

# **Influence des propriétés physico-chimiques sur la distribution de tailles de bulles**

CHAUMAT Hélène<sup>a</sup>, BILLET-DUQUENNE Anne-Marie<sup>a\*</sup>, HEBRARD Gilles<sup>b</sup>,  
AUGIER Frédéric<sup>c</sup>, MATHIEU Corinne<sup>c</sup> et DELMAS Henri<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire de Génie Chimique*  
5, Rue Paulin Talabot – B.P. 1301 – 31106 Toulouse cedex 1

LIPE – INSA  
135, av. de Ranguel – 31077 Toulouse cedex 4

<sup>c</sup> *Rhodia, Centre de Recherche de Lyon*  
85 av. des Frères Perret – B.P. 62 – 69192 St Fons cedex

## **Résumé**

L'effet des propriétés physico-chimiques (densité liquide, viscosité et tension superficielle) sur la distribution de taille de bulles est étudié, dans un appareillage de taille réduite, à l'aide d'une caméra. Cette étude est d'abord menée en liquides purs, milieux choisis de manière à ne différer du liquide de référence, le cyclohexane, que par une seule propriété. Ensuite, des mélanges aqueux d'eau et de butanol sont étudiés, afin d'évaluer les différences entre les milieux purs et les mélanges, mais aussi de tester la validité de la démarche industrielle simulant le comportement des liquides industriels organiques par des mélanges aqueux.

Il découle de cette étude, réalisée pour des vitesses d'éjection élevées comprises entre 1 et 22m/s, que l'effet le plus influent en liquides purs est la tension superficielle, l'effet de la viscosité étant plus modéré. Par contre, la seule connaissance de la tension superficielle, de la viscosité et de la densité liquide ne suffit pas à prédire la distribution de tailles de bulles. Pour les mélanges aqueux, la même conclusion invalide le principe de fluide modèle.

**Mots-clés :** Physico-chimie, bulles, diamètre de bulles, distribution de tailles, gaz-liquide

## **1. Introduction, contexte de l'étude**

Pour les contacteurs à bulles, la connaissance de la distribution de tailles de bulles, fonction des propriétés du liquide, est essentielle, car elle contrôle l'hydrodynamique et le transfert de matière. L'effet des paramètres physico-chimiques classiques (viscosité, tension superficielle et densité), déjà largement étudié en solutions aqueuses (Chaudhari et Hofmann, 1994), est ici précisé pour des liquides purs. Il s'agit notamment de déterminer si, contrairement aux solutions aqueuses, ces critères suffisent pour prédire la taille des bulles.

Dans la littérature, l'impact de la physico-chimie sur la taille des bulles est classiquement étudié en ajoutant des additifs à des milieux aqueux (Waldie et al., 1999 ; Krzan et Malysa, 20054782), ce qui limite l'application de ces résultats aux nombreux réacteurs industriels fonctionnant avec des liquides de type organique. Pourtant, les solutions aqueuses additivées sont classiquement utilisées comme « milieu modèle » des liquides organiques industriels. Il faudrait donc vérifier si un tel modèle est fondé, c'est-à-dire si le comportement des liquides organiques est similaire à celui des mélanges aqueux de mêmes propriétés physico-chimiques.

Pour répondre à ces questions, cette étude s'attache dans un premier temps à préciser l'effet des trois propriétés physico-chimiques classiques (viscosité, tension superficielle et densité liquide) sur les distributions de tailles de bulles en liquides purs. Dans un second temps, les mélanges aqueux sont analysés. Afin de prendre en compte les vitesses d'éjection importantes rencontrées industriellement, la gamme de vitesses considérée ici est comprise entre 1 et 22m/s, gamme peu explorée dans la littérature.

---

\* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : [AnneMarie.Billet@ensiacet.fr](mailto:AnneMarie.Billet@ensiacet.fr)

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Description de la cuve

Pour cette étude, une installation spécifique a été conçue : elle minimise le rôle de l'hydrodynamique des phases et permet la mesure de distributions de tailles de bulles par visualisation (photographies). Il s'agit d'une cuve en verre parallélépipédique de dimensions  $0,25 \times 0,25 \times 0,50\text{m}$ , remplie d'environ 30L de liquide (cf. figure 1). Le gaz (air comprimé ou azote) est injecté dans cette cuve à travers deux orifices rigides (trous uniques) de  $0,001\text{m}$  de diamètre (diamètre couramment utilisé dans l'industrie chimique), espacés de  $0,04\text{m}$ . Les essais sont réalisés à pression atmosphérique et la cuve est thermostatée à  $25^\circ\text{C}$  par une double enveloppe. La gamme de vitesses d'éjection balayées est comprise entre 1 et  $22\text{m/s}$ . Pour couvrir l'ensemble de la gamme de débits associée ( $0-0,02\text{L/s}$  et  $0-0,1\text{L/s}$ ) avec un maximum de précision, deux rotamètres Brooks (R2-15-A et R2-15-C) sont utilisés. Lors de la manipulation de solvants, des mesures de sécurité sont prises : l'azote est injecté en lieu et place de l'air pour ne pas travailler dans la zone d'explosivité, la cuve est fermée par un couvercle étanche et la sortie gaz est reliée à un condenseur pour éviter le rejet et l'inhalation de vapeurs. Enfin, cette installation est placée sous une hotte aspirante.

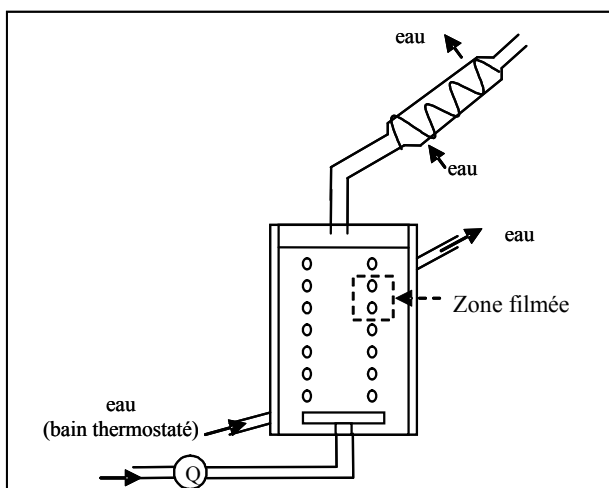


Figure 1 : Schéma de la cuve utilisée

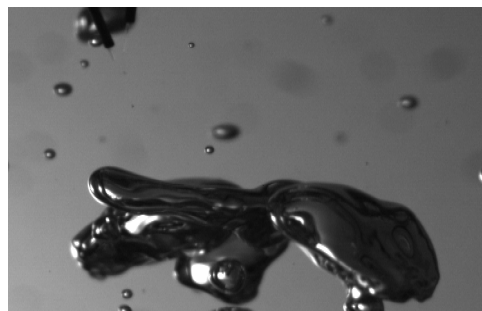


Figure 2 : Exemple de photo obtenue en aquarium dans nos conditions (cyclohexane,  $u_{G0}=22\text{m/s}$ )

### 2.2. Mise en œuvre des mesures photographiques

Pour caractériser les populations de bulles, une caméra monochrome Leutron LV-95 est utilisée. Sa vitesse d'acquisition est fixée à une valeur modérée de 30 images par seconde pour l'ensemble des essais, de manière à éviter de filmer les mêmes bulles sur des images successives. La zone filmée est située à  $0,2\text{m}$  de l'injecteur (cf. figure 1), c'est-à-dire à la fois assez loin de l'injecteur pour que les bulles aient eu le temps d'interagir entre elles et assez loin de l'interface pour éviter toute interaction avec les phénomènes de désengagement des bulles. La taille de la fenêtre de visualisation est d'environ  $0,04 \times 0,04\text{m}$ .

### 2.3. Traitement des données

Les images obtenues sont traitées avec le logiciel Visilog 5.1 qui permet notamment de calculer le diamètre équivalent,  $d_{\text{eq}}$ , de chaque bulle identifiée, c'est-à-dire le diamètre de la bulle sphérique de même aire projetée. L'identification des bulles n'est pas automatisée, car le logiciel est incapable de distinguer les bulles sans ambiguïté en présence d'écoulements très denses où la superposition de bulles sur l'image est fréquente (cf. exemple de photo obtenue de la figure 2). Cette étape, longue et fastidieuse, est donc réalisée en déterminant manuellement les contours de bulles.

A partir de la distribution des diamètres équivalents ainsi obtenue, deux critères sont examinés : le diamètre moyen,  $d_{10}$ , et le diamètre de Sauter,  $d_{32}$ , définis par :

$$d_{10} = \frac{\sum_{i=1}^N d_{eq,i}}{N} ; \quad d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N d_{eq,i}^3}{\sum_{i=1}^N d_{eq,i}^2} ;$$

Ces deux paramètres sont complémentaires, car ils attribuent des poids différents aux différentes classes de bulles : les grosses bulles ont plus de poids dans le diamètre de Sauter que dans le diamètre moyen.

Le nombre de bulles traitées, N, doit être suffisant pour que la distribution n'en dépende plus. Dans la littérature ce nombre varie, selon les auteurs et les installations, entre 50 et 1000 bulles [Lage et Esposito (1999), Moustiri et al. (2001), Schäfer et al. (2002)]. Dans notre cas, quelles que soient les conditions opératoires, un nombre de 150 bulles assure une bonne répétabilité (écarts inférieurs à 15%).

### 3. Choix des liquides étudiés

Pour l'intérêt industriel, le liquide choisi comme référence est de nature organique : le cyclohexane. Ce solvant, très utilisé mais peu étudié au niveau du bullage, démarque cette étude des nombreux travaux sur l'eau.

#### 3.1. Liquides purs

Les liquides utilisés pour évaluer l'effet des paramètres physico-chimiques sur la distribution de tailles de bulles sont choisis de manière à ce qu'une seule des trois propriétés physico-chimiques considérées (viscosité, densité et tension superficielle) diffère de celles du milieu de référence, le cyclohexane. En outre, pour vérifier si ces trois paramètres sont suffisants, un liquide ayant ses propriétés proches de celles du cyclohexane est également utilisé.

Après une analyse de sécurité ayant pour but d'écarter les produits dangereux, les liquides retenus sont le décane (comparaison de deux liquides de propriétés physico-chimiques très proches), l'eau (effets de la tension superficielle et de la densité), et le butan-1-ol (effet de la viscosité). Les propriétés respectives de ces produits sont reportées dans le tableau 1, où les valeurs entre parenthèses correspondent aux écarts relatifs avec le liquide de référence. L'effet de la densité du liquide, peu influant, n'est finalement pas considéré.

Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques des produits purs testés

Nom	Formule	Densité	Viscosité	Tension superficielle
		à 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	à 25°C (mPa.s)	à 25°C (mN/m)
cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	0,7785	0,894	24,65
décane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	0,7300 (6,43%)	0,838 (6,70%)	23,37 (5,33%)
eau	H <sub>2</sub> O	0,9963 (24,90%)	0,890 (0,40%)	<b>71,99</b> (94,30%)
butan-1-ol	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	0,8100 (3,97%)	<b>2,544</b> (95,99%)	24,93 (1,13%)

#### 3.2. Mélanges de liquide

L'étude des mélanges de liquides est centrée sur les solutions aqueuses à faibles concentrations en butanol (0,01, 0,05 et 0,1% en volume), solutions couramment utilisées industriellement comme milieu modèle des liquides organiques. Les distributions de tailles de bulles issues de ces mélanges aqueux sont comparées entre elles et confrontées au comportement obtenu pour le cyclohexane pur, comportement similaire à celui des mélanges à base de cyclohexane (Chaumat, 2004). Ces résultats doivent permettre d'isoler le comportement spécifique des mélanges aqueux et de discuter de leur utilisation comme milieux modèles.

## 4. Résultats

#### 4.1. Conditions de bullage

Pour caractériser le bullage obtenu dans notre appareil, et de ce fait situer notre étude par rapport à la littérature, les nombres de Reynolds, Re, et de Weber, We, sont calculés.

Ces nombres sont définis à la fois à l'orifice, où se forment les bulles (indice 0), et pour les bulles en ascension (indice B), par :

$$Re_0 = \frac{d_0 u_{G0} \rho_G}{\mu_G} ; \quad We_0 = \frac{d_0 u_{G0}^2 \rho_G}{\sigma} ; \quad Re_B = \frac{d_{SM} v_B \rho_L}{\mu_L} ; \quad We_B = \frac{d_{SM} v_B^2 \rho_L}{\sigma}$$

À la formation, les nombres de Reynolds,  $Re_0$ , varient entre 60 et 1360 et les nombres de Weber,  $We_0$ , entre 0,02 et 25, valeurs qui balayent l'ensemble des régimes de bullage du régime à bulles au régime à jet. La transition entre ces deux régimes, estimée pour un nombre de Weber à l'orifice entre 1,3 (Råbiger et Vogelpohl, 1986) et 2 (Blass, 1990), a lieu pour une vitesse à l'injection,  $u_{G0}$ , comprise entre 5 et 7m/s pour tous les liquides envisagés, excepté pour l'eau (de tension superficielle plus élevée), où cette vitesse est légèrement plus grande (de l'ordre de 10m/s).

Lors de leur ascension, les bulles ont des nombres de Reynolds,  $Re_B$ , compris entre 30 et 1150 et des nombres de Weber,  $We_B$ , compris entre 0,8 et 250.

Avant de passer aux distributions de tailles de bulles, il faut préciser que, pour des raisons de lisibilité, celles-ci sont représentées sous forme de courbes au lieu des histogrammes habituels. Néanmoins chaque point représente une classe de diamètre et non un diamètre particulier. Pour l'ensemble de cette étude, les classes retenues ont une largeur de 0,2mm.

#### 4.2. Distribution de tailles de bulles en cyclohexane (liquide de référence)

Dans ce paragraphe, les distributions de tailles de bulles, obtenues dans le milieu de référence pour quatre vitesses d'éjection ( $u_{G0}=1, 5, 10$  et 22m/s), sont analysées (cf. figure3).

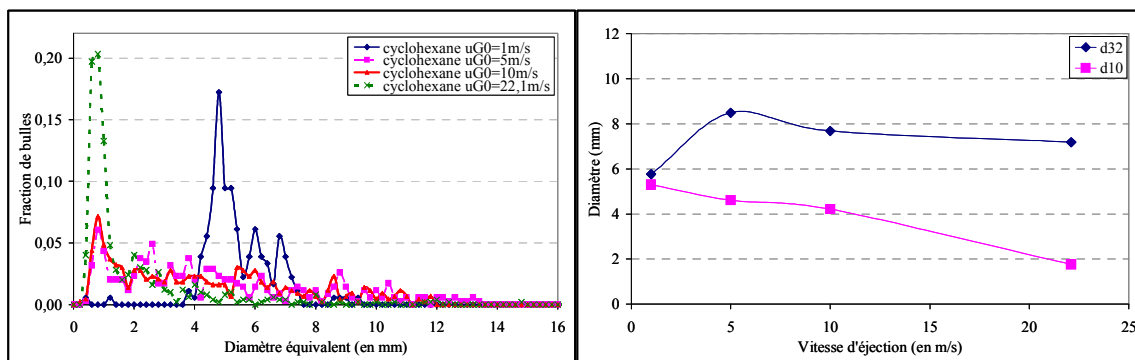


Figure 3 : Effet de la vitesse d'éjection du gaz sur la distribution des tailles de bulles (cyclohexane)

Figure 4 : Effet de la vitesse d'éjection sur les diamètres de bulles (cyclohexane)

À faible vitesse ( $u_{G0}=1$ m/s), la distribution des tailles de bulles est relativement resserrée aux alentours de 5mm et un peu dissymétrique ; elle s'étale davantage vers les grands diamètres. Lorsque la vitesse d'éjection croît ( $u_{G0}=5-10$ m/s, début du régime de jet), la population de bulles « moyennes » s'étale vers des valeurs de diamètres plus grandes (6mm), et une population de petites bulles apparaît aux alentours de 1mm. Pour  $u_{G0}=22$ m/s, la tendance amorcée précédemment se confirme : la population de petites bulles devient prédominante et la population de grosses bulles, minoritaire, atteint des diamètres toujours plus grands.

En terme de diamètres moyennés (cf. figure 4), cela se traduit par une évolution modérée du diamètre de Sauter avec  $u_{G0}$  (augmentation de 25%), alors que le diamètre moyen des bulles diminue fortement entre 1 et de 22m/s (diminution de 66%). L'écart entre ces deux diamètres, faible à  $u_{G0}=1$ m/s, augmente avec la vitesse du gaz, ce qui est en accord avec l'élargissement de la distribution de tailles de bulles observé.

La dispersion des bulles peut ainsi être représentée par deux populations : l'une composée de grosses bulles (>6mm) et l'autre de petites bulles de 1mm environ. Au fil de l'augmentation de la vitesse d'éjection, la distribution des tailles de bulles s'élargit (de 0,2 à 14,7mm pour  $u_{G0}=22$ m/s). Ces tendances, décrites ici pour le cyclohexane, sont observées pour l'ensemble des liquides purs étudiés.

### 4.3. Effet de la physico-chimie sur les distributions de tailles de bulles en liquides purs

La similarité de comportement des différents liquides purs avec la vitesse d'éjection est vérifiée sur la figure 5 : quel que soit le milieu, l'écart entre les diamètres moyen et de Sauter augmente avec la vitesse d'éjection du gaz. A faible vitesse d'éjection, les deux valeurs de diamètres sont du même ordre alors que, lorsque la vitesse d'éjection augmente, le diamètre moyen diminue, du fait de la présence accrue de petites bulles, et le diamètre de Sauter augmente, du fait de la présence de bulles de plus en plus grosses.

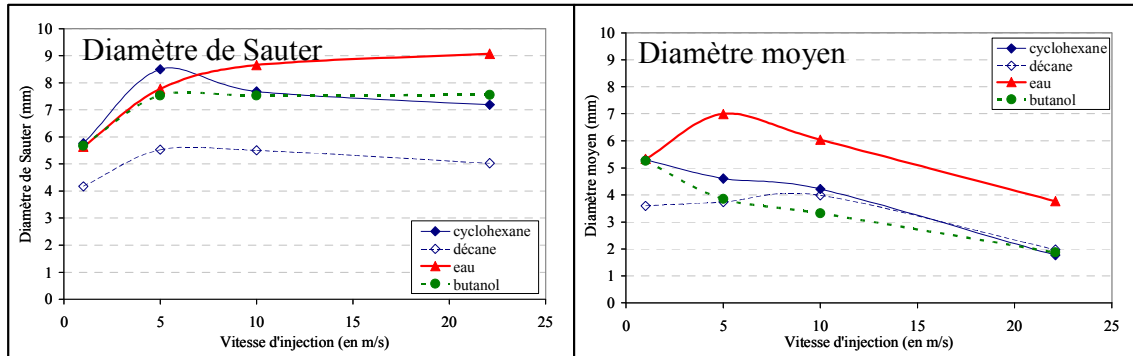


Figure 5 : Evolution des diamètres avec la vitesse d'injection pour différents milieux purs

Ces milieux vont à présent être comparés successivement au cyclohexane, de manière à isoler le rôle de chaque propriété physico-chimique.

#### 4.3.1. Effet de la viscosité : comparaison entre le cyclohexane et le butanol

Il est classiquement observé dans la littérature que la viscosité joue sur la taille des bulles : son augmentation favorise la coalescence et conduit à des diamètres de Sauter plus grands (cf. comparaison entre cyclohexane, cyclohexanol et cyclohexanone de Schäfer et al. (2002)). Dans notre gamme de mesure cependant, aucun impact de cette propriété n'est observé sur le diamètre de Sauter (cf. comparaison entre cyclohexane et butanol de la figure 5,  $d_{SM} \approx 7,5 \text{ mm}$  pour les deux liquides). L'effet de la viscosité sur le diamètre moyen est également faible pour  $u_{G0} = 1$  et  $22,1 \text{ m/s}$  ; il ne prend de l'importance que pour les valeurs de vitesses intermédiaires ( $u_{G0} = 5$  et  $10 \text{ m/s}$ ), où le cyclohexane, moins visqueux, présente des diamètres moyens inférieurs de 20% à ceux du butanol. Pour mieux comprendre ces comportements, les distributions de tailles sont tracées pour deux vitesses sur la figure 6.

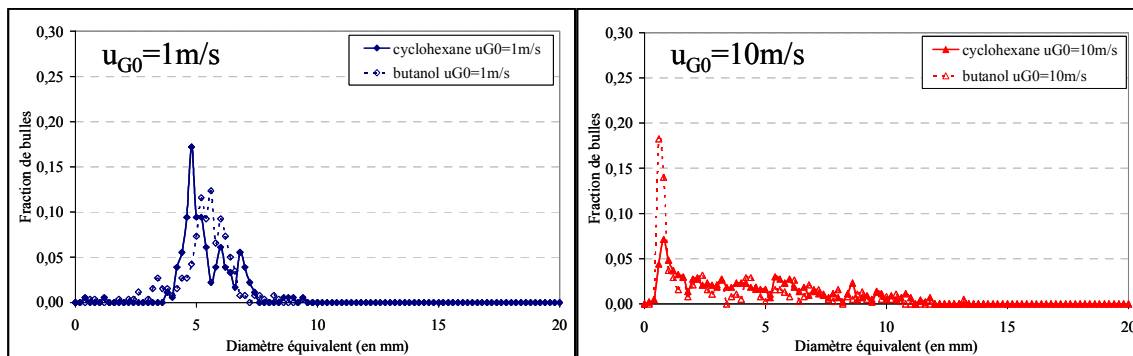


Figure 6 : Comparaison des distributions de tailles de bulles entre le cyclohexane et le butanol

A faible vitesse d'éjection ( $u_{G0} = 1 \text{ m/s}$ ), la population de bulles la plus rencontrée est plus grosse en butanol qu'en cyclohexane (6 mm au lieu de 5 mm), tendance peu visible sur les diamètres moyens du fait de l'étalement vers les grands diamètres de la distribution en cyclohexane (même diamètre maximal pour les deux milieux).

Pour les vitesses d'éjection supérieures, les distributions sont assez similaires pour les deux milieux, si ce n'est que la population de petites bulles est systématiquement plus importante en butanol. Ceci explique

le faible écart entre les milieux en terme de diamètre de Sauter (écart relatif inférieur à 12%) et l'écart plus marqué en diamètre moyen (écart relatif jusqu'à 22%).

La comparaison entre le cyclohexane et le butanol met ainsi en évidence que l'effet de la viscosité reste minime dans la gamme de viscosité balayée : bien que la viscosité soit multipliée par 2,8 entre le cyclohexane et le butanol, les valeurs de diamètres de Sauter et les distributions de tailles de bulles demeurent assez semblables quelle que soit  $u_{G0}$ . Cet effet modéré, en marge de la littérature, peut être rattaché à la nature des milieux étudiés : des liquides purs de viscosités différentes au lieu de solutions aqueuses dont la viscosité est modifiée au moyen d'additifs.

#### 4.3.2. Effet de la tension superficielle et de la densité : comparaison entre le cyclohexane et l'eau

La figure 5 met en évidence que le diamètre moyen en eau est supérieur à celui en cyclohexane : le diamètre moyen diminue avec la tension superficielle (écarts relatifs jusqu'à 115%). En revanche, aucune tendance nette en terme de diamètres de Sauter ne peut être dégagée (écarts positifs ou négatifs inférieurs à 25%). Ces tendances peuvent être expliquées par les distributions de tailles de bulles associées (cf. figure 7) : pour les grands diamètres, les distributions des tailles de bulles sont similaires pour les deux milieux (diamètres de Sauter similaires), alors que la proportion de très petites bulles (1mm) est plus petite en eau (diamètre moyen inférieur en eau).

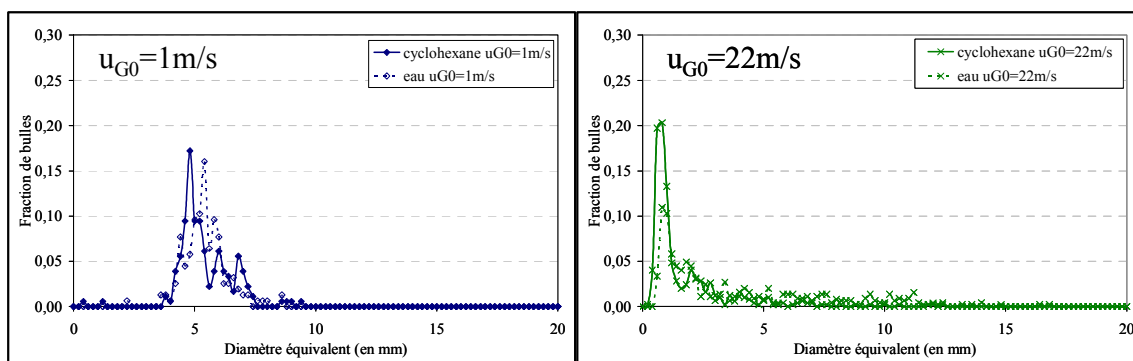


Figure 7 : Comparaison des distributions de tailles de bulles entre le cyclohexane et l'eau

#### 4.3.3. Comparaison de deux milieux de propriétés proches : le cyclohexane et le décane

Les effets de la viscosité et de la tension superficielle étant évalués, on peut s'interroger sur la suffisante pertinence de ces paramètres pour contrôler la distribution des tailles de bulles dans un milieu. A cette fin, deux milieux de propriétés physico-chimiques très proches, le cyclohexane et le décane, sont comparés.

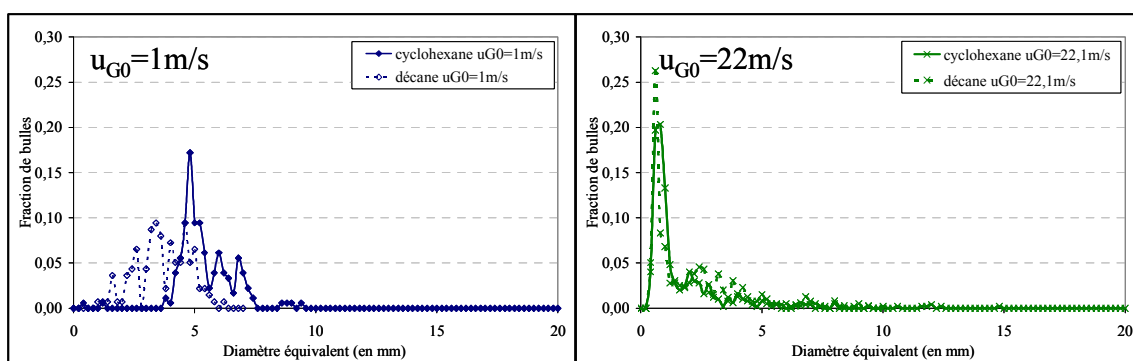


Figure 8 : Histogrammes comparatifs entre le cyclohexane et le décane

Contrairement à l'intuition initiale, les courbes de la figure 5 leur associent des comportements très différents en terme de diamètres de Sauter (jusqu'à 35% d'écart relatif entre les deux milieux), ce qui se traduit au niveau des distributions de tailles (cf. figure 8) par des bulles plus grosses en cyclohexane. La population de petites bulles en revanche est similaire pour les deux milieux ; cette population de petites bulles étant prédominante en nombre à forts débits, les diamètres moyens des deux milieux deviennent similaires à partir de 10m/s (écarts relatifs inférieurs à 10%).

Il découle de cette étude que les trois propriétés physico-chimiques retenues ne suffisent pas à prédire les distributions de tailles de bulles même pour des liquides purs.

#### 4.3.4. Conclusions sur l'influence de la physico-chimie en liquides purs

Cette étude a permis de dégager les effets de la tension superficielle et de la viscosité en liquides organiques purs. L'effet de la tension superficielle est nette : sa diminution génère des bulles plus petites. Par contre, dans la gamme testée, le rôle de la viscosité est secondaire et diffère selon qu'on l'analyse en diamètre de Sauter ou en diamètre moyen en nombres.

Ces critères (viscosité, tension superficielle) et la densité ne suffisent cependant pas à expliquer les différences de comportements entre les différents milieux, et la nature du (ou des) facteur(s) supplémentaire(s) qui influence les distributions de tailles de bulles est encore mal connue.

Ainsi, bien que la configuration d'étude soit simple, elle fait intervenir des phénomènes de rupture et de coalescence très différents d'un milieu à l'autre, que la physico-chimie classique des milieux ne suffit pas à expliquer.

#### 4.4. Comportement des mélanges de liquides

Il s'agit à présent d'évaluer si, pour des conditions opératoires données, les tendances observées en liquides purs peuvent être généralisables aux mélanges aqueux. Pour cela, les mélanges utilisés sont des solutions eau+butanol diluées (à 0,01%, 0,05% et 0,1% volumique), mélanges souvent envisagés comme milieu modèle des liquides organiques industriels. Du fait de la dilution importante fixée, les propriétés de ces différents mélanges diffèrent peu de celles de l'eau ; la propriété la plus affectée, la tension superficielle, ne diminue que de 1,6% par rapport à l'eau pour la concentration en butanol la plus élevée.

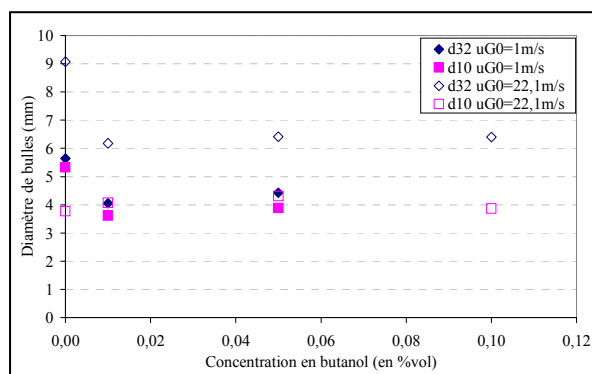


Figure 9 : Effet de la concentration en butanol sur les diamètres de bulles

La figure 9 représente les diamètres de bulles (moyen et de Sauter) pour différentes concentrations en butanol et deux vitesses de gaz. Comme pour les produits purs, l'écart entre les deux diamètres s'accroît avec la vitesse du gaz : la distribution des bulles s'étale. Cela découle d'une augmentation importante du diamètre de Sauter avec la vitesse du gaz (+50%), pour une variation faible du diamètre moyen.

Par ailleurs, quelle que soit la vitesse de gaz, les diamètres moyens et de Sauter observés sur la figure 9 et les distributions de tailles de bulles semblent très peu dépendre de la concentration en butanol. En effet, il existe une concentration limite à partir de laquelle la taille des bulles n'évolue plus ; cette concentration limite est estimée à environ 0,05% volumique en butanol par Krzan et Malysa (2002).

Enfin, la comparaison des diamètres observés dans les mélanges à ceux issus des liquides purs associés, l'eau et le butanol (cf. tableau 2), montre que l'ajout de butanol dans l'eau cause une diminution importante du diamètre des bulles et conduit à des valeurs inférieures à celles observées en liquides organiques purs. Seule la valeur du diamètre moyen obtenue à fortes vitesses fait exception. En terme de distribution de tailles de bulles, cela se traduit en présence d'alcool par une taille maximale de bulles plus petites, un déplacement du pic de la population de bulles « moyennes » vers un diamètre plus faible, mais également par une perte d'importance de la population de très petites bulles (cf. figure 10). Les bulles, stabilisées par le butanol, ne se cassent probablement plus par cisaillement pour former les très petites bulles. La population de bulles est donc très différente de celle, plus étalée, observée en liquides purs.

Le comportement de ces mélanges n'est donc en aucun cas intermédiaire entre celui des deux liquides purs (eau et butanol). Ce résultat confirme que les seules propriétés physico-chimiques d'un milieu ne

Tableau 2 : Tailles de bulles dans les milieux purs (eau et butanol)

	eau		butanol	
	$d_{10}$ (mm)	$d_{32}$ (mm)	$d_{10}$ (mm)	$d_{32}$ (mm)
$u_{G0}=1$ m/s	5,32	5,64	5,26	5,68
$u_{G0}=22,1$ m/s	3,76	9,07	1,87	7,55

suffisent pas pour caractériser les bulles qui s'y forment. L'utilisation de tels liquides comme milieu modèle de liquides organiques ne semble donc pas adaptée, excepté si l'effet de ces toutes petites bulles peut être négligé dans un appareil industriel.

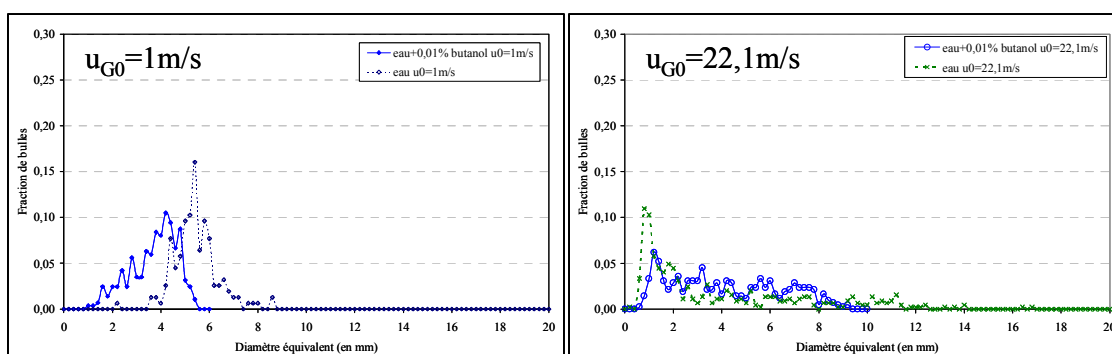


Figure 10 : Distributions de taille de bulles en eau et en eau+0,01% de butanol

## 5. Conclusions, perspectives

Entre 1 et 22m/s de vitesse d'éjection, une variation de viscosité modérée (viscosité multipliée par 3) a peu d'effet sur la population des bulles en liquides purs. La tension superficielle est plus sensible : son augmentation cause une augmentation de la taille des bulles. Toutefois, la seule considération des propriétés physico-chimiques classiques (viscosité, tension superficielle et densité) ne suffit pas pour prédire les distributions de tailles de bulles. Cette tendance est confirmée par l'étude de solutions aqueuses d'eau-butanol : l'ajout de quantité infime de butanol à l'eau modifie peu les propriétés retenues mais altère profondément les distributions de tailles de bulles. L'allure de ces distributions diffère en outre profondément de celle obtenue pour les produits organiques : dans la gamme de vitesses étudiées, de tels mélanges ne sont a priori pas de bons milieu modèle pour les liquides industriels. Ces tendances restent toutefois à vérifier en installation de plus grandes tailles.

### Nomenclature

$d_0$	Diamètre de l'orifice	(mm)	$u_{G0}$	Vitesse d'éjection du gaz	(m/s)
$d_{eq,i}$	Diamètre équivalent de la bulle i	(mm)	$v_B$	Vitesse des bulles	(m/s)
$d_{10}$	Diamètre moyen des bulles	(mm)	We	Nombre de Weber	(-)
$d_{32}$	Diamètre de Sauter des bulles	(mm)	$\mu_G$	Viscosité du gaz	(Pa.s)
N	Nombre de bulles traitées	(-)	$\rho_G$	Masse volumique de gaz	(kg/m <sup>3</sup> )
Re	Nombre de Reynolds	(-)	$\sigma$	Tension superficielle	(N/m)

### Références

- Blass E., 1990, Formation and coalescence of bubbles and droplets, Int. Chem. Eng., 30, 206.  
 Chaudhari, R.V., H. Hofmann, 1994, Coalescence of gas bubbles in liquids, Rev. Chem. Eng., 10, 131.  
 Chaumat, H., 2004, Hydrodynamique locale et globale d'une colonne à bulles en conditions industrielles, thèse, INPT, France.  
 Krzan, M., K. Malysa, 2002, Profiles of local velocities of bubble in n-butanol, n-hexanol and n-nonanol solutions, Colloids and Surfaces, A: Physicochem. and Eng. Aspects, 207, 279.  
 Lage, P.C., R.O. Esposito, 1999, Experimental determination of bubble size distributions in bubble columns: prediction of mean bubble diameter and gas hold-up, Powder technology, 101, 142.  
 Moustiri, S., G. Hébrard, S.S. Thakre, M. Roustan, 2001, A unified correlation for predicting liquid axial dispersion coefficient in bubble columns, Chem. Eng. Sci., 56, 1041.  
 Rübiger N., A. Volgelpohl, 1986, Calculation of bubble size in the bubble and jet regimes for stagnant and flowing Newtonian liquids, Ger. Chem. Eng., 6, 173.  
 Schäfer, R., C. Merten, G. Eigenberger, 2002, Bubble size distributions in a bubble column reactor under industrial conditions, Exp. Thermal and Fluid Sci., 26, 595.  
 Waldie, B., T. Johnson, W.K. Harris, C. Bell, 1999, Bubble characteristics in a high-density gas-liquid contactor, Chem. Eng. Sci., 54, 5319.