et la solution de la glycérine diluée à 80 %. Les mesures ont été effectuées à différentes hauteurs du réacteur soit un remplissage à  $H_l=0,6$  ; 1 et 1,2 m.

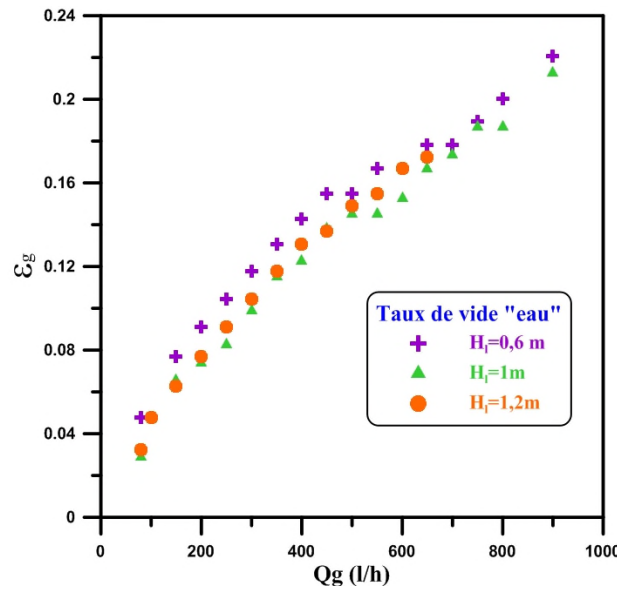
#### a. Phase liquide eau

Pour la phase liquide eau, les résultats de la mesure du taux de vide sont représentés sur les figures (III.19 ; III.20). La figure (III.19) Montre l'évolution de ce paramètre en fonction du débit d'air pour le réacteur rempli à 0,6 m. L'allure du taux de vide est similaire à celles obtenues dans la littérature concernant les réacteurs airlift à boucle à externe (Vial et al. 2000-2005, Akita et al. 1988). Pour Vial et al. (2000) dont les expériences sont réalisées dans un réacteur à boucle externe avec un rapport de diamètres riser/downcomer égal à 1,66 l'ordre de grandeur est presque identique (de 0 à 0,3). On constate que l'évolution est beaucoup plus linéaire pour un fonctionnement avec un régime à bulles. La linéarité se perd peu à peu notamment avec le régime hétérogène. A un débit égal environ à 400 l/h nous remarquons une inflexion sur la courbe, il semble que cette inflexion est due à une transition vers le turbulent baratté. Nous rappelons qu'avec la phase liquide eau le régime à poches n'a pas été observé.

En vue d'examiner l'effet de la hauteur de remplissage, nous avons reproduit les mêmes mesures sur deux autres volumes différents qui correspondent à un remplissage de 1m et 1,2 m que nous l'avons mentionné ci-haut. Les résultats de ces deux volumes sont portés sur la figure (III.20).



**Figure III.19** : Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour l'eau  $H_1=0,6m$



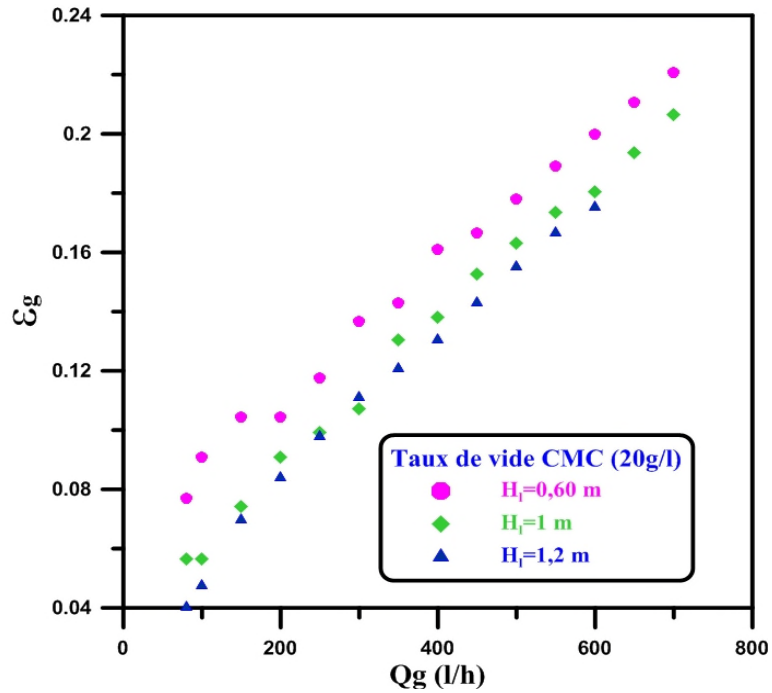
**Figure III.20** : Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour l'eau à différentes hauteurs

L'allure de l'évolution du taux de vide est similaire pour les trois volumes, Ce résultat est similaire à celui trouvé par Sasaki et al.,(2016) qui ont étudié expérimentalement le taux de vide dans une colonne à bulles. Ces auteurs ont déterminé le taux de vide par l'enregistrement des vidéos avec des caméras ultra-rapide.

Nous remarquons que la phase du régime à bulle est caractérisée par un aspect linéaire. Les trois courbes présentent de même façon des points d'inflexion. Toutefois la figure (III.20) montre que le point d'inflexion du volume le plus faible ( $H_1=0,6 m$ ) se produit à un débit d'air inférieur par rapport aux autres. Ceci signifie que la transition à ce volume se produit plus tôt que les deux autres volumes supérieurs. En termes de valeur, la même figure montre que le taux de vide obtenu avec le volume (0,6 m) est légèrement supérieur.

### b. Phase liquide CMC (20g/l)

Pour cette phase liquide nous avons suivi la même procédure précédente, nous avons mesuré le taux de vide à différentes hauteurs et les résultats sont présentés sur la figure III.21

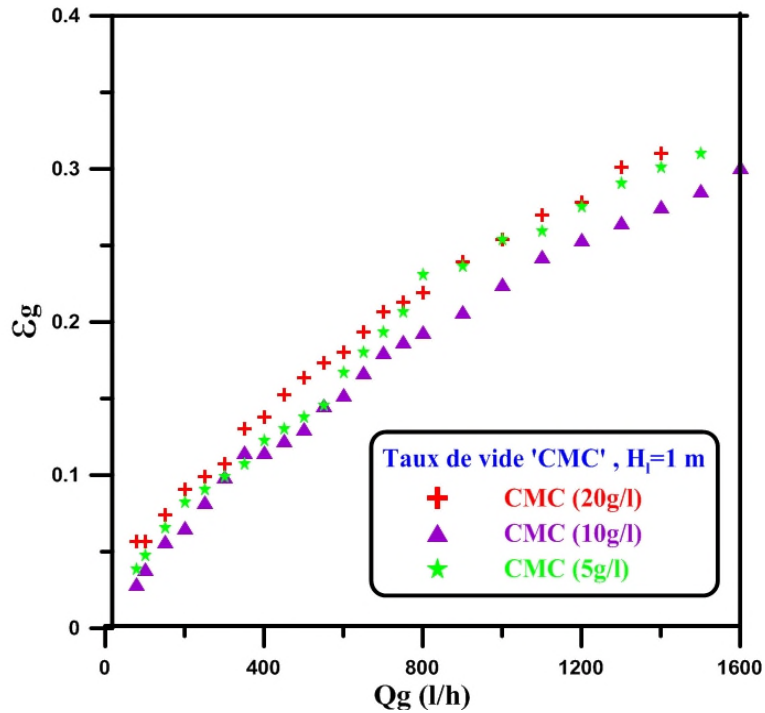


**Figure III.21 :** Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour la CMC à (20g/l) à différentes hauteurs

La figure III.21, Représente l'évolution du taux de vide de la CMC à 20g/l en fonction du débit d'air à différentes hauteurs. Dans cette figure on constate que le taux de vide augmente avec l'augmentation du débit d'air. Cette évolution suit la même allure pour les différentes hauteurs, pour les hauteurs ( $H_1=0.6m$  et  $H_1=1m$ ). L'aspect d'évolution est linéaire sur toute la gamme du débit étudiée. Ceci peut être expliqué par le fait que le régime turbulent baratté n'a pas été observé dans le cas de cette phase liquide visqueuse de comportement rhéologique différent (fluide non-newtonien). En terme de valeur, pour les trois concentrations, les chiffres sont presque identiques.

Pour estimer l'influence de la concentration de la phase liquide sur la mesure du taux de vide dans le cas de la CMC, nous avons effectué les mesures du taux de vide pour les concentrations de 5 et 10g/l. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III.22.



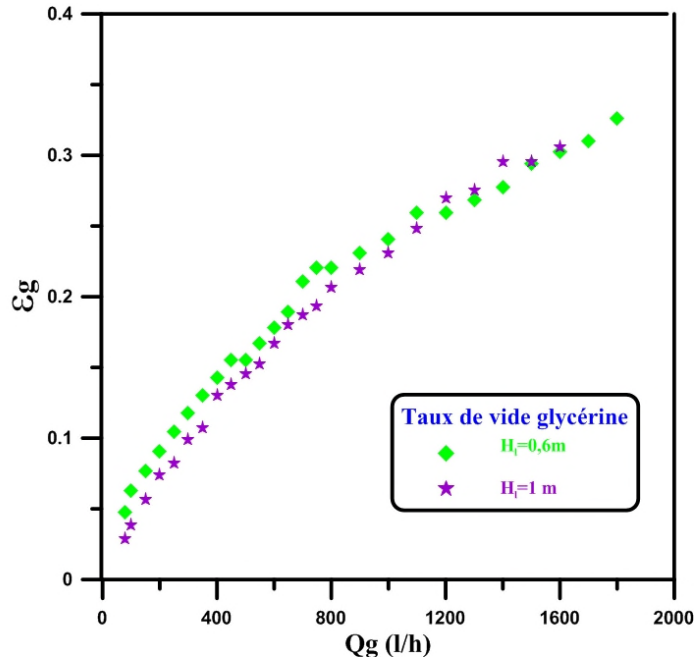


**Figure III. 22:** Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour la CMC à différentes concentrations

On remarque toujours que le taux de vide augmente avec l'augmentation du débit d'air, l'évolution s'effectue en suivant presque la même allure. On remarque aussi qu'il y'a une légère différence entre les différentes concentrations. En terme de valeur le taux de vide correspondant à la solution 20g/l est légèrement supérieure. Ceci serait dû à l'effet de la viscosité de la phase liquide qui se caractérise par une forte coalescence. Ce constat est similaire à ce lui retrouvé dans la littérature.

### c. Phase liquide glycérine (80%)

Pour la phase liquide de solution de la glycérine, le taux de vide a été mesuré avec deux volumes ( $H_1=0,6m$  et  $H_1=1m$ ) en raison de disponibilité du fluide, les résultats obtenus sont représenté dans la figure III.23.

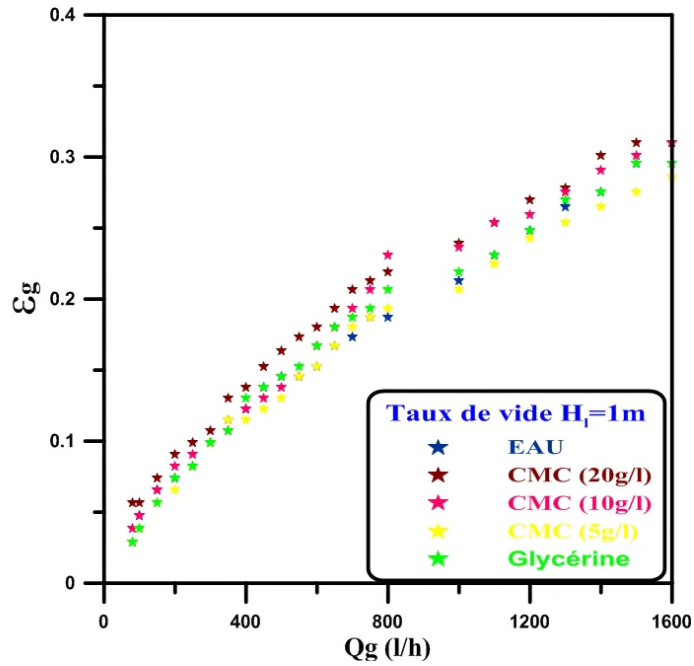


**Figure III.23 :** Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour la glycérine à différentes hauteurs

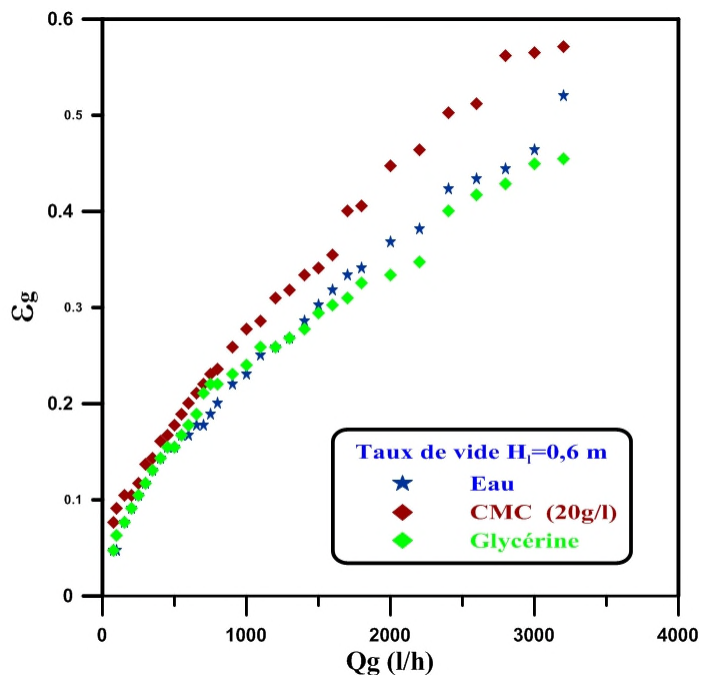
La figure III.22 représente l'évolution du taux de vide de la solution glycérine en fonction du débit d'air à différentes hauteurs. Dans ce cas le taux de vide évolue de la même manière que la phase liquide eau. La phase qui correspond au régime à bulles est d'aspect linéaire et le point d'inflexion réapparaît légèrement de nouveau. Nous pensons que le point d'inflexion est lié à une transition dont la nature est inconnue puisque la caractérisation n'a pas eu lieu en raison du caractère trouble de la solution provoqué par l'injection du gaz. Avec la solution de la glycérine, Au-delà du débit d'air 500l/h qui correspond au point d'inflexion l'évolution n'est plus linéaire. Le taux de vide continu à évoluer mais d'une façon relativement moins sensible.

#### d. Comparaison entre les trois phases liquides

La comparaison du taux de vides obtenu avec les trois phases liquides (eau, glycérine à 80% et CMC à différentes concentrations (20g/l) pour des volumes différents (0.6m et 1m), est donnée sur les figures (III.24) et (III.25)



**Figure III.24** : Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour tous les fluides utilisés à  $H_1=1\text{ m}$



**Figure III.25** : Evolution du taux de vide en fonction du débit d'air pour tous les fluides utilisés à  $H_1=0,6\text{ m}$

L'évolution de ce paramètre pour les différents fluides suit la même allure avec une légère différence pour le cas de la CMC (20g/l) qui paraît être légèrement supérieur notamment pour le réacteur ( $H_1=1\text{ m}$ ). Avec un volume ( $H_1=0,6\text{ m}$ ) la figure (III.25) montre une évolution similaire dans le cas du régime à bulles. A de grand débit le taux de vide correspondant à la CMC (20g/l) se caractérise par un décalage significatif.

Notons que pour cette concentration à de grand débits d'air, le régime d'écoulement était semi-annulaire ou annulaire ce qui explique l'augmentation du taux de vide dans cette gamme.

---

# Conclusion

---

L'objectif assigné dans la présente étude était de concevoir et de réaliser un réacteur airlift à boucle externe à l'échelle du laboratoire et de procéder à sa caractérisation hydrodynamique.

Au terme de l'ensemble des travaux réalisés nous tirons les conclusions suivantes :

- Le réacteur conçu est réalisé avec succès. La batterie de tests subie révèle qu'il peut servir comme un dispositif pilote pour les différentes tâches de recherches du domaine.
- La caractérisation hydrodynamique réalisée consiste en la caractérisation des régimes, la mesure du taux de vide, la mesure de la vitesse de la phase liquide et le gradient de pression. La mesure de ces paramètres et leurs analyses ont permis de retenir les points suivants :
- Pour la phase liquide eau le régime à poches n'a pas été observé. L'écoulement est passé du régime à bulles au régime turbulent baratté.
- Pour la solution de la CMC (20 g/l) le régime turbulent baratté n'a pas été observé. En revanche, un régime semi-annulaire et annulaire ont été bien visibles pour des débits relativement grands. Un régime à bulles particulier et un régime à poches symétrique et sans sillage est visualisé pour des débits relativement faibles.
- Pour les solutions CMC (5 et 10g/l) les régimes obtenus sont nettement différents de ceux obtenus avec la solution (20g/l). En effet un régime à bulles similaire à celui de la phase liquide eau et solution de la glycérine est visualisé. La structure de l'écoulement est influencée par la concentration de la CMC qui détermine le comportement rhéologique.
- Pour la phase liquide glycérine (80%), les deux régimes observés sont le régime à bulles hétérogène et un régime à chapeaux de Taylor. La visualisation s'est avérée impossible à partir d'un certain débit en raison de l'aspect mousseux du mélange diphasique.

- Le taux de vide global obtenu dans la présente étude est caractérisé par une allure similaire à celles rencontrés dans les travaux de littérature notamment pour la phase liquide eau et solution de la glycérine.
- En particulier, pour la phase liquide de la solution CMC (20g /l) l'aspect d'évolution du taux de vide est linéaire.
- La hauteur du liquide dans le réacteur influe négativement sur l'évolution du taux de vide.
- En termes de valeur, le taux de vide de la CMC (20g/l) est le plus important par rapport aux autres phases liquides.
- La technique du colorant utilisée pour la mesure de la vitesse de la phase liquide n'est pas assez concluante malgré l'allure plus ou moins acceptable par rapport à celles présentée dans la littérature.
- La technique conductimétrique utilisée pour la mesure de la vitesse de la phase liquide n'a donné aucun résultat significatif.
- Les deux gradients de pressions mesurés sont d'allure similaire à ceux obtenus dans la littérature.
- En guise de perspectives, il est possible d'améliorer le réacteur réalisé pour l'adapter à d'autres tâches telles que les travaux liés aux bioprocédés et les réactions chimiques.
- Il serait aussi recommandable de le doter d'instruments de mesures sophistiqués pour mieux estimer la vitesse de la phase liquide, le taux de vide, la caractérisation des régimes et beaucoup d'autres paramètres comme le coefficient de transfert de matière le coefficient de la dispersion axiale.

---

## **Références bibliographiques**

---



- Akita, K., Okazaki, T., Koyama, H., 1988. *Gas holdups and friction factors of gas-liquid two*
- Barrut, B., 2011. *Étude et optimisation du fonctionnement d'une colonne airlift à dépression-Application à l'aquaculture. Thèse de doctorat.* Université Montpellier II.
- Bennajah.M., 2007. *Traitement des rejets industriels liquide par électroagulation/électrolocation en réacteur airlift.* Thèse de doctorat en Génie des procédés et de l'environnement. Institut national polytechnique de Toulouse (France).
- Camarasa, E., Vial, Ch., Poncin, S., Wild, G., Midoux, N., Bouillard, J., 1999. *Influence of coalescence behavior of the liquid and of gas sparging on hydrodynamics and bubble characteristics in a bubble column.* Chem. Eng. Process 38, 329–344.
- Clark, N.N., Dabolt, R.J., 1986. *A general design equation for air lift pumps operating in slug flow.* Aiche J. 32, 56-63.
- Chisti, M. Y., Halard, B. M. Moo-Young.1988. *Liquid circulation in airlift reactors.* Chem. Eng. Sci. 43, 451-457.
- Chisti, M.Y., 1989. *Airlift Bioreactors.* Elsevier Applied Science, London and New York.
- Chisti, Y.Moo-Yong, M., 1993. *Improve the performance of airlift reactors.* Chem. Eng. Progress 89, 38-45.
- Chisti, Y., Wenge, F., Moo-Yong, M.,1995. *Relationship between riser and downcomer gas hold-up in internal loop airlift reactors without gas-liquid separators.*The chem..Eng. J. 57, B7-B13.
- De Cachard, F., Delhay, J.M., 1996. *A slug-churn flow model for small diameter air lift pumps.* Int. J. Multiphase Flow 22, 627–649.
- Gourich, B., 2006. *Analyse et étude comparative des performances hydrodynamiques et de transfert gaz-liquide dans trois types de réacteurs polyphasiques : colonne à bulles, airlift rectangulaire et emulsair.* Thèse de Doctorat d'Etat. Université Mohammed V-Agdal.
- 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.
- Hikita H., Kikukawa, H., 1973. *Gas hold-up in bubble columns.* Bull. Univ. Osaka Prefect., Ser. A., 22 151.
- Hikita,H., Asai ,S., Tanigawa,K., Segawa, K., Kitao, M. 1980. *Gas Hold-Up in Bubble Columns.* Chem. Eng. J. 20, 59-67.

- Hills, J. H., 1976. *The operation of a bubble column at high throughputs. I. Gas hold-up measurements.* Chem. Eng. J. 12, 89-99.
- Hsu, Y.C., Dudukvic, M.P., 1980. *Gas hold up an liquid recirculation in gas-lift reactor.* Chem. Eng. Sc. 35, 135-141.
- 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.
- Kechroud, N., 2012. *Caractérisation du comportement dynamique de la phase continue d'un lit fluidise liquide – solide par anémométrie laser et analyse temps – fréquence.* Thèse de doctorat en sciences. Université Abderrahmane Mira de Béjaia.
- 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.
- Monmarson, B., 2015. *Simulation en présence d'incertitude d'un gazosiphon de grande échelle. Application à l'optimisation d'un nouveau système géothermique urbain.* Thèse de doctotrat, Université Grenoble Alpes.
- Nicklin, D.J., 1963. *The air-lift pump theory and optimization.* Int. Chem. Eng. 4, 29-39.
- Pochet, S., 2012. *Développement d'un système pour la mesure du taux de vide dans un écoulement diphasique par une méthode utilisant des micro-ondes.* Mémoire de maitrise en Sciences Appliquées. Université de Montréal.
- Snape, J.B., Fialovaz, M., Zahradnik., J., Thomas, N.H., 1992. *Hydrodynamic studies in an external loop airlift reactor containing aqueous electrolyte and sugar solution.* Chem. Eng. Sci. 47, 3387-3394.
- Sasaki, S., Hayashi,K., Tomiyama A., (2016) *Effects of liquid height on gas holdup in air–water bubble column.* Experimental Thermal and Fluid Science. Vol 72 67–74.
- 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., 2016. *Contribution à l'étude expérimentale de la structure d'un écoulement diphasique de type airlift.* Thèse de doctorat en science. Université Abderrahmane Mira de Béjaia.
- Utiger.M., 1998. *Etude de l'hydrodynamique locale d'un réacteur airlift à boucle externe par Anémométrie à film chaud.* Thèse de maîtrise en science appliquée. Ecole Polytechnique de Montréal (Canada).
- Vial C., Camarasa E., Poncin, S., Midoux, N., Wild G., 2000. *Study of the hydrodynamic behavior in bubble columns and external loop air-lift reactors through analysis of pressure fluctuations.* Chem. Eng. Sci. 55, 2957-2973.

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

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

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

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

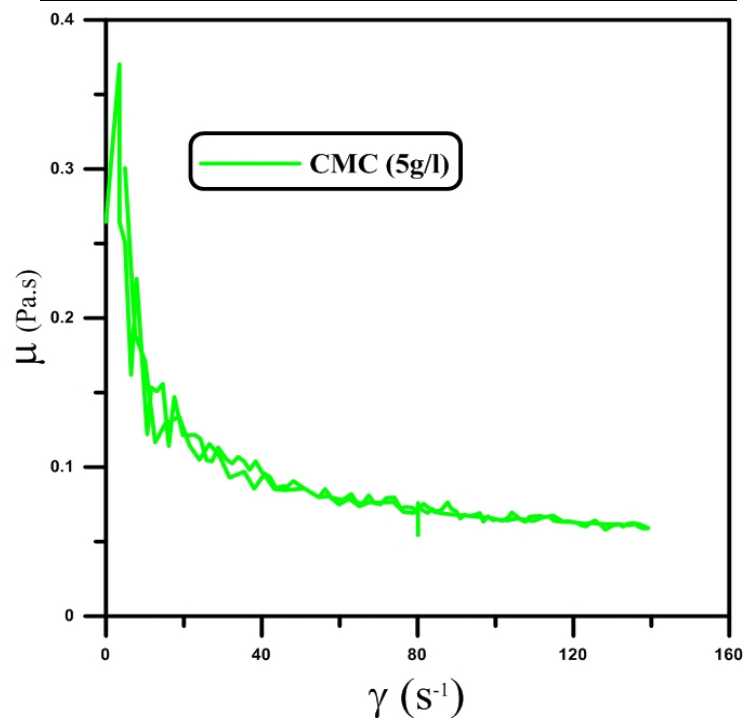
Zuber, N., Findlay, J. A., 1965. *Average volumetric concentration in two-phase flow systems*. J. Heat Transfer Transactions of the ASME 87, 453–468.

---

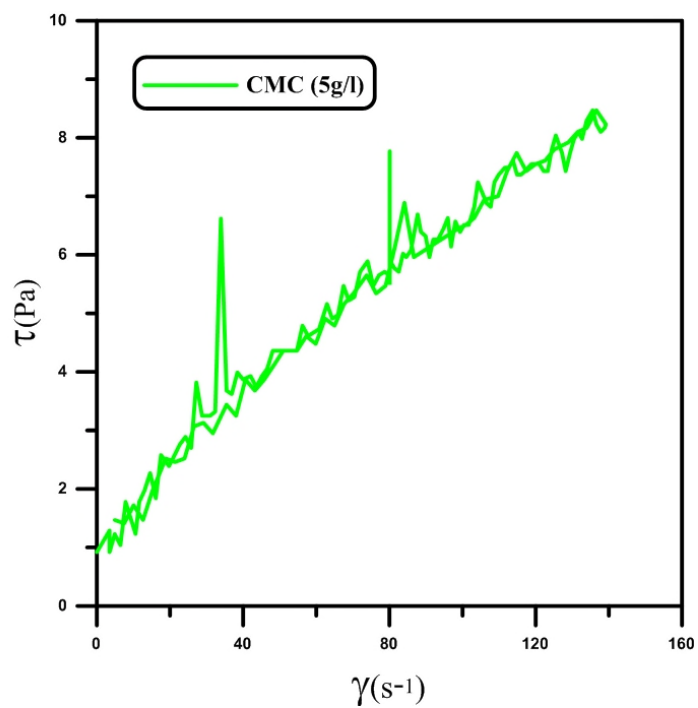
# **Annexes**

---

# Annexe (A)

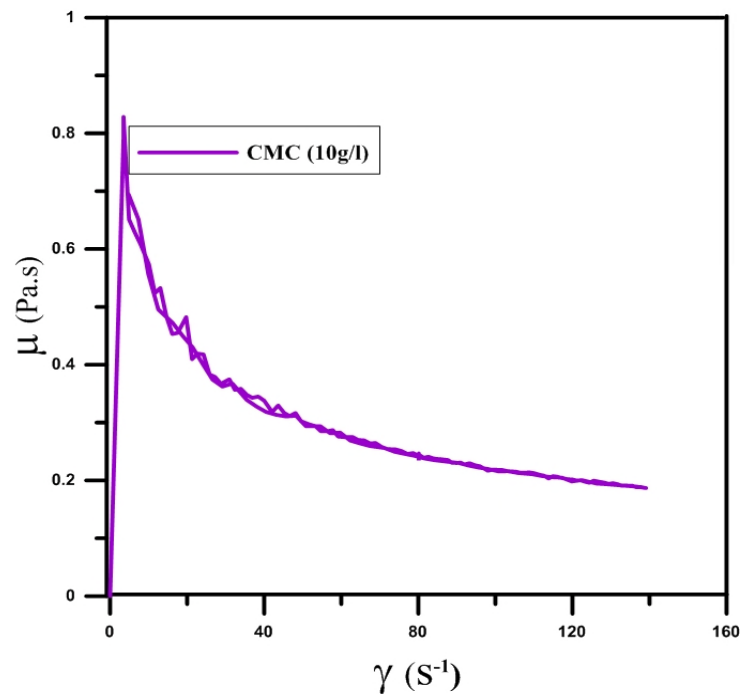


**Figure 1** : variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement CMC 5g/l

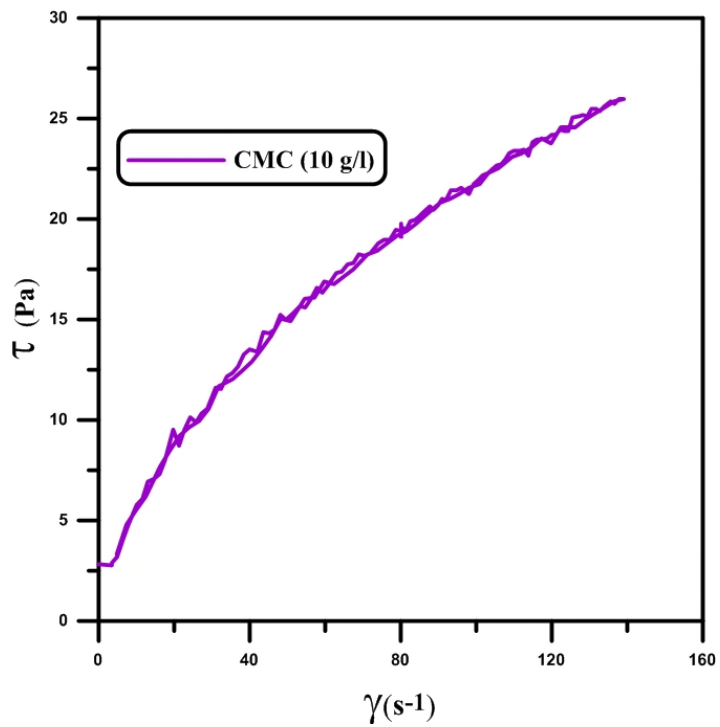


**Figure 2** : variation du taux de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (CMC 5g/l)

# Annexe (B)

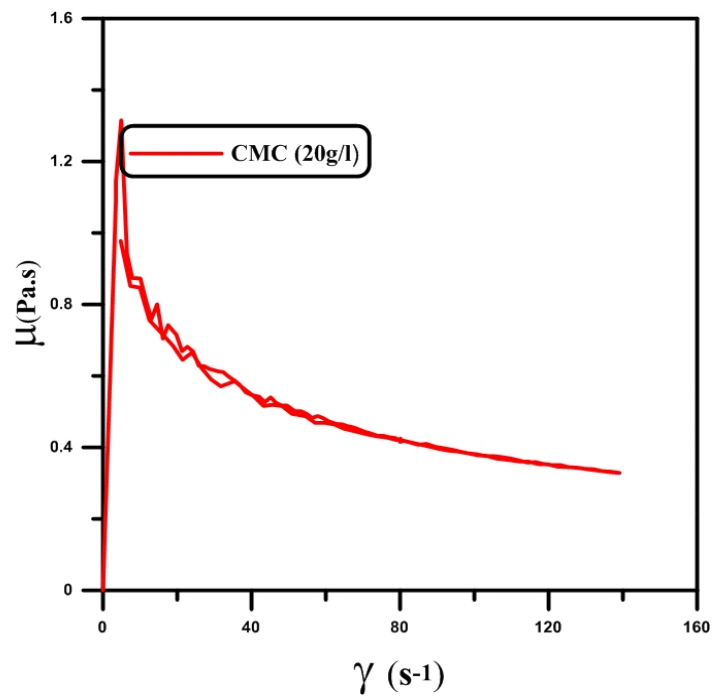


**Figure 1 :** variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement (CMC 10g/l)

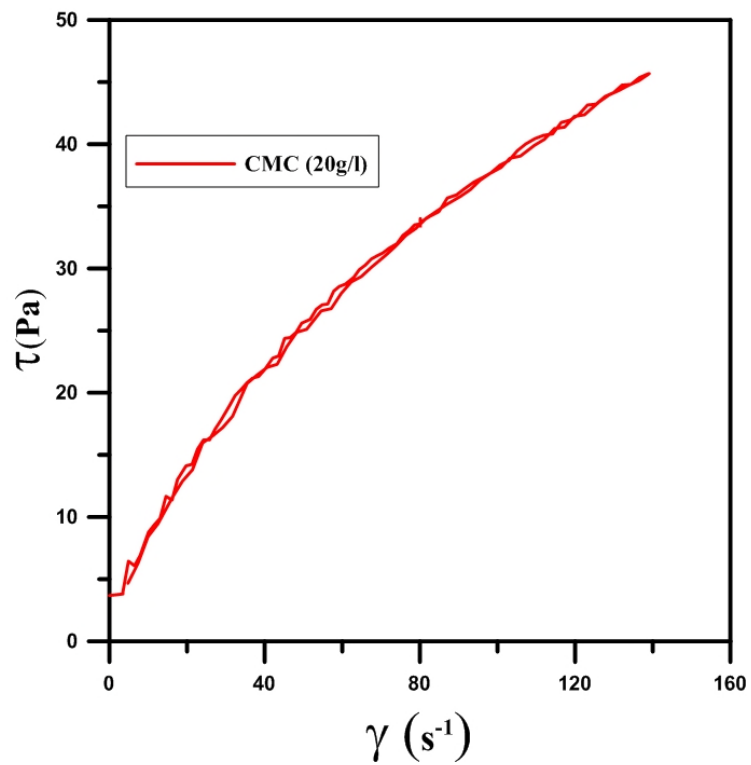


**Figure 2 :** variation du taux de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (CMC 10g/l)

# Annexe (c)



**Figure 1 :** variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement CMC 20g/l



**Figure 2 :** variation du taux de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (CMC 20g/l)

**Résumé :** Les réacteurs airlifts, sont des dispositifs de simple construction utilisant comme énergie de l'air comprimé. Ils contiennent deux zones principales : le riser où se crée le mélange diphasique qui circule d'une manière ascendante et le downcomer qui est le siège d'une recirculation descendante. Ces réacteurs peuvent être rencontrés dans plusieurs domaines tel que les bioprocédés (aération, culture de micro-organisme....etc.), les industries chimique (hydrogénation, oxydation....etc.). Dans le présent travail nous avons conçu et réalisé un réacteur airlift à boucle externe. La hauteur du réacteur est d'environ 150 cm. Les diamètres du riser et du downcomer sont respectivement 64 et 33 mm et ces deux parties sont séparées par deux jonctions horizontales (20cm). Le réacteur a été mis en fonctionnement et a fait l'objet d'une caractérisation hydrodynamique. Au cours des tests, diverses phases fluides ont été utilisées. Le présent réacteur peut être considéré comme un dispositif qui peut servir pour diverses tâches de recherches voire pédagogiques.

**Mots-clé :** Réacteur airlift, Boucle externe, boucle interne, Régimes d'écoulement. Ecoulement diphasiques.

**Abstract :** Airlift reactors are simple construction devices using compressed air energy. They contain two main zones: the riser where the diphasic mixture that circulates in an ascending manner is created and the downcomer which is the seat of a descending recirculation. These reactors can be encountered in several fields such as bioprocesses (aeration, culture of microorganisms, etc.), chemical industries (hydrogenation, oxidation, etc.). In the present work we designed and built an external loop reactor. The height of the reactor is approximately 150 cm. The riser and downcomer diameters are respectively 64 and 33 mm and these two parts are separated by two horizontal junctions (20 cm). The reactor was operated and hydrodynamically characterized. During the tests, various fluid phases were used. The present reactor can be considered as a device which can be used for various research or even educational tasks.

**Keywords:** Airlift reactors, External loop, Internal loop, Flow regimes, Two phases flow.