

# Écoulement gaz–liquide dans un milieu poreux confiné : caractérisation par analyse d’images

Thomas Busser<sup>1</sup>, Barbara Pascal<sup>1</sup>, Nelly Pustelnik<sup>1</sup>, Patrice Abry<sup>1</sup>, Marion Serres<sup>1,2,3</sup>, Régis Philippe<sup>2</sup> & Valérie Vidal<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique, UMR-CNRS 5672, École normale supérieure de Lyon, Université de Lyon, 46, Allée d’Italie, 69364 Lyon, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie des Procédés Catalytiques, CNRS UMR 5285, CPE Lyon, UCBL, Univ.Lyon, 43 bd du 11 novembre 1918, 69616 Villeurbanne, France

<sup>3</sup> IFPEN - IFP Énergies nouvelles, Rond-point de l’échangeur de Solaize, 69360 Solaize, France

thomas.busser@ens-lyon.fr

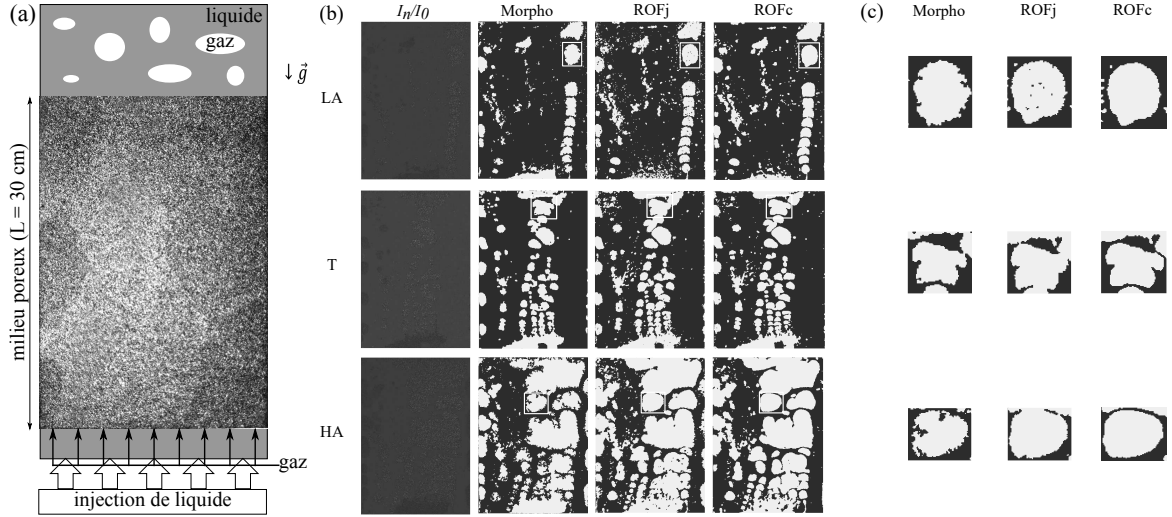
**Résumé.** Un écoulement conjoint gaz–liquide dans un milieu poreux quasi-2D conduit à trois régimes hydrodynamiques suivant la valeur des débits imposés. L’analyse des images met en évidence la difficulté d’un algorithme morphologique classique à détecter précisément le contour et la structure des bulles. Nous introduisons deux méthodes plus sophistiquées permettant d’obtenir des contours plus réalistes et comparons quantitativement ces trois méthodes. L’étude statistique des propriétés des bulles permet de déterminer les tailles typiques des bulles dans les différents régimes d’écoulement, ainsi que le périmètre global, caractéristique des interfaces. Ce dernier semble atteindre un minimum pour le régime de transition, dû à la coalescence de bulles dans le système.

**Abstract.** A joint gas–liquid flow through a quasi-2D porous medium leads to three hydrodynamic regimes depending on the imposed gas and liquid flow rates. The image analysis highlights the difficulty of a classical morphological algorithm in accurately detecting the bubbles contour and structure. We introduce two more sophisticated methods leading to more realistic contours, and compare quantitatively these three methods. The statistical properties of the bubbles make it possible to determine the typical bubble sizes in the different flow regimes and the global perimeter, characteristic of the interfaces. This latter seems to exhibit a minimum for the transition regime, due to bubble coalescence in the system.

## 1 Introduction

Les écoulements multiphasiques dans des milieux poreux sont très largement répandus, allant des processus naturels (liquéfaction des sols, fracture hydraulique, éruptions volcaniques) aux processus industriels (réacteurs catalytiques, extraction assistée de pétrole). Les enjeux de leur compréhension sont donc multiples et pluridisciplinaires : génie des procédés (optimisation de procédés catalytiques, procédés de filtration) [1], géophysique [2], etc. Dans toutes ces applications, les interfaces de contact entre les différentes phases jouent un rôle crucial sur l’écoulement et les réactions chimiques possiblement associées. Leur position et leur dynamique restent cependant très difficiles à quantifier [3]. Dans ce contexte, les expériences de laboratoire peuvent apporter des éléments fondamentaux pour comprendre et prédire l’hydrodynamique de ces écoulements complexes [4, 5].

Nous étudions ici un écoulement 2D gaz–liquide conjoint à travers une mousse solide à cellules ouvertes de grande porosité ( $\sim 90\%$ ) qui pourrait être utilisée en tant que catalyseur pour des réactions gaz–liquide [1, 6, 7]. L’expérience mise en place permet d’étudier l’hydrodynamique de l’écoulement et de mettre en évidence différents régimes. Nous comparons trois algorithmes différents pour analyser les images et distinguer les phases liquide et gaz dans le milieu poreux. Nous nous intéressons ensuite aux propriétés des bulles (fraction de gaz, diamètre équivalent, périmètre) afin de discuter l’efficacité de chaque méthode et d’améliorer la compréhension de la physique du système.



**FIGURE 1.** (a) Schéma du dispositif expérimental avec une image brute. (b) Exemple d'analyse d'images pour les trois régimes observés (LA = faible activité, T = transition, HA = forte activité) pour les trois méthodes développées. La colonne de gauche correspond à l'image brute  $I_n$  divisée par l'image de référence  $I_0$ . Les trois autres images correspondent aux résultats d'analyse avec les différents algorithmes de traitement. En bleu (sombre) : le liquide. En jaune (clair) : le gaz. (c) Zoom sur les bulles encadrées dans la figure (b).

## 2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est une cellule de Hele-Shaw verticale (Fig. 1(a)) de dimensions 40 cm (hauteur)  $\times$  20 cm (largeur)  $\times$  2 mm (espacement entre les plaques). Chacun des deux panneaux de verre, d'une épaisseur de 6 mm, est scellé avec un cadre en PEEK (polyétheréthercétone), un polymère thermoplastique utilisé pour sa bonne résistance mécanique et chimique. Le milieu poreux est une mousse métallique solide à cellules ouvertes (NiCrFeAl, Alantum, porosité 90 %) de hauteur  $L \simeq 30$  cm, placée juste au-dessus des injecteurs et occupant toute la section de la cellule. Le liquide (eau déionisée) est injecté à un débit constant,  $Q_L$ , au moyen d'une pompe à entraînement magnétique (Bronkhorst Tuthill DXS1.6PPT2NNM103) et d'un régulateur de débit Coriolis (Bronkhorst CORI-FLOW) pour assurer un écoulement stable du liquide dans la cellule. Le gaz (air) est envoyé à débit constant  $Q_G$ , à l'aide d'un régulateur de débit (Alicat MC-5SLM-D/CM-C2M), dans neuf injecteurs en base de la mousse, assurant une répartition homogène. Les débits sont compris dans les gammes suivantes :  $100 \leq Q_L \leq 1000$  mL/min et  $100 \leq Q_G \leq 1900$  mL/min. L'éclairage en transmission est assuré par un panneau lumineux (Euroshop LED) placé derrière la cellule, permettant une visualisation directe de l'écoulement à travers le milieu poreux (Fig. 1(a)). L'acquisition d'images est réalisée par une caméra monochrome (Basler, CMOS 1", 2048  $\times$  2048 pixels), couplée à un objectif 16 mm, avec une fréquence de 100 images/s.

Nous étudions ici trois couples de débits de liquide et de gaz correspondant à l'observation de trois régimes différents [8]. À bas débits ( $Q_G = 300$  mL/min,  $Q_L = 300$  mL/min), le régime de faible activité (LA) est marqué par la présence de petites bulles ; lorsque l'on augmente les débits ( $Q_G = 400$  mL/min,  $Q_L = 700$  mL/min), on observe un régime de transition dans lequel une population de grosses bulles apparaît ; à hauts débits ( $Q_G = 1200$  mL/min et  $Q_L = 300$  mL/min), le régime de forte activité est principalement caractérisé par de grosses bulles.

## 3 Méthodologie

### 3.1 Détection des bulles

La figure 1(b), gauche, présente les images obtenues en divisant l'image brute  $I_n$  par l'image de référence  $I_0$  correspondant à l'image initiale de la mousse envahie par le liquide seulement (pas de gaz

dans le système). À partir de ces images, trois méthodes d’analyse ont été développées et testées sous MATLAB (Mathworks  $\text{\textcircled{R}}$ ) :

- **Analyse morphologique** : Cette méthode est basée sur une double binarisation et l’emploi d’outils morphologiques successifs (érosion, dilatation, remplissage). Elle est fortement dépendante des seuils utilisés, qui nécessitent un réglage à la main pour chaque série de données. Les segmentations en deux régions sont présentées par les images binaires (0 pour le liquide et 1 pour le gaz) de la figure 1 (b).

- **ROFj et ROFc** : Deux méthodes de segmentation d’images texturées, basées sur un modèle de texture invariante d’échelle, sont envisagées. L’invariance d’échelle est caractérisée par le comportement linéaire en l’échelle  $j \in \{j_1, \dots, j_2\}$  :  $\mathcal{X}_{\underline{n},j} = v_{\underline{n}} + jh_{\underline{n}}$  (**RL**), en chaque pixel  $\underline{n}$ , où  $\mathcal{X}_{\underline{n},j}$  est une quantité multi-échelle calculée à partir de la transformée en ondelettes de l’image. Suivant [9], une texture homogène est une région de l’image de  $h$  et  $v$  constants. La segmentation vise donc à obtenir des estimées de  $v$  et  $h$  (sous forme de matrices agrégeant l’information en tous les pixels) constantes par morceaux (c.p.m.). La régularité locale  $h$  et le paramètre  $v$  (lié à la variance locale) sont estimés conjointement par la résolution d’un problème d’optimisation de la forme

$$(\hat{v}, \hat{h}) = \arg \min_{v, h} \sum_{j=j_1}^{j_2} \|\mathcal{X}_j - v - jh\|_2^2 + \Psi(v, h)$$

réalisant un compromis entre un terme de moindres carrés de fidélité au modèle (**RL**) et une pénalisation  $\Psi$  favorisant le caractère c.p.m. ROFj et ROFc correspondent à des pénalisations  $\Psi$  différentes

$$\text{ROFj} : \Psi_j(v, h) = \lambda(\text{TV}(v) + \alpha\text{TV}(h)) \quad \text{et} \quad \text{ROFc} : \Psi_c(v, h) = \lambda\text{TV}_\alpha(v, h)^1.$$

$\Psi_j$  favorise indépendamment le caractère c.p.m. de  $\hat{v}$  et  $\hat{h}$ , tandis que  $\Psi_c$  couple fortement les variations de  $\hat{v}$  et  $\hat{h}$  et favorise la coïncidence des régions pour  $\hat{v}$  et  $\hat{h}$ . Une courte étape de binarisation permet d’obtenir les segmentations gaz–liquide proposées en Fig. 1 (b) à partir des estimées  $\hat{v}$  et  $\hat{h}$  c.p.m.

Si ROFj et ROFc ont l’avantage de proposer une description mathématique bien adaptée aux textures d’images d’écoulement, leur principale difficulté repose dans le choix des paramètres de régularisation  $\lambda$  et  $\alpha$  qui pilotent le compromis entre le respect du modèle et le caractère c.p.m. Pour chaque série, l’étude de la première image fournit un couple de paramètres  $(\lambda, \alpha)$  satisfaisant, qui est fixé pour le reste de la série.

## 3.2 Statistiques et propriétés des bulles

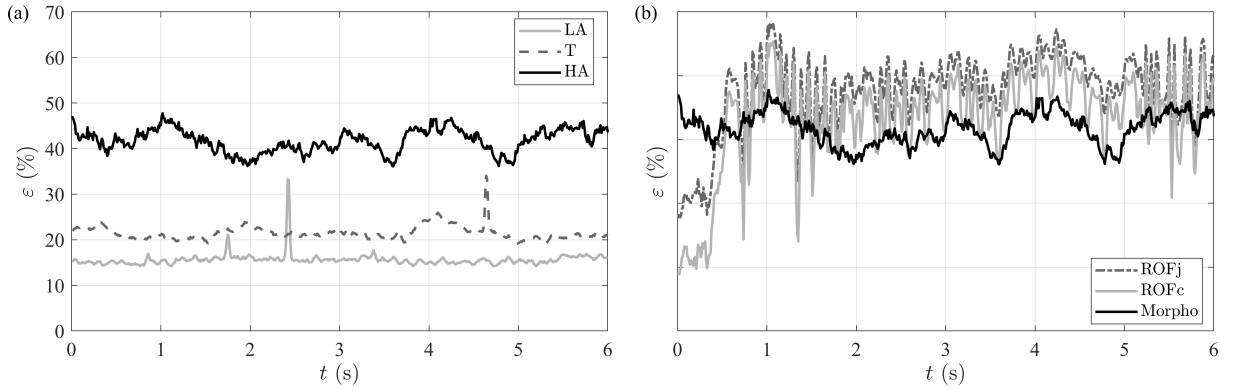
À partir des images analysées, nous utilisons l’algorithme « regionprops » de MATLAB (Mathworks  $\text{\textcircled{R}}$ ) pour détecter les bulles dans l’image et extraire le périmètre ( $P_b$ ) et l’aire ( $A_b$ ) de chaque bulle. Le diamètre équivalent des bulles est déduit de l’aire :  $d = \sqrt{4A_b/\pi}$ . Nous déterminons également pour chaque image le périmètre des interfaces gaz–liquide ( $P$ ) et l’aire totale de gaz ( $A$ ) en sommant les périmètres et les aires de chaque bulle de l’image. On en déduit alors la fraction totale de gaz dans une image,  $\varepsilon$ , ainsi que la fraction de gaz associée à chaque bulle,  $\varepsilon_b$ .

## 4 Résultats et discussion

### 4.1 Détection des bulles

La comparaison des algorithmes pour la détection des bulles, présentée sur la figure 1 (b) et les zooms sur la figure 1 (c), montrent tout d’abord que le contour des bulles est plus segmenté avec l’analyse morphologique qu’avec les algorithmes ROFj et ROFc, notamment pour les régimes LA et HA. Cela peut fortement impacter l’estimation des périmètres  $P_b$  et  $P$ . De plus, on voit que les résultats obtenus

<sup>1</sup> Pour une image  $\mathbf{x}$ , soit  $\mathbf{H}\mathbf{x}$  (resp.  $\mathbf{V}\mathbf{x}$ ) son gradient horizontal (resp. vertical). On définit la *variation totale*  $\text{TV}(\mathbf{x}) := \sum_{\underline{n}} \sqrt{(\mathbf{H}\mathbf{x})_{\underline{n}}^2 + (\mathbf{V}\mathbf{x})_{\underline{n}}^2}$  et la *variation totale couplée*  $\text{TV}_\alpha(\mathbf{x}, \mathbf{y}) := \sum_{\underline{n}} \sqrt{(\mathbf{H}\mathbf{x})_{\underline{n}}^2 + (\mathbf{V}\mathbf{x})_{\underline{n}}^2 + \alpha(\mathbf{H}\mathbf{y})_{\underline{n}}^2 + \alpha(\mathbf{V}\mathbf{y})_{\underline{n}}^2}$



**FIGURE 2.** Évolution temporelle de la fraction totale de gaz  $\varepsilon$ . (a) Comparaison des résultats obtenus avec l'analyse morphologique pour les régimes de faible activité (LA), de transition (T) et de forte activité (HA). (b) Comparaison des résultats obtenus avec les différents algorithmes de traitement d'images pour le régime de forte activité (HA).

avec l'algorithme ROFj montrent des bulles de gaz pas complètement remplies par rapport aux résultats donnés par ROFc et l'analyse morphologique. Enfin, les algorithmes ROFc et en particulier ROFj font apparaître davantage de petites bulles n'existant pas dans les données expérimentales. Ces artefacts peuvent modifier les résultats des propriétés notamment pour le régime LA où il y a moins de bulles à détecter. L'algorithme ROFc semble le plus prometteur pour la détection des bulles sur une image. Dans la section suivante, nous analysons les résultats obtenus lorsqu'on applique les algorithmes sur une série de 600 images (correspondant à 6 s dans l'expérience).

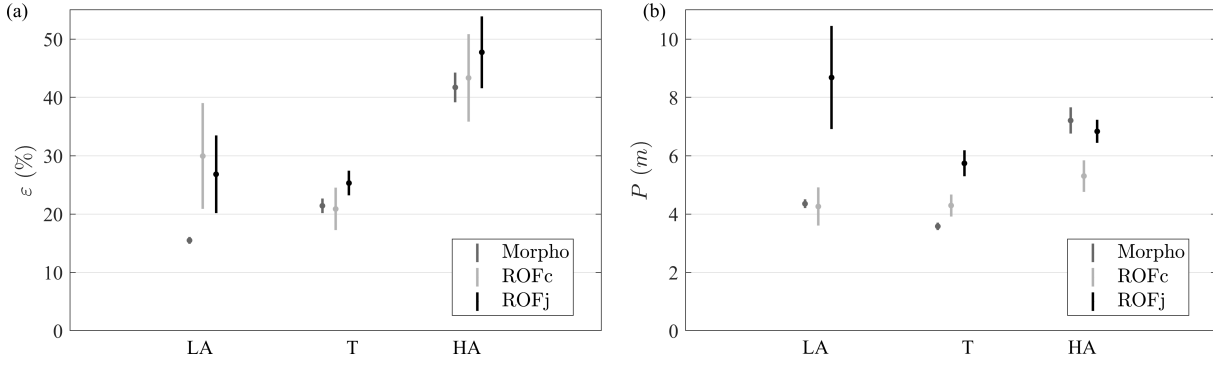
## 4.2 Stationnarité

La figure 2 (a) compare l'évolution temporelle de  $\varepsilon$  obtenue avec l'analyse morphologique pour les trois régimes. Les pics observés dans les régimes LA et T sont aisément identifiables et dus à un problème ponctuel de détection du programme. Si l'on excepte ces erreurs, on obtient un signal dont la valeur moyenne et les fluctuations augmentent avec l'activité, comme attendu physiquement. La figure 2 (b) montre l'évolution de  $\varepsilon$  pour les différentes méthodes dans le régime HA. Ces résultats mettent en évidence la présence de fluctuations brutales de la fraction de gaz estimée à partir des algorithmes ROFj et ROFc. Ce phénomène pourrait s'expliquer par une forte sensibilité des algorithmes ROFj et ROFc au réglage des paramètres de régularisation  $\lambda$  et  $\alpha$ , sensibilité amplifiée par l'étape de binarisation. En effet les paramètres  $\lambda$  et  $\alpha$  sont *fixés* pour l'ensemble de la série. Ainsi, d'une image à l'autre, ils peuvent brusquement s'avérer non satisfaisants.

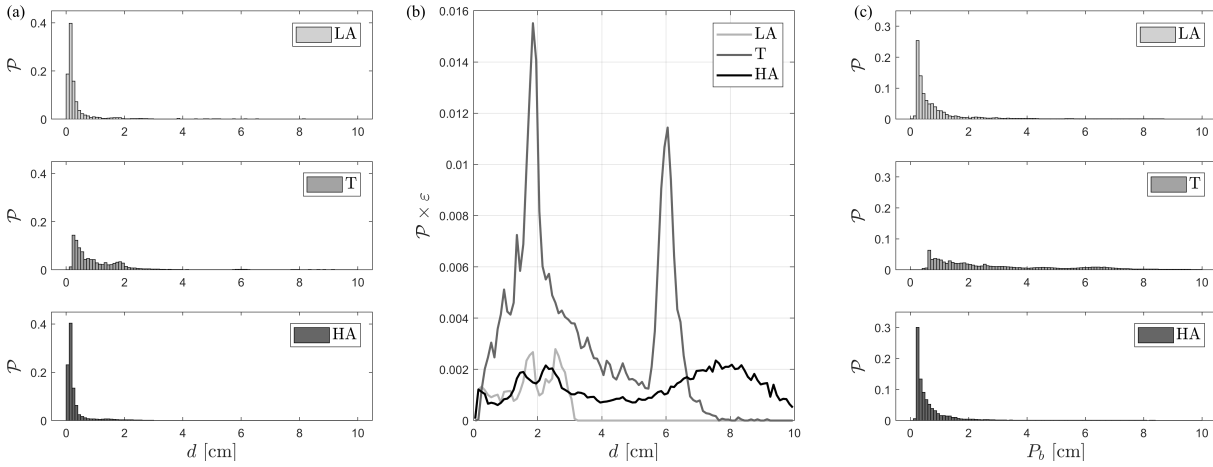
Les valeurs moyennes et écarts-types de  $\varepsilon$  pour tous les configurations (régimes et méthodes) sont tracés dans la figure 3 (a). Ces résultats confirment que les fluctuations sont largement plus grandes pour ROFj et ROFc. On observe également que mis à part le cas LA, il y a un bon accord entre les 3 méthodes pour la valeur moyenne de  $\varepsilon$ . La figure 3 (b) présente les résultats pour le périmètre total. Il est intéressant de noter que le périmètre total présente un minimum dans le régime T, dans lequel les petites bulles du régime LA commencent à coalescer avant de former dans le régime HA une population de grosses bulles. Ces résultats sont à interpréter avec précaution suite aux critiques précédentes. Il est cependant intéressant de noter que l'algorithme ROFc reste le plus prometteur, car il reproduit de manière plus réaliste le contour et l'intérieur des bulles (Fig. 1 (b) et (c)). Une étude de sensibilité de cet algorithme aux paramètres d'entrée est en cours.

## 4.3 Statistique des bulles

Les algorithmes ROFj et ROFc nécessitant encore quelques ajustements, nous présentons ici les premiers résultats sur l'étude statistique des propriétés des bulles, basée sur l'analyse morphologique. La



**FIGURE 3.** Valeurs moyennes et écarts-types obtenus avec les trois algorithmes de traitement d'images pour les différents régimes d'écoulement : (a) fraction totale de gaz,  $\varepsilon$ ; (b) périmètre total des bulles par image,  $P$ .



**FIGURE 4.** (a) Histogramme de la probabilité en nombre ( $\mathcal{P}$ ) du diamètre des bulles pour les trois différents régimes. (b) Probabilité en nombre du diamètre des bulles pondérée par la fraction de gaz pour les trois différents régimes (équivalent à une probabilité en volume). (c) Histogramme de la probabilité en nombre du périmètre des bulles  $P_b$  pour les trois différents régimes.

figure 4(a) présente les histogrammes de la probabilité en nombre ( $\mathcal{P}$ ) du diamètre  $d$  des bulles. Pour les régimes LA et HA on observe de nombreuses bulles de petit diamètre. Une grande partie d'entre elles ont une taille inférieure à la longueur capillaire et peuvent correspondre soit à des artefacts d'analyse, soit à des bulles dont le diamètre ne peut plus être déduit de la surface apparente car il devient comparable ou inférieur à l'espacement entre les deux plaques de la cellule. Cet effet est moins visible pour le régime T, la distribution de probabilité est plus étalée et laisse apparaître des bulles de plus grand diamètre. Les petites bulles sont néanmoins prépondérantes en nombre. Cela complique l'analyse statistique et ne permet pas de caractériser la taille typique des bulles dans chaque régime. Les résultats sont sensiblement les mêmes pour le périmètre des bulles (Fig. 4(c)).

Afin de s'affranchir de la présence de ces nombreuses petites bulles, on pondère la probabilité en nombre  $\mathcal{P}$  par la fraction de gaz des bulles  $\varepsilon_b$  afin d'obtenir une probabilité en volume,  $\mathcal{P} \times \varepsilon_b$  (Fig. 4(b)). Le régime LA est caractérisé par des bulles de 2 cm de diamètre typiquement. On voit ensuite apparaître une population de bulles plus grosses dans le régime T,  $d \simeq 6$  cm. Pour ce régime la probabilité est la plus grande pour les deux populations de bulles. Ces résultats confirment bien la transition entre le régime de faible et de forte activité avec deux types de population de bulles. Le régime HA est quant à lui caractérisé par des bulles plus grosses ( $d \simeq 8$  cm) mais conserve une population de petites bulles

( $d \simeq 2$  cm). On peut intuitivement voir une disparition de cette population de petites bulles avec une augmentation de l'activité (des débits gaz et/ou liquide).

## 5 Conclusion

L'étude expérimentale d'un écoulement gaz-liquide dans un milieu poreux en cellule de Hele-Shaw permet de mettre en évidence différents régimes hydrodynamiques par visualisation directe de l'écoulement suivant la valeur du débit de gaz et de liquide. Les images acquises par la caméra sont analysées par trois algorithmes de traitement d'images différents dont les résultats sont comparés. Ces méthodes d'analyse permettent de distinguer la position des phases liquide et gaz dans l'écoulement. L'outil d'analyse morphologique, le plus simple des trois, montre de bonnes performances dans la détection des bulles malgré des contours des bulles très segmentés, empêchant une quantification correcte des périmètres. Parmi les deux autres algorithmes, basés sur la détermination de régularité locale et la variance, l'algorithme ROFc permet d'obtenir des résultats plus précis. Bien qu'il montre en l'état des fluctuations importantes sur l'estimation de la quantité de gaz dans le système, son développement et son utilisation semblent prometteurs et font l'objet des perspectives de ce travail.

L'analyse des propriétés statistiques des bulles met en évidence les limitations actuelles des algorithmes ROFj et ROFc par rapport à l'analyse morphologique. Cette dernière montre une évolution temporelle plus stable de la fraction de gaz dans le système pour les différents régimes. Le calcul du périmètre total par image montre que le régime de transition se caractérise par une diminution du périmètre par rapport aux deux autres régimes. Enfin, une étude statistique plus poussée montre la transition entre une population de petites bulles dans le régime à faible activité, et une population de grosses bulles dans le régime de forte activité, avec une coexistence marquée dans le régime de transition.

## Références

1. J.-N. TOURVIELLE, R. PHILIPPE & C. DE BELLEFON, Milli-channel with metal foams under an applied gas-liquid periodic flow: External mass transfer performance and pressure drop, *Chem. Eng. J.*, **267**, 332–346 (2015).
2. K. R. NEWMAN *et al.*, Active methane venting observed at giant pockmarks along the U.S. mid-Atlantic shelf break, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **267**, 341–352 (2008).
3. F. J. NAVARRO-BRULL & R. GÓMEZ, Modeling pore-scale two-phase flow: How to avoid gas-channeling phenomena in micropacked-bed reactors via catalyst wettability modification, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **57**, 84–92 (2017).
4. G. VARAS, G. RAMOS, J.-C. GÉMINARD & V. VIDAL, Flow and fracture in water-saturated, unconstrained granular beds, *Front. Phys.*, **3**, 44 (2015).
5. C. P. STEMMET, J. VAN DER SCHAAF, B. F. M. KUSTER & J. C. SCHOUTEN, Solid foam packings for multiphase reactors: Modelling of liquid holdup and mass transfer, *Chem. Eng. Res. Design*, **84**, 1134–1141 (2006).
6. R. R. ZAPICO, P. MARÍN, F. V. DÍEZ & S. ORDÓÑEZ, Liquid hold-up and gas-liquid mass transfer in an alumina open-cell foam, *Chem. Eng. Sci.*, **143**, 297–304 (2016).
7. Y. LIU, D. EDOUARD, L. D. NGUYEN, D. BEGIN, P. NGUYEN, C. PHAM & C. PHAM-HUU, High performance structured platelet milli-reactor filled with supported cobalt open cell SiC foam catalyst for the Fischer-Tropsch synthesis, *Chem. Eng. J.*, **222**, 265–273 (2013).
8. M. SERRES, *Étude hydrodynamique d'un écoulement gaz-liquide dans un milieu poreux confiné*, Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Lyon, Université de Lyon (2017).
9. B. PASCAL, N. PUSTELNIK, P. ABRY, M. SERRES & V. VIDAL, Joint estimation of local variance and local regularity for texture segmentation. Application to multiphase flow characterization, in *25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Calgary, Canada, pp. 2092–2096 (2018).