

ETUDE HYDRODYNAMIQUE D'UNE COLONNE A BULLES 2D EN PRESENCE D'ADDITIFS FAIBLEMENT CONCENTRES

C. JULCOUR LEBIGUE (1), P. SA GOMES (1), F. OMOTA (2), A. BLIEK (2), H. DELMAS (1)

(1) Laboratoire de Génie Chimique, Toulouse, France.

Carine.Julcour@ensiacet.fr

pedro.sa.gomes@fe.up.pt

Henri.Delmas@ensiacet.fr

(2) University of Amsterdam, Pays-Bas.

fomota@science.uva.nl, florin.omota@fluor.com

A.Bliek@tn.utwente.nl

Résumé

Un traitement d'images, issues de cinématographie rapide en colonne 2D, donne la distribution de taille de bulles d'air dans l'eau pure ou additivée. La technique, basée sur l'analyse de nombreuses bulles, nécessitant leur identification et leur suivi en cas de rupture ou coalescence, est tout d'abord décrite puis utilisée pour préciser l'influence d'ajout de silice et/ou de sulfate de sodium dans de l'eau pure. Le peu d'effet observé sur la rétention gazeuse lors d'addition de silice résulte de la compensation de l'augmentation du diamètre des bulles par la réduction d'aire interfaciale. Au contraire, l'ajout de sel augmente fortement la rétention gazeuse. Enfin la silice assez concentrée annule cet effet inhibiteur de coalescence. L'outil de traitement d'images donne accès à des données statistiques originales de rupture et coalescence.

Mots-clés : traitement d'images, coalescence, colonne à bulles, rétention gazeuse, mesures hydrodynamiques, suspension

1. INTRODUCTION

En colonnes à bulles appliquées au traitement des eaux la complexité de l'hydrodynamique et des transferts est accrue par la présence de contaminants (sels, tensio-actifs, ou traces d'organiques) et de matières en suspension ... Cette étude a pour objectif de mieux connaître le rôle de la physico-chimie, modifiée par des additifs liquides ou solides, sur l'hydrodynamique des colonnes à bulles.

Deux exemples d'additifs ont été choisis pour ce travail :

- un soluté modèle, inhibiteur de coalescence : Na_2SO_4 ,

- une phase dispersée, promoteur de coalescence : une silice - support classique de catalyseur - finement divisée ($4 \mu\text{m}$) et concentrée entre 5 et 15 g/l.

La présence de la phase solide rend difficile l'utilisation de sondes optiques ou résistives et de techniques laser pour caractériser l'écoulement à bulles, surtout aux fortes concentrations [1].

La technique photographique présente l'avantage de ne pas être intrusive et de pouvoir fournir un grand nombre d'informations locales concernant la distribution de tailles de bulles, leur vitesse d'ascension, l'aire interfaciale gaz-liquide, et même les occurrences de rupture – coalescence ([2, 3]).

Son désavantage majeur réside dans le fait qu'elle reste réservée aux très faibles rétentions de gaz ou à des installations 2D dans lesquelles les bulles sont fortement confinées, rendant difficile l'extrapolation aux colonnes industrielles. Néanmoins, il semble peu probable que les effets d'additifs varient significativement d'une géométrie à l'autre, aussi la richesse de l'information apportée par caméra rapide et analyse d'images a conduit à retenir une géométrie 2D.

La difficulté principale est de bien détecter et différencier les bulles pour les systèmes diphasiques ou faiblement chargés en silice, surtout lorsque la rétention gazeuse est élevée. L'ajout de colorant, souvent utilisé pour améliorer le contraste entre le liquide et les bulles, n'a pas été retenu ici, son absence d'effet interfacial n'étant pas prouvée. Malgré le soin tout particulier porté à l'éclairage et au choix de l'optique, le traitement d'images s'avère donc assez délicat. Selon les concentrations en solide, divers traitements sont utilisés, manuels ou automatisés, pour binariser les images de bulles, de façon à calculer ensuite leurs propriétés.

En plus des résultats attendus sur le couplage hydrodynamique/physicochimie ce travail développe donc plus particulièrement les procédures de traitement d'images et calculs pour en quantifier les effets.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PROTOCOLE OPERATOIRE

2.1 Installation

La colonne 2D est constituée de 2 plaques de Perspex de 2 m de hauteur et 0,3 m de largeur, distantes de 5 mm. Les mesures sont réalisées à température et pression ambiantes.

Le distributeur de gaz comporte 29 aiguilles de 0,2 mm de diamètre séparées de 1 cm les unes des autres pour obtenir une distribution homogène en pied de colonne. Le débit de gaz (air sec) est mesuré par un débitmètre massique. Les vitesses de gaz étudiées varient entre 0,01 et 0,05 m/s.

La colonne est remplie par 2 litres d'eau bidistillée, de solution électrolytique (Na_2SO_4 0,01M) ou de suspensions de silice (5 et 15 g/l dans l'eau ou la solution électrolytique).

Les propriétés de la silice utilisée sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés de la silice

Nom commercial	Nature du solide	D[4,3] (μm)	Surface spécifique (m^2/g)	V_{poreux} (cm^3/g)	Densité de particule (sèche) ρ_{PG} (kg/m^3)
Sipernat 320 DS (Degussa)	Silice hydrophile	4	178	0,61	1082

Pour assurer à la fois un éclairage d'intensité élevée (du fait de l'utilisation d'une caméra rapide) et une image de fond bien homogène, 6 lampes halogènes de 500W chacune sont disposées de part et d'autre, le long de la colonne.

2.2 Métrologie

Les images de bulles sont filmées par une caméra Fastcam Ultima 40K dans une fenêtre de 20 par 20 cm située au centre de la colonne (pour que l'hydrodynamique soit bien établie). Les prises de vue ont une résolution de 256×256 pixels, et la vitesse d'acquisition est de 4500 images par secondes. Ces images sont enregistrées dans une mémoire tampon ne permettant que de stocker 1.82s de film. En fait seule 1 image sur 8 est traitée, car du fait de l'assez faible résolution de la caméra le déplacement des bulles d'image en image est difficilement quantifiable au-delà.

5 films différents sont réalisés pour chaque condition opératoire (soit au total 5120 images traitées), de façon à obtenir une bonne convergence des mesures de rétention et de distributions de taille de bulles (cf. § 4.1).

La rétention globale de gaz est également mesurée par la méthode de l'expansion volumique : on mesure la hauteur du liquide non aéré puis la hauteur de dispersion à la vitesse superficielle du gaz donnée. Cette mesure permet de vérifier la qualité du traitement d'images appliqué.

2.3 Protocole opératoire

Les essais préliminaires ont mis en évidence un effet remarquable de Na_2SO_4 à une très faible concentration (0,01 M) : alors que la rétention gazeuse (ε_G) est d'abord proche de celle de l'eau pure, elle augmente et finit par doubler au bout de 5h (figure 1) avec une diminution notable de la taille des bulles (figure 2). Avec l'eau pure, on ne remarque pas une telle évolution au cours du temps, la rétention finale ($\varepsilon_G = 0,11$ pour $U_G = 0,05$ m/s) étant obtenue en moins d'une demi-heure de bullage.

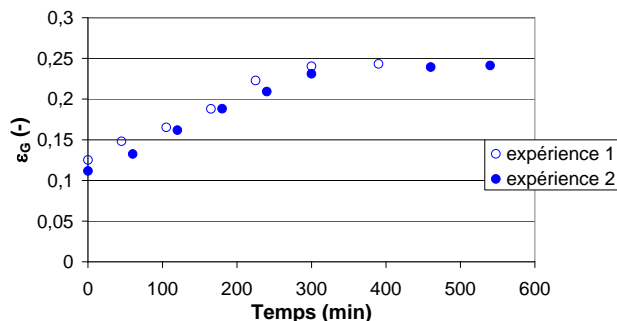


Figure 1 : Evolution de la rétention de gaz globale au cours du temps (air - solution de Na_2SO_4 0,01M, $U_G = 0,05$ m/s).

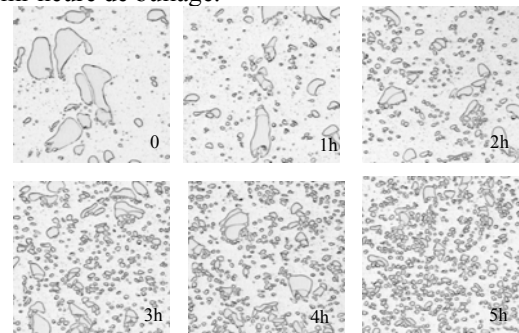


Figure 2 : Evolution de la taille des bulles au cours du temps (air - solution de Na_2SO_4 0,01M, $U_G = 0,05$ m/s).

Si une évolution de la rétention gazeuse a déjà été observée dans le cas de colonnes à bulles semi-batch remplies d'eau du robinet, il s'agissait d'une diminution très progressive de ϵ_G (de 10% environ) due à l'évaporation de composés volatils dissous ([4]).

Par ailleurs la concentration de Na_2SO_4 utilisée est bien inférieure à celle généralement reportée pour provoquer une inhibition de la coalescence (concentration $> 0,05\text{M}$ d'après Zahradnik *et coll.* [5]).

Enfin ce comportement s'est révélé parfaitement reproductible d'une expérience à l'autre (figure 1).

Dans ces conditions, les mesures ont été réalisées après stabilisation du régime de bullage et l'utilisation de tout autre additif, colorant en particulier, a été exclue.

3. TRAITEMENT D'IMAGES ET PROCEDURES DE CALCUL

3.1 Binarisation des images de bulles

Le traitement des images a été réalisé à l'aide de l'Image Processing Toolbox de Matlab.

La première étape du traitement a consisté à synchroniser l'image des bulles à traiter avec l'image de fond correspondante. En effet, la vitesse de prise de vue étant rapide devant la fréquence du courant électrique, on obtient des variations périodiques de luminosité de l'image de fond. On associe donc à chaque image le fond le plus proche en intensité, et on le soustrait de l'image des bulles pour améliorer le contraste entre les bulles - ou le contour des bulles - et le liquide.

Pour les suspensions concentrées (figure 3b), un seuillage automatique a pu être appliqué pour binariser les images, en utilisant la valeur du minimum de l'histogramme (les bulles ayant un niveau de gris bien différent de celui du liquide).

Par contre pour les autres conditions (figure 3a), une procédure de seuillage multiple a été appliquée pour distinguer cette fois le contour des bulles du liquide. Chaque contour fermé correspond à un objet « bulle » qui est rempli en blanc. Ce contour est ensuite soustrait des objets identifiés, de façon à pouvoir après bien séparer les bulles les unes des autres. Si une valeur élevée de seuil est appliquée, des grosses bulles peuvent ne pas être détectées car leur contour ne sera pas complètement fermé. Si au contraire, on utilise une valeur basse, les grosses bulles seront mieux détectées, mais les petites seront fortement érodées car leur contour sera plus épais. Il n'y a donc pas de seuillage optimal, puisqu'il dépend de la taille des bulles. Les images binarisées résultant de ces différents seuillages sont additionnées pour donner une seule image en noir et blanc. Ce traitement est fait image par image, l'opérateur donnant le nombre de seuils appliqués, les valeurs min et max (pouvant être variables selon l'image).

L'image des bulles obtenue est ensuite comparée à l'image initiale en niveau de gris pour corriger éventuellement les paramètres de traitement ou rejeter l'image pour les calculs d'aire interfaciale et rétention liquide (si par exemple un artefact est créé au niveau des bordures) ou pour tous les calculs (+ suivi de bulles).

Du fait de la lourdeur du traitement adopté, seuls certains cas représentatifs sont traités : systèmes eau-air, eau-air-silice (5, 15 g/l), solution électrolytique 0,01M-air-silice (5, 15 g/l) pour 3 vitesses différentes (0,02 ; 0,035 ; 0,05 m/s), soit plus de 75000 images.

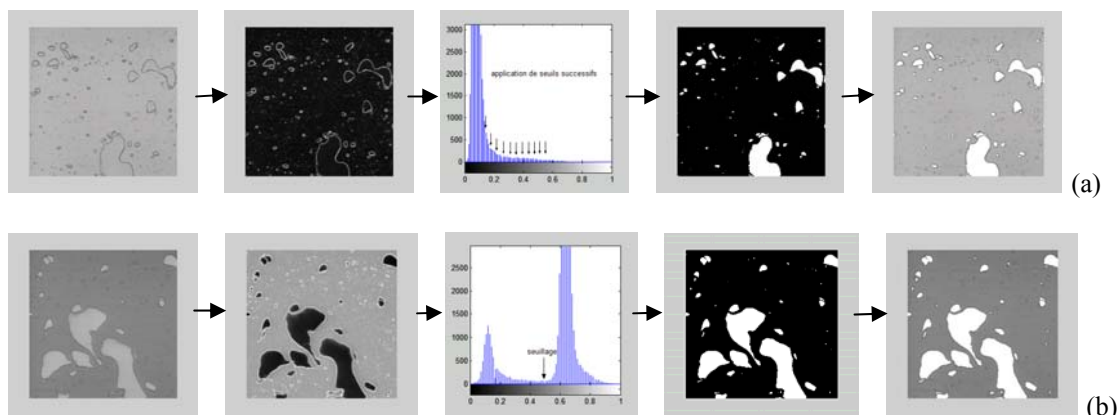


Figure 3 : Traitement d'images pour les systèmes : (a) eau-air, (b) eau-air-silice 15 g/l.

3.2 Suivi des bulles image par image

Chacune des bulles se trouve dans plusieurs images consécutivement et sa vitesse d'ascension détermine le nombre d'images dans lesquelles elle apparaît. Si l'on utilise les propriétés de toutes les bulles dans chaque image pour calculer la distribution de tailles, le résultat sera faussé, puisque les petites bulles

montent moins vite que les grosses et donc leur poids sera plus important dans le calcul. De plus, ce phénomène est amplifié puisque seules les bulles qui apparaissent entièrement dans la fenêtre peuvent être considérées pour le calcul de taille.

C'est pourquoi les bulles sont numérotées et suivies image par image pour n'être comptée qu'une seule fois. La stratégie de suivi est basée sur le déplacement du centre de gravité (d'abord estimé dans l'image suivante en utilisant la relation $U_{bulle} = 0,54\sqrt{gd_{bulle}}$ [3]). Si l'on obtient dans la zone de recherche une bulle dont la taille diffère de moins de 30% de la bulle dans l'image précédente (figure 4a), cette bulle conserve le même numéro. Si la bulle dans la région de recherche a une taille différente de la bulle initiale (du fait d'une rupture ou coalescence), elle est comptée comme une nouvelle bulle (figure 4b). La taille de la région de recherche a été optimisée à $\Delta z = \pm 3$ pixels et $\Delta y = \pm 5$ pixels en représentant le déplacement du centre de gravité de quelques bulles tests et en le comparant aux trajectoires réelles des bulles vues sur le film. Si des bulles se trouvent avoir le même numéro dans une image donnée n, seule la meilleure candidate est conservée et l'autre bulle est recherchée dans l'image (n-1) et à défaut (n-2). Enfin, pour limiter l'effet d'artefacts, on ne considère pour les calculs de distribution de tailles que les bulles étant au moins présentes dans 3 images.

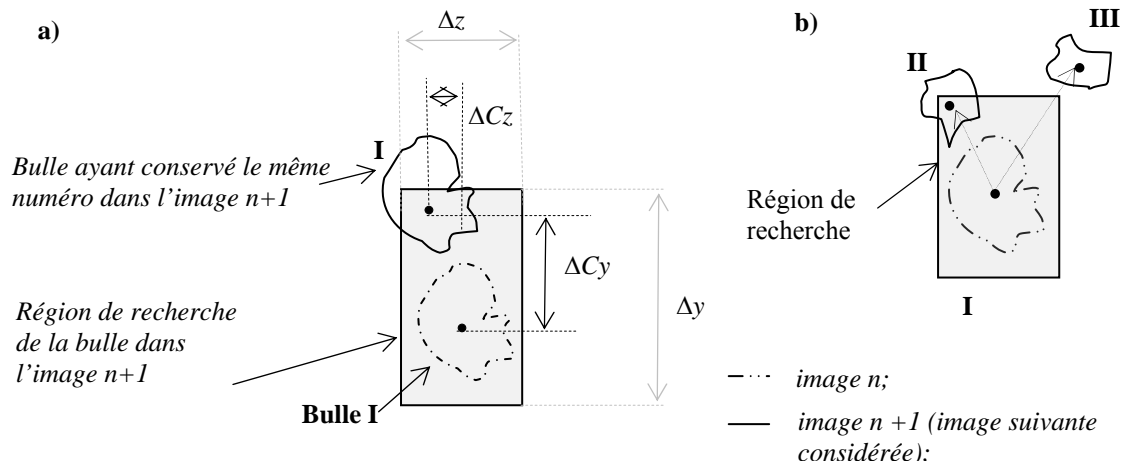


Figure 4 : Principe du suivi des bulles image par image : a) bulle retrouvée dans l'image suivante, b) bulle ayant subi une rupture

3.3 Calculs du volume et de la surface des bulles

Pour quantifier l'aire interfaciale et la rétention gazeuse, deux géométries ont été retenues pour la reconstruction des bulles selon leur taille : sphérique pour les bulles de diamètre équivalent (basé sur l'aire projetée) inférieur à l'épaisseur de la colonne (2a) et forme de révolution pour les bulles plus grosses (figure 5). Cette forme de révolution fait intervenir un angle θ , que l'on peut qualifier de « pseudo-angle de contact » avec les parois de la colonne. Par ailleurs, pour le calcul du volume des

grosses bulles on utilise plutôt le diamètre équivalent basé sur l'aire 2D, $d_{eqA} \left(d_{eqA} = \sqrt{\frac{4A_{2D}}{\pi}} \right)$, tandis

que pour le calcul de la surface (latérale) de la bulle on considère plutôt le diamètre équivalent basé sur le périmètre, $d_{eqP} \left(d_{eqP} = \frac{P_{2D}}{\pi} \right)$.

Représentée dans un plan perpendiculaire aux plaques, la portion de cercle $f(x)$ a pour équation :

$$f(x) = \sqrt{R^2 - x^2} + \frac{d_{eq}}{2} - R \sin(\theta) \quad (1)$$

Le volume et la surface de révolution autour de l'axe (0x) sont alors donnés respectivement par :

$$V = \pi \int_{-a}^a y^2 dx \quad \text{et} \quad S = 2\pi \int_{-a}^a y dS \quad \text{avec} \quad dS = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (2) \& (3)$$

La valeur de θ a été identifiée pour minimiser la différence entre la rétention globale de gaz mesurée par différence de hauteur de liquide et celle calculée dans le cas du système eau-air ($U_G=0,02$ m/s), conduisant à $\theta = \pi/4$. Par ailleurs, la valeur de C obtenue pour $\theta = \pi/4$ ($C=1$ mm) est en bon accord avec

l'épaisseur du contour des bulles estimée sur les images en niveau de gris (1 à 2 pixels, soit 0,78 à 1,56 mm).

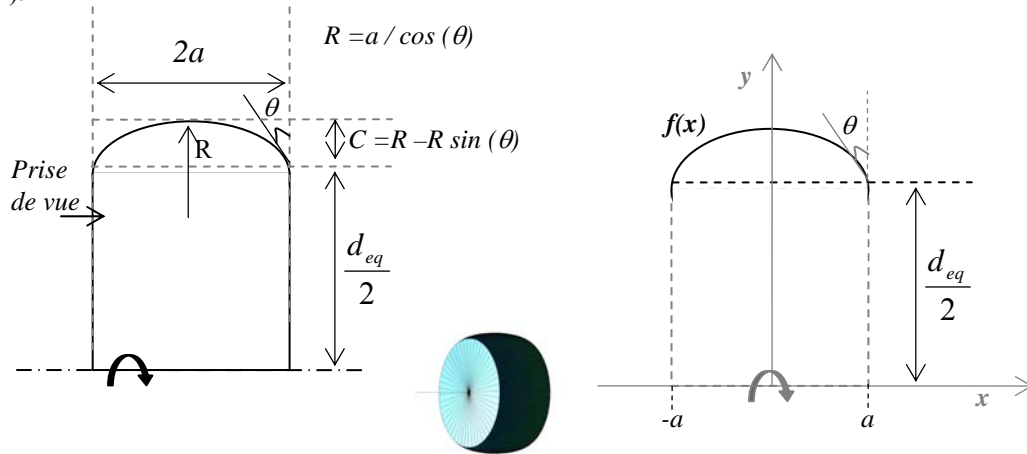


Figure 5 : Représentation géométrique des grosses bulles

3.4 Rupture – coalescence

Pour quantifier les occurrences de rupture – coalescence, on utilise les résultats fournis par le programme de suivi des bulles. On ne s'intéresse d'abord qu'aux bulles ayant apparu ou disparu et on ne compte une occurrence que si elle concerne 2 bulles voisines (ayant une « bounding box » tangente ou sécante). Une contrainte de taille est également imposée pour ne considérer que des événements entre des bulles de taille suffisamment importante (un seuil pour les « petites bulles » disparues par coalescence ou apparues par rupture, et un autre seuil pour les « grosses bulles » disparues par rupture ou formées par coalescence). Pour une coalescence, la somme des aires des 2 bulles mères candidates doit aussi être proche de l'aire de la bulle formée. Pour une rupture, la somme des aires des 2 bulles filles candidates doit aussi être proche de l'aire de la bulle disparue (tolérance de 15%). La position du centre de gravité de la « grosse bulle » après coalescence ou avant rupture doit aussi être proche de la valeur estimée à partir de la position et de la taille des bulles mères ou filles.

Enfin on tient aussi compte des occurrences ayant conduit à une variation de l'aire projetée de moins de 30%. Dans ce cas, une bulle doit apparaître ou disparaître (la petite) et l'autre bulle (la grosse) doit conserver le même numéro après l'occurrence. On vérifie alors les contraintes précédentes de voisinage, de taille, d'aire et de position du centre de gravité.

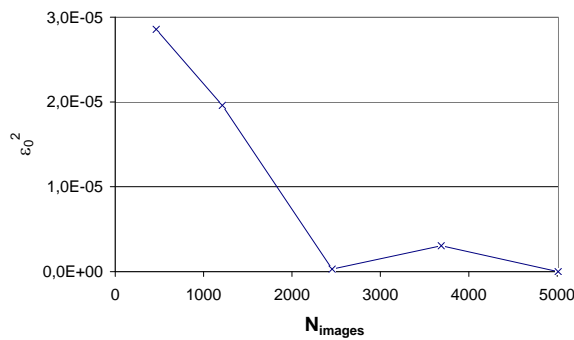
4. RESULTATS

4.1 Validité des résultats

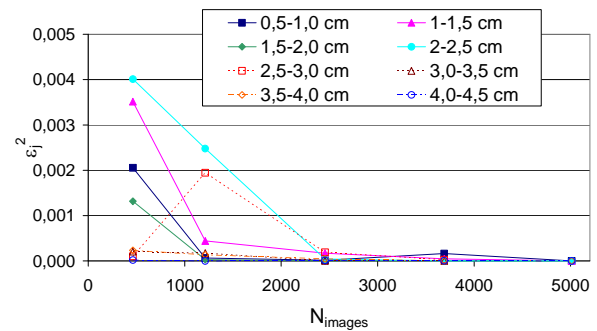
La plupart des auteurs s'accordent pour dire que les mesures moyennes faites sur les bulles n'évoluent plus après traitement de quelques milliers d'images. Dans cette étude, 5120 images (1024 par film) sont traitées au maximum pour chaque condition opératoire, et pour le système eau-air le moins contrasté environ 5000 du fait de l'exclusion de certaines images après binarisation. En ne traitant que 10%, 25%, 50%, 75% et 100% des images de chaque sous-expérience, on peut avoir une idée de la stabilité des mesures de taux de vide et de distribution de tailles de bulles.

Sur la figure 6 est reportée en fonction du nombre d'images traitées le carré de l'écart entre le paramètre moyen calculé après avoir examiné i images et celui obtenu après avoir traité l'ensemble des images disponibles (n) pour la rétention liquide (figure 6a) et la distribution de tailles de bulles (figure 6b) :

$\varepsilon_0^2 = |\varepsilon_{G,i} - \varepsilon_{G,n}|^2$ et $\varepsilon_j^2 = |\% \text{ bulles}_{classe j,i} - \% \text{ bulles}_{classe j,n}|^2$. On peut en déduire que le nombre d'images traitées est suffisant pour assurer une bonne convergence des résultats.



a)



b)

Figure 6 : évolution du carré de l'écart entre le paramètre moyen calculé après traitement de i images et celui obtenu après analyse de l'ensemble des images en fonction du nombre d'images traitées (système eau-air, $U_G = 0,02$ m/s) : a) rétention liquide, b) % de bulles dans chacune des classes (diamètre équivalent basé sur l'aire projetée)

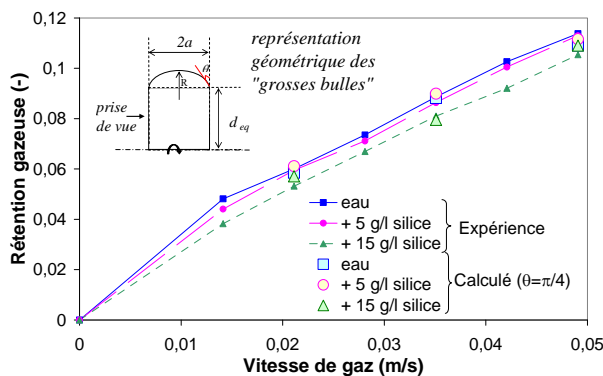
Une analyse de la déviation des mesures de rétention gazeuse entre les différentes sous-expériences montre que les résultats obtenus présentent une bande d'incertitude de $\pm 10\%$ correspondant à un intervalle de confiance de 90%.

On a aussi étudié quel était l'impact sur le calcul de rétention de gaz de l'élimination des quelques images pour les systèmes les moins contrastés, puisque cette exclusion, faite par l'utilisateur, pouvait être biaisée. En remplaçant chacune des images perdues par l'image précédente, on a obtenu une très légère augmentation de ϵ_G , mais toujours inférieure à 5%.

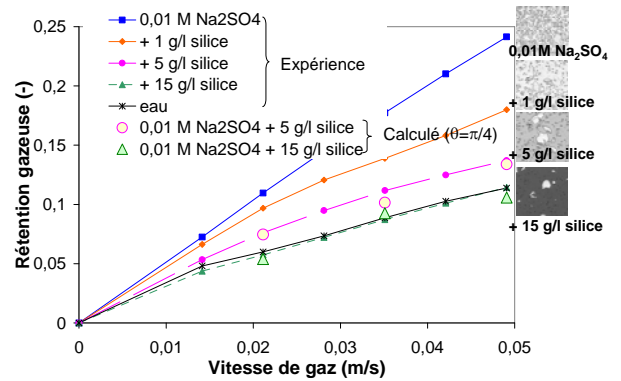
Enfin l'écart entre les valeurs de rétention gazeuse mesurées par différence de hauteurs de liquide et celles obtenues par le calcul après traitement d'images n'excède pas 10% (4% en moyenne).

4.2 Réentions de gaz

La figure 7 montre que si l'ajout de silice a peu d'effet sur le système eau-air (fig. 7a), il annule de façon remarquable l'effet inhibiteur de coalescence de l'électrolyte, puisqu'à 15 g/l (fig. 7b) on retrouve des résultats similaires à ceux de l'eau ou eau +silice (fig. 7a)



a)



b)

Figure 7 : Réentions de gaz expérimentales et calculées : a) pour les systèmes eau-air-silice et b) les systèmes Na_2SO_4 0,01M-air-silice.

4.3 Aire interfaciale et distribution de tailles de bulles

Le tableau 2 montre pour l'ensemble des conditions opératoires traitées les aires interfaciales moyennes (A_I sans compter les 2 surfaces en regard des parois, A_{II} en les comptant) et les diamètres de Sauter et de Herdan calculés en utilisant pour chaque bulle le diamètre équivalent en volume. Le transfert via le film liquide entre la paroi et la bulle est certainement différent de celui qui se produit en périphérie vers la masse liquide. Aucune des deux surfaces n'est donc à préconiser pour l'estimation ultérieure d'un coefficient de transfert global.

Tableau 2 : Aires interfaciales et diamètres de Sauter et de Herdan

	Eau bidistillée			Silice 5 g/l			Silice 15 g/l			Silice 5 g/l + Na ₂ SO ₄ 0,01M			Silice 15 g/l + Na ₂ SO ₄ 0,01M		
U _G (m/s)	0,02	0,035	0,05	0,02	0,035	0,05	0,02	0,035	0,05	0,02	0,035	0,05	0,02	0,035	0,05
A _I (m ² /m ³)	22,7	28,9	35,8	25,3	31,2	38,1	18,7	22,4	27,3	45,1	54,4	69,5	18,2	26,2	28,1
A _{II} (m ² /m ³)	41,5	58,4	72,6	44,6	60,9	75,2	37,8	49,7	65,4	65,7	84,2	109,5	36,1	58,1	64,8
D[3,2] (cm)	1,17	1,37	1,41	1,19	1,28	1,37	1,40	1,58	1,76	0,91	0,94	1,02	1,31	1,65	1,63
D[4,3] (cm)	1,44	1,78	1,86	1,42	1,67	1,76	1,67	1,93	2,17	1,04	1,15	1,24	1,58	2,04	2,05

Par rapport à l'eau pure, l'addition de 15 g/l de silice conduit à une augmentation sensible du diamètre des bulles (et une diminution de l'aire interfaciale) alors que la rétention est quasi inchangée. La contribution des grosses bulles dans le volume total gazeux augmente par rapport au cas de l'eau. Pour la solution électrolytique, l'effet de la silice est encore plus flagrant, le diamètre moyen en volume (D[4,3]) passant de 1,24 à 2,05 cm entre 5 et 15 g/l à la plus forte vitesse superficielle de gaz

Les distributions en volume des tailles de bulles (figure 8) montrent encore que l'ajout de silice déplace la distribution vers les classes les plus élevées, tandis que l'électrolyte augmente la proportion des petites bulles.

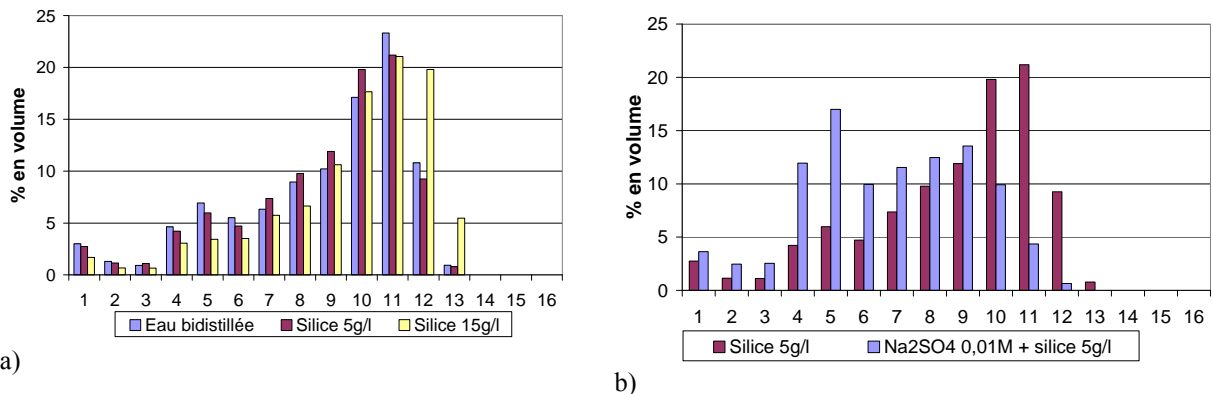


Figure 8 : Distribution en volume de tailles de bulles (U_G = 0,02 m/s) : a) effet de l'ajout de silice et b) effet de l'ajout d'électrolyte

Tableau 3 : Amplitudes des classes de la figure 8, le « Diam. I » est le diamètre équivalent basé sur l'aire projetée et le « Diam. II » est le diamètre de la sphère de même volume.

Classe	1	2	3	4	5	6	7	8
Diam I (cm)	]0,35-0,40]	]0,40-0,45]	]0,45-0,50]	]0,50-0,60]	]0,60-0,74]	]0,74-0,92]	]0,92-1,17]	]1,17-1,51]
Diam II (cm)	]0,35-0,40]	]0,40-0,45]	]0,45-0,50]	]0,5-0,75]	]0,75-0,84]	]0,84-0,95]	]0,95-1,09]	]1,09-1,27]
	9	10	11	12	13	14	15	16
Diam I (cm)	]1,51-1,96]	]1,96-2,57]	]2,57-3,40]	]3,40-4,52]	]4,52-6,02]	]6,02-8,06]	]8,06-10,80]	]10,80-14,51]
Diam II (cm)	]1,27-1,49]	]1,49-1,77]	]1,77-2,11]	]2,11-2,54]	]2,54-3,06]	]3,06-3,69]	]3,69-4,48]	]4,48-5,44]

4.4 Rupture – coalescence

La figure 9 montre la matrice d'échange de bulles entre classes par rupture – coalescence pour le cas du système Na₂SO₄ 0,01M-air-silice 5g/l : les lignes représentent les classes d'où les bulles disparaissent et les colonnes les classes où elles apparaissent. Pour les petites bulles (qui vont disparaître par coalescence ou apparaître par rupture) seules les bulles de plus de 50 pixel² sont prises en compte et pour les grosses

bulles (qui vont se rompre ou être obtenues par coalescence) seules les bulles de plus de 125 pixel² sont considérées. Les classes 1 à 100 (figure 9) débutent à 50 pixel² (soit 30,5 mm²) avec une amplitude de 21 pixel² (12,8 mm²) entre chaque classe. Les différents niveaux de bleu représentent le nombre de bulles échangées (cf. légende). La diagonale sépare la matrice en 2 parties : le triangle en haut à droite représente les coalescences et le triangle en bas à gauche les ruptures. La diagonale est normalement vide ou presque puisqu'il est très peu probable qu'après rupture ou coalescence une bulle reste dans la même classe : la coalescence alimente une classe supérieure et la rupture deux classes inférieures.

On remarque que la densité d'échange est surtout importante entre petites bulles (du fait de leur nombre élevé), et pour les bulles plus grosses près de la diagonale et sur le haut et le côté gauche de la matrice. Il paraît logique que par rupture une grosse bulle donne plutôt deux bulles de tailles bien différentes que de même taille. Il en est de même pour les bulles qui coalescent.

La matrice est pratiquement symétrique, ce qui confirme que la distribution de tailles est bien stable.

On montre aussi (tableau 4) que le taux d'apparition des bulles (nombre de bulles/s) est similaire au taux de disparition pour chacune des classes 5 à 16 décrites dans le tableau 3 (correspondant à plus de 50 pixel²).

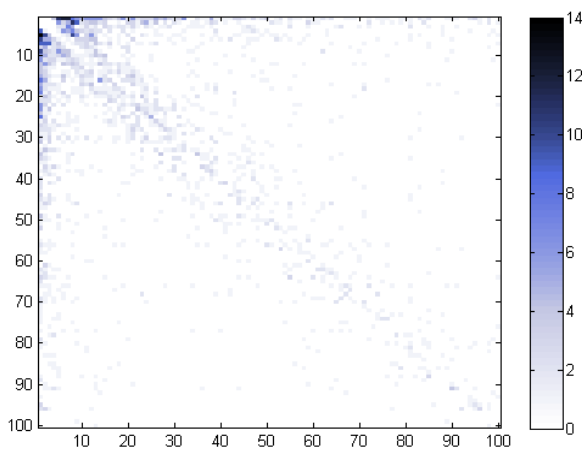


Figure 9 : matrice d'échange de bulles par rupture – coalescence (Na₂SO₄ 0,01M-air-silice 5g/l, U_G = 0,05 m/s, durée = 9,1 s)

Classe	Taux d'apparition (s ⁻¹)	Taux de disparition (s ⁻¹)
5	25,6	24,7
6	22,3	18,2
7	16,8	16,0
8	15,1	13,1
9	31,0	33,8
10	30,2	27,5
11	32,3	34,2
12	24,6	25,3
13	3,2	2,9
14	0,0	0,0
15	0,0	0,0
16	0,0	0,0

Tableau 4 : Taux d'apparition et de disparition des bulles (Na₂SO₄ 0,01M-air-silice 5g/l, U_G = 0,05 m/s)

5. CONCLUSION

Un programme de traitement d'images a été mis au point pour analyser les propriétés de l'écoulement à bulles en colonne 2D en présence d'additifs : sulfate de sodium (0,01M) et particules de silice microniques.

Le peu de contraste entre les bulles et le liquide aux faibles rétentions de silice a d'abord conduit à développer une procédure de binarisation spécifique, basée sur un seuillage multiple. Aux plus fortes concentrations, le traitement a pu être entièrement automatisé.

Pour effectuer un calcul précis de la rétention gazeuse et de l'aire interfaciale, les plus grosses bulles ont été représentées par une géométrie de révolution.

Les calculs de distribution de taille de bulles et d'occurrences de rupture-coalescence sont quant à eux basés sur le suivi des bulles d'image en image.

Les résultats montrent que la technique adoptée est fiable, l'écart avec la rétention gazeuse mesurée par différence de hauteurs de surface libre étant de l'ordre de 4%. Ils font aussi apparaître que les particules réduisent fortement l'effet inhibiteur de coalescence de l'électrolyte jusqu'à l'annuler à 15 g/l.

REFERENCES

- [1] BOYER C., DUQUENNE A.M. ET WILD G., Chem. Eng. Sci., 57 (16), 3185 (2002).
- [2] DE SWART J.W.A., VAN VLIET R.E. ET KHRISHNA R., Chem. Eng. Sci., 51 (20), 4619 (1996).
- [3] KLUYTMANS J.H.J., Ph.D, Thesis, University of Eindhoven, The Netherlands (2003).
- [4] TANG C. ET HEINDEL T.J., Chem. Eng. Sci., 59, 623 (2004).
- [5] ZAHRADNIK J., FIALOVA M. ET LINEK V., Chem. Eng. Sci., 54, 4757 (1999).

REMERCIEMENTS : nous remercions J.H.J. KLUYTMANS pour son programme de suivi des bulles.