

Tomographie à fils appliquée aux lits fixes : une nouvelle manière d'étudier la maldistribution du liquide

Juan-David Llamas, Cédric Pérat, François Lesage, Umberto D'Ortona, G. Wild

► To cite this version:

Juan-David Llamas, Cédric Pérat, François Lesage, Umberto D'Ortona, G. Wild. Tomographie à fils appliquée aux lits fixes : une nouvelle manière d'étudier la maldistribution du liquide. Congrès de la Société Française de Génie des Procédés., Oct 2007, Saint-Etienne, France. 96, pp.SBN 2-910239-70-5, 2007, Récents Progrès en Génie des Procédés. <hal-00369866>

HAL Id: hal-00369866

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00369866>

Submitted on 22 Mar 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Tomographie à fils appliquée aux lits fixes : une nouvelle manière d'étudier la maldistribution du liquide

Juan-David Llamas^a, Cédric Péra^a, François Lesage^{a*}, Umberto D'Ortona^b, Gabriel Wild^c

^a Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, Nancy-Université, ENSIC CNRS B.P. 20451 54001 Nancy, France

^b MSNM-CNRS IMT-La Jetée, Technopôle de Château-Gombert, 38 rue Frédéric Joliot-Curie, 13451 Marseille Cedex 20, France

^c Département de Chimie Physique des Réactions Nancy-Université, ENSIC CNRS B.P. 20451 54001 Nancy, France

Résumé

Deux systèmes de tomographie à fils ont été utilisés pour étudier la maldistribution du liquide dans un réacteur à lit fixe arrosé en écoulement à co-courant descendant de gaz et de liquide (RCLFA). La technique, qui se base sur celle utilisée par Prasser et coll. (1998) dans les colonnes à bulles, utilise deux faisceaux de fils horizontaux placés à une profondeur donnée pour détecter la présence d'un liquide conducteur entre eux. En occupant seulement 6,5% de la surface passante du réacteur, le système de tomographie à fils permet l'estimation de la rétention liquide sur un plan transversal de la colonne avec une résolution spatiale de 313 pixels. Cet article présente quelques exemples de mesures faites avec ce système à l'intérieur d'un lit fixe en utilisant différents types de distributeurs. Les résultats sont satisfaisants et font de la tomographie à fils une technique prometteuse pour l'étude de la maldistribution du liquide dans un lit fixe de particules non poreuses.

Mots-clés: trickle-bed, tomographie, maldistribution

1. Introduction

Les RCLFA sont des réacteurs triphasiques dans lesquels le gaz et le liquide circulent en écoulement cocourant descendant à travers un lit de particules solides. À cause de leurs avantages en termes de coût et de capacité, les RCLFA ont une utilisation très répandue dans l'industrie, en particulier pétrolière et pétrochimique. Les performances de ce type de réacteurs sont cependant fortement influencées par la façon dont les phases sont distribuées tout au long du lit fixe : une mauvaise distribution du liquide peut par exemple entraîner une utilisation incorrecte du catalyseur et être à l'origine de points chauds. Divers facteurs affectent la distribution du liquide dans un RCLFA, et même si une bonne répartition initiale est très importante, elle ne garantit pas une bonne distribution tout au long du lit [Marcandelli et coll. (2000)]. Suivre l'évolution du liquide à travers le lit de particules peut donc apporter des informations très importantes pour la compréhension de l'hydrodynamique dans ces réacteurs, afin de proposer des solutions technologiques aux problèmes de maldistribution.

L'écoulement du liquide dans les RCLFA a été étudié à l'aide de différentes techniques. Ravindra et coll. (1997) ont utilisé une méthode basée sur l'absorption d'encre pour étudier le comportement du liquide dans un lit rectangulaire de 6x8 cm. Après chaque expérience, la section transversale du lit était photographiée et étudiée à différentes hauteurs. Cette technique implique que les particules solides soient retirées du réacteur puis nettoyées ou remplacées après chaque expérience. Malgré l'intérêt des résultats qu'elle peut apporter, les difficultés liées à l'application de cette technique dans des réacteurs plus grands sont évidentes. D'autres exemples de techniques permettant la visualisation de la distribution des phases sur une section transversale du réacteur sont les mesures par atténuation de photons (tomographies X et γ) et l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Ces techniques ont l'avantage d'une bonne résolution spatiale tout en étant non intrusives. Quelques exemples d'application peuvent être consultés dans les publications de Boyer et coll. (2005) pour la tomographie à rayons γ , de Marchot et coll. (1999) pour la tomographie à rayons X et de Nguyen et coll. (2005) pour l'IRM. Malheureusement ces techniques présentent des inconvénients importants du point de vue de la sécurité et surtout de leur coût de mise en œuvre; elles sont en outre limitées spatialement ; l'IRM p.ex. est limitée par la taille de l'aimant utilisé. Une alternative moins onéreuse est la tomographie électrique. Les performances de cette méthode dépendent

* Auteur auquel la correspondance doit être adressée : francois.lesage@ensic.inpl-nancy.fr

néanmoins d'un algorithme de reconstruction assez compliqué et l'obtention des images avec une bonne résolution spatiale est conditionnée par une connaissance a priori de certains paramètres [Boyer et coll. (2002)]. Un exemple d'application de cette méthode est donné par Reinecke & Mewes (1997). Des améliorations concernant les algorithmes de reconstruction liés à la tomographie électrique ont été présentées récemment par l'équipe de L.S. Fan [Warsito and Fan, (2005)].

Nous présentons ici l'utilisation d'un système de tomographie à fils pour étudier la distribution du liquide dans un RCLFA. La technique utilise des mesures locales de conductivité entre deux faisceaux perpendiculaires de fils horizontaux situés dans deux plans parallèles pour déterminer la présence d'un fluide conducteur entre eux. Les principaux inconvénients de la technique sont son caractère intrusif, son incapacité à quantifier la vitesse du liquide détecté et l'impossibilité de travailler dans des lits de particules poreuses ou avec des liquides non conducteurs. Cependant, son faible coût, ainsi que la simplicité de sa mise en œuvre, font de la tomographie à fils une bonne alternative pour l'étude de la maldistribution dans les RCLFA.

2. Système de tomographie à fils

L'idée, proposée à l'origine par Johnson (1987), consiste à placer à l'intérieur d'un RCLFA deux faisceaux horizontaux de fils parallèles placés à faible distance les uns des autres, les fils du premier étant perpendiculaires à ceux du deuxième. Si un fil du premier faisceau est alimenté par un courant, ce courant pourra être détecté dans un fil du deuxième faisceau uniquement si un fluide conducteur fait la liaison entre eux. De cette façon, les mesures de conductivité entre les points d'intersection des fils des faisceaux permettent d'identifier les endroits de la colonne qui sont irrigués par le liquide (Figure 1).

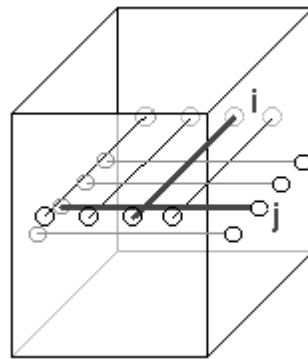


Figure 1. Faisceaux de fils dans une colonne rectangulaire. La conductivité mesurée sur le point de croisement $i - j$ dira s'il y a du liquide entre ces deux fils.

Le système de tomographie a été conçu d'après les travaux de Prasser et coll. (1998). Il est constitué de deux faisceaux de 19 fils d'acier inoxydable de 0,1cm de diamètre, donnant lieu à 313 « points de croisement » (Figure 2). Les deux faisceaux sont verticalement distants de 1cm, tandis que la distance horizontale entre deux fils d'un même faisceau est de 1,5cm. Ces distances sont le résultat d'un compromis entre le niveau d'intrusion de la méthode, la résolution spatiale, les contraintes techniques liées au maintien des fils sur un réacteur de taille relativement importante (ici, 30 cm de diamètre) et la précision des mesures. Ces distances ne sont donc pas restrictives et la conception d'un système ayant des dimensions différentes en vue de favoriser l'un ou l'autre de ces paramètres est parfaitement envisageable.

Le système de mesure comprend aussi un générateur électrique connecté à l'un des faisceaux de fils (faisceau transmetteur) qui permet de lui fournir un courant alternatif. Comme suggéré par Prasser et coll. (1998), on utilise un courant alternatif afin d'éviter des problèmes liés à l'électrolyse de l'eau. Tandis que chaque fil du faisceau transmetteur est tour à tour alimenté en courant, un circuit multiplexeur active de façon successive chacun des fils du deuxième faisceau (faisceau récepteur). Le système garantit que la conductivité est mesurée seulement à un point de croisement à la fois, les fils inactifs étant connectés à la masse du système. Le cycle de mesure prend fin une fois que tous les fils du faisceau transmetteur ont été alimentés en courant.

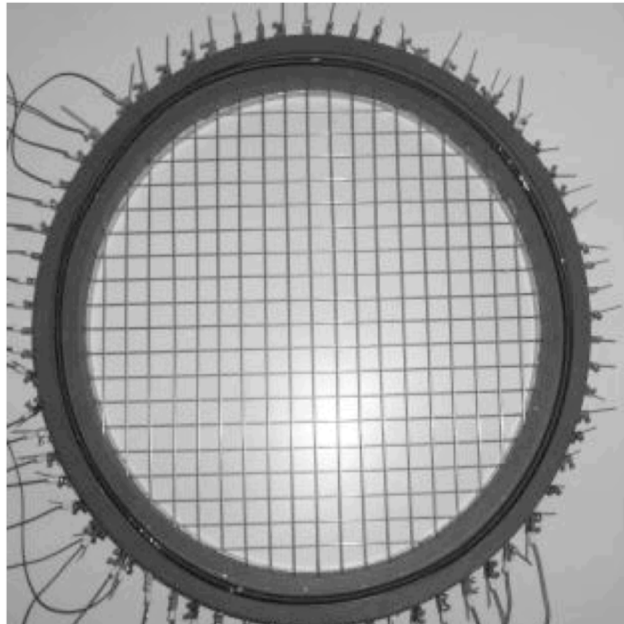


Figure 2. Système de tomographie à fils (vue supérieur).

Le temps nécessaire pour compléter un cycle dépend du nombre de points de croisement considérés. Ainsi, pour une analyse complète en utilisant les 38 fils, il faut compter entre 10 et 15 secondes. Cependant, dans le cas de la visualisation de phénomènes plus locaux, la résolution temporelle de la technique peut être améliorée en diminuant le nombre de points de croisement à mesurer. De cette façon, des temps de mesure de l'ordre du centième de seconde peuvent être atteints, si on se contente d'un seul point de croisement dans le réacteur. Le stockage des données ainsi qu'une visualisation en temps réel des mesures sont assurés par un ordinateur de bureau connecté au système.

3. Estimation de la rétention du liquide

Pour un conducteur filiforme homogène, à une température donnée, la conductance en Siemens est:

$$C = \frac{\gamma \cdot S}{L}$$

γ étant la conductivité du matériau en $(\Omega\text{m})^{-1}$, S la surface de sa section transversale en m^2 et L sa longueur en m. Si on considère que cette équation peut être utilisée pour calculer la conductance d'un filament de liquide qui s'écoule entre les deux faisceaux d'un système de tomographie à fils, la longueur L sera la distance entre les faisceaux (1cm pour la configuration actuelle) et la conductance mesurée sera seulement fonction de la surface occupée par le liquide autour du point de croisement. Ainsi, un étalonnage préalable aux mesures sera suffisant pour estimer la fraction du liquide aux alentours de chaque point de croisement. Un raisonnement de ce type avait déjà été utilisé par Prasser et coll. (1998). Il considérait la conductance comme étant proportionnelle à la quantité du liquide et estimait quantitativement cette dernière en comparant la conductance mesurée aux mesures d'étalonnage effectuées pour les situations « colonne remplie de liquide » et « colonne remplie de gaz ».

Pour avoir une idée de la fiabilité de l'approche employée, le système de tomographie à fils a été utilisé pour estimer la rétention liquide statique à l'intérieur d'un RCLFA rempli de billes de verre de 2 mm. Même si le résultat de cette expérience ne peut pas à lui seul justifier la validité de la technique, il est encourageant de trouver que les valeurs de conductance mesurées après 5 minutes d'égouttage de la colonne correspondent à une surface mouillée de l'ordre de 2-3%, ce qui est en accord avec les valeurs habituelles de rétention statique reportées pour ce type de garnissage.

4. Inconvénients du système de tomographie à fils

Même si elle a des avantages du point de vue du coût, de la simplicité ou encore de la sécurité, l'application de la tomographie à fils présente quelques inconvénients. Certains d'entre eux sont liés à la nature même du système et sont difficiles de contourner :

- *Son caractère intrusif* : deux faisceaux de fils traversant la surface passante du réacteur doivent probablement affecter l'écoulement liquide. L'effet est cependant atténué par les dimensions du système. En effet, la distance entre les faisceaux (1 cm) est supérieure au diamètre des particules (0,2 cm) tandis que le diamètre des fils est inférieur (0,1cm). Au total, environ 6,5% de la surface passante du réacteur vide est occupé par les fils.
- *Son incapacité à quantifier la vitesse du liquide* : comme il a été précisé précédemment, la conductance mesurée est fonction de la surface occupé par le liquide autour des points de croisement mais elle est indépendante de sa vitesse.
- *L'impossibilité de travailler avec des particules poreuses* : une fois mouillées, les particules poreuses restent imbibées de liquide et deviennent conductrices. Le système de tomographie à fils ne peut donc pas faire la différence entre un empilement de particules poreuses mouillées et un filet de liquide s'écoulant à travers le lit.

Certains autres inconvénients ont été détectés après la réalisation de quelques expériences. Ils concernent pour la plupart le fait que, dans certaines conditions, un courant peut être mesuré entre deux points même si il n'y a pas de liquide entre eux. Ce phénomène a été appelé « communication croisée » d'après le terme anglais « cross-talk » utilisé par Prasser et coll. (1998), traduit de l'allemand « Übersprechen ».

Pour notre dispositif, les problèmes de communication croisée sont pour la plupart liés au fait que la distance entre les fils d'un même faisceau (1,5cm) n'est pas suffisamment importante par rapport à la distance entre les faisceaux (1cm). De plus, une partie du liquide reste toujours coincée aux jointures des grains (rétention statique), ce qui permet au courant de se transmettre horizontalement avec une résistance qui n'est pas infinie par rapport à la résistance du déplacement vertical. Deux exemples de ce type de comportement sont présentés par la suite.

4.1 Influence d'un point de croisement irrigué sur ses voisins

À cause des forces capillaires, une petite quantité d'eau reste toujours coincée autour des particules solides (rétention statique) et donc, une conductance faible (résistance importante) peut être mesurée même en absence d'un flux de liquide. La présence d'un filament du liquide sur un point de croisement diminue fortement sa résistance, et ce faisant crée un chemin avec une résistance inférieure vers les points de croisement voisins. La Figure 3 et la Figure 4 schématisent cet événement. Dans ce cas hypothétique, la zone autour du point de croisement 1A (le fil « 1 » du premier faisceau avec le fil « A » du deuxième) est remplie de liquide, tandis que celle autour de son voisin 2A, ne contient que le liquide issu de la rétention statique. Le chemin pour aller du fil « 2 » au fil « A » en passant par les résistances R2 et R3 (dont la somme est inférieure à R4) est créé par la présence du liquide sur le point de croisement 1A et va augmenter la conductance du point de croisement 2A. En faisant des mesures dans une colonne humide (sans écoulement de liquide) et en faisant l'hypothèse selon laquelle la surface du chemin de liquide créé par la rétention statique est indépendante de la direction, les résistances R1, R2, R3 et R4 peuvent être estimées. Le résultat de cette estimation donne pour le point de croisement 2A une conductance qui équivaut à environ 9% de la conductance du point 1A, alors qu'elle ne serait que de l'ordre de 3% s'il n'y avait pas d'interférence.

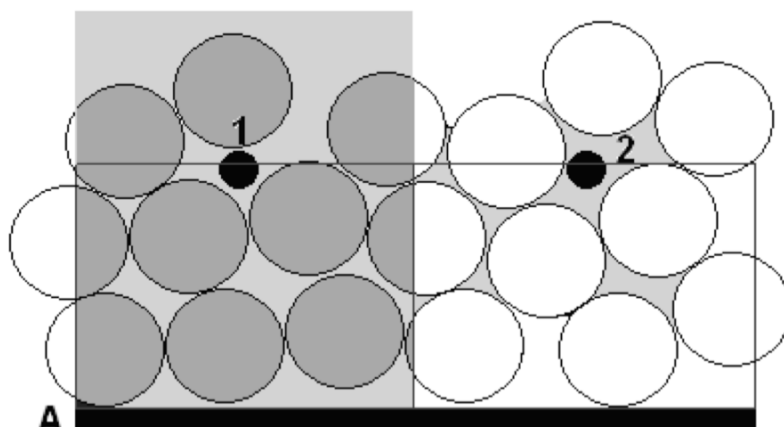


Figure 3. Situation hypothétique: écoulement de liquide au point de croisement 1A, rétention statique seule au point 2A

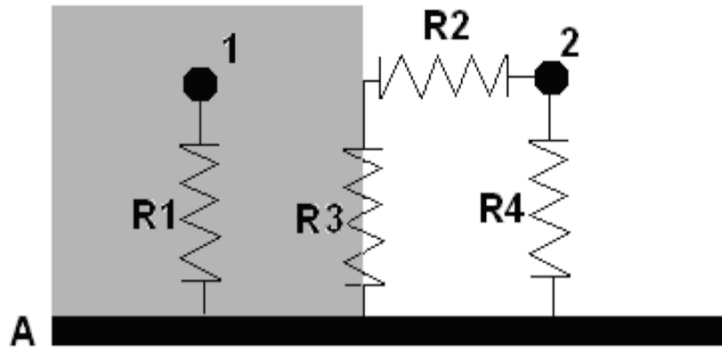


Figure 4. Représentation de la Figure 3 sous la forme d'un circuit électrique.

Vues les hypothèses faites, le résultat du calcul précédent doit être traité avec une extrême précaution. Cependant, il est important de remarquer que la conductance obtenue avec ce calcul correspond au pire des cas : un point de croisement ne pourra que rarement être saturé de liquide à 100% tout en ayant un voisin pour lequel le flux de liquide est nul.

4.2 Ecoulement en anneau

L'écoulement en anneau est autre exemple de communication croisée où le courant peut aller d'un fil du premier faisceau à un fil du deuxième sans qu'il n'y ait de liquide autour du point de croisement entre les deux. Une partie de la colonne soumise à ce type d'écoulement est représentée sur la Figure 5. Dans ce cas, le point de croisement 3B (point gris) n'est pas irrigué mais le courant peut aller du fil B au fil 3 en passant par la zone irriguée (en suivant, par exemple, le chemin indiqué par la flèche). Si le rapport entre la distance entre les fils d'un même faisceau et la distance entre les faisceaux n'est pas assez grand, la conductance mesurée pour le point 3B sera similaire à celles mesurées pour des points qui sont vraiment irrigués. En suivant des hypothèses comme celles utilisées au paragraphe 4.1, une conductance d'environ 60% de celle obtenue pour un point de croisement complètement irrigué est mesurée pour le point 3B. Ce résultat est de caractère purement indicatif et doit, une fois de plus, être utilisé avec une extrême précaution. En effet, l'hypothèse qui consiste à considérer la surface du filet de liquide comme étant indépendante de la direction est assez forte quand on considère une colonne vraiment irriguée.

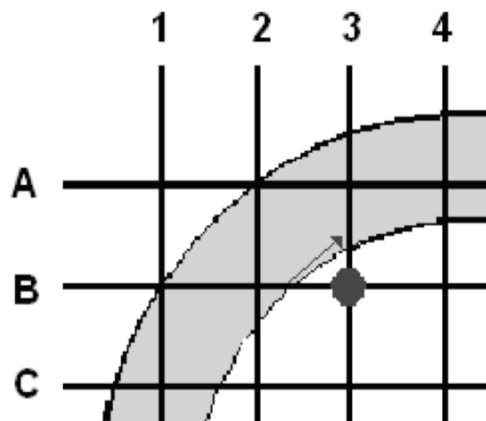


Figure 5. Ecoulement en anneau.

Les cas présentés aux paragraphes 4.1 et 4.2 sont des exemples des difficultés qui peuvent apparaître lors de l'utilisation de la tomographie à fils dans un RCLFA. Ces problèmes doivent cependant se limiter aux points de croisement qui se trouvent au voisinage immédiat des points de croisement vraiment irrigués. Pour des points de croisement plus lointains, la résistance augmente de façon proportionnelle à l'éloignement, et une grande partie du courant sera évacuée par des fils plus proches, qui sont connectés à la masse du système. On peut donc conclure que la communication croisée peut réduire légèrement la résolution spatiale de la mesure (en surestimant la fraction de liquide présente sur certains points de croisement), sans empêcher pour autant l'identification des principales caractéristiques de l'écoulement liquide.

Pour finir, notons qu'un rapport plus important entre la distance entre les fils d'un même faisceau et la distance entre les faisceaux devrait éliminer (ou du moins réduire significativement) les problèmes liés à la communication croisée.

5. Tomographie à fils appliqué aux RCLFA: Exemples d'application

5.1 Dispositif expérimental

Un réacteur en PVC de 30 cm de diamètre a été utilisé pour les expériences. Le réacteur était rempli avec de billes de verre de 2 mm sur une hauteur de 130 cm pour une porosité moyenne d'environ 0,39. Deux systèmes de tomographie à fils et un collecteur de liquide placés respectivement à 33, 96 et 130 cm de la tête du lit étaient utilisés pour étudier la distribution du liquide. Le collecteur, représenté sur la Figure 6 est divisé en 9 zones de surfaces égales. Toutes les expériences ont été réalisées en écoulement de liquide seul. Trois distributeurs de liquide différents ont été utilisés. Le premier (distributeur 1), ayant seulement une entrée centrale de 2,5 cm de diamètre, le deuxième (distributeur 2) avec, en plus de l'entrée centrale, une entrée excentrée de la même taille et à 10 cm de la première et le troisième (distributeur 3), avec douze entrées de liquide de 0,7 cm disposées de façon à former une circonférence de 20 cm de diamètre.

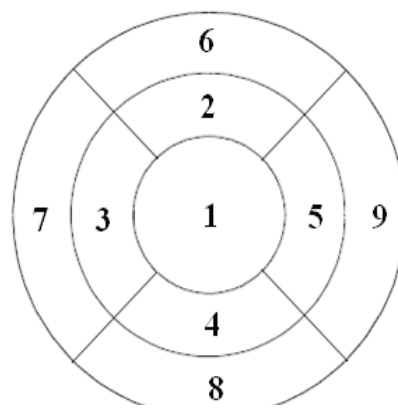


Figure 6. Collecteur de liquide à 9 zones.

5.2 Estimation des rétentions locales et visualisation de la distribution du liquide

La distribution du liquide a été observée en utilisant chacun des trois distributeurs présentés précédemment. Pour les mesures avec les distributeurs 1 et 2, on a utilisé un débit de $1,7\text{kg/m}^2\text{s}$, et de $2,2\text{kg/m}^2\text{s}$ pour le distributeur 3, dont les entrées sont plus nombreuses. Le choix de ces débits est fait de façon à ce que, tout en essayant d'irriguer toutes les entrées d'un distributeur donné avec la même intensité, le liquide n'occupe pas la totalité de la section transversale du réacteur avant le premier dispositif de tomographie à fils (à 33cm du distributeur). Les résultats de ces expériences sont présentés dans la Figure 7. Dans la figure, la première rangée d'images correspond aux distributeurs utilisés. La deuxième et la troisième rangées correspondent aux images obtenues avec les deux systèmes de tomographie à fils, à 33 et 96cm du distributeur respectivement. La quatrième rangée correspond aux résultats du deuxième système de tomographie à fils (à 96cm du distributeur) en regroupant les mesures en 9 zones de façon à faciliter la comparaison avec le collecteur de liquide dont les résultats sont présentés dans la dernière rangée.

En un point de croisement donné, nous désignons comme rétention de liquide le rapport de la conductance en condition de fonctionnement à la conductance mesurée lorsque la colonne est entièrement remplie d'eau. Pour les mesures avec la tomographie à fils, chaque point de croisement est coloré en fonction de sa rétention liquide. Les valeurs inférieures à 6% ne sont pas prises en compte (sont colorées en blanc) car elles sont proches des valeurs de la rétention statique et peuvent donc être le résultat d'interférences telles que celles décrites au paragraphe 4. En ce qui concerne les images des deux dernières rangées, chaque zone est colorée en fonction de la quantité de liquide (ou de flux de liquide en ce qui concerne le collecteur) qu'elle contient, par rapport à la quantité totale de liquide.

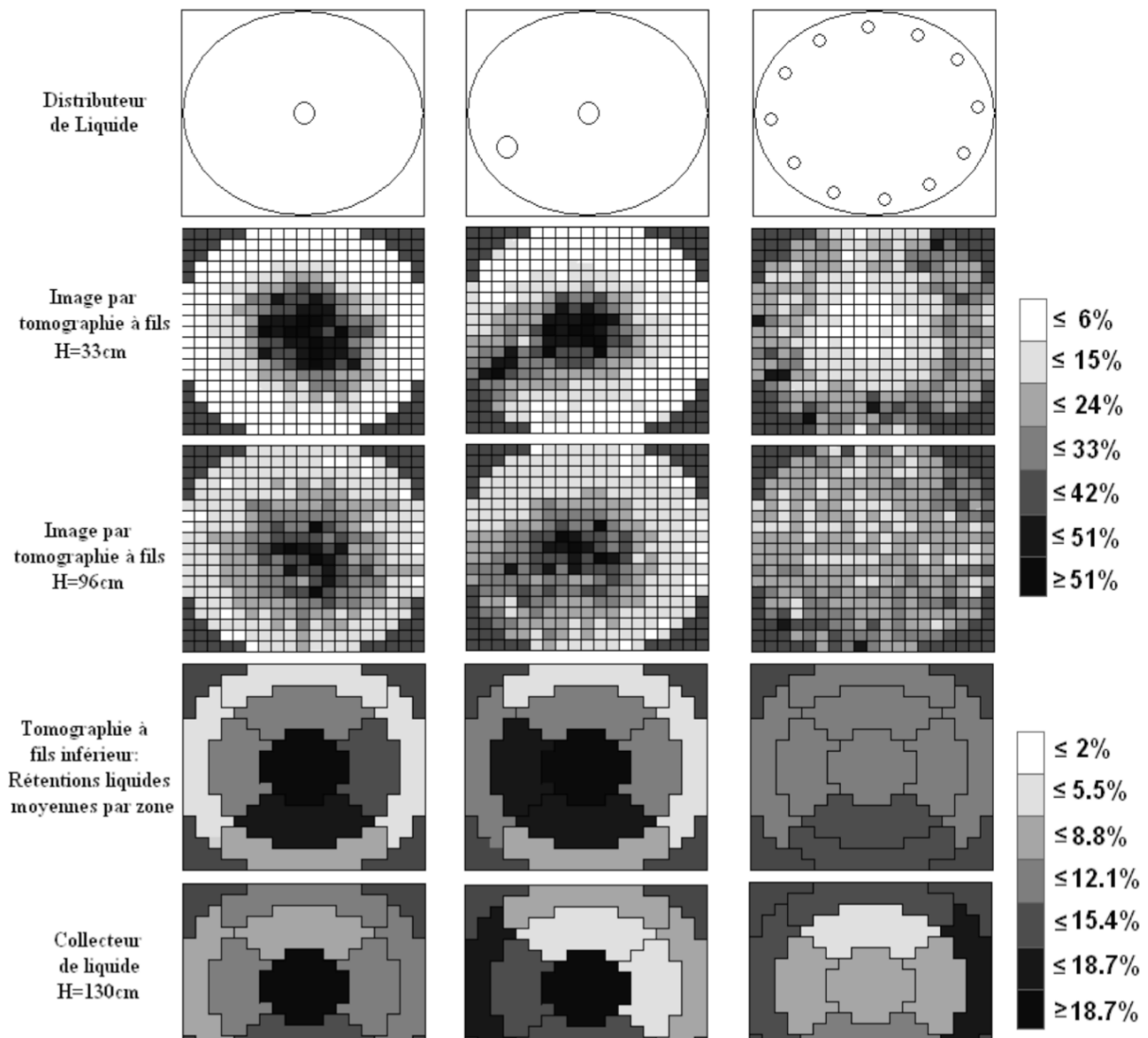


Figure 7. Distribution du liquide pour 3 distributeurs différents. Chaque colonne représente les images obtenues pour le distributeur schématisé sur la première rangée.

Du point de vue qualitatif, les images correspondant aux systèmes de tomographie à fils sont satisfaisantes. Avec le premier système, à 33cm du distributeur, on obtient des images de distributions de liquide assez semblables à celles imposées par les distributeurs. L'effet de la distribution radiale du liquide est de son côté, mis en évidence par le deuxième système de tomographie à fils (à 96 cm du distributeur). Les images obtenues à ce niveau montrent une meilleure répartition des phases, avec une nette diminution des zones à forte concentration du liquide (situées sous les points d'entrée du liquide) au profit des zones initialement sèches dont la rétention se voit légèrement augmentée.

L'analyse quantitative des images est plus complexe. En effet, la difficulté à mesurer la rétention du liquide locale à l'intérieur d'un RCLFA, difficulté qui a par ailleurs été à l'origine du développement de cette technique, fait que l'on ne dispose pas d'un moyen de vérification exacte du point de vue quantitatif. En vue d'approcher cette vérification, les mesures avec le collecteur de liquide ont été réalisées. Ces mesures ont deux inconvénients de taille : le premier est que, en étant placé 34 cm en dessous du deuxième système de tomographie à fils, les mesures du collecteur sont affectées d'une dispersion radiale plus importante. Le deuxième, est que le collecteur de liquide mesure des débits de liquide tandis que les mesures de la tomographie à fils sont des mesures de rétention. Ces précisions faites, il reste néanmoins possible de faire quelques observations. Avec le distributeur 1, une répartition semblable est observée avec le deuxième dispositif de tomographie à fils et le collecteur de liquide. En effet, dans le deux cas, la zone centrale (zone 1) est la plus irriguée, avec ensuite, une légère préférence, issue peut-être de la topologie du solide pour la zone 4. Il est important de remarquer aussi que certaines différences peuvent s'expliquer tout simplement par la dispersion radiale du liquide. Ainsi, les zones 1,

2, 3, 4 et 5 se trouvant le plus près du point d'alimentation, apparaissent avec des pourcentages de liquide plus élevés sur la tomographie à fils que sur le collecteur. Pour les zones extérieures (6, 7, 8, et 9), c'est le cas contraire. Ceci reproduit le comportement observé avec les deux systèmes de tomographie à fils, à savoir, une diminution des zones à forte concentration de liquide au profit des zones plus pauvrement irriguées comme conséquence de la dispersion radiale du liquide. Dans le cas du distributeur 2, les zones se trouvant sous les points d'alimentation sont les zones les plus irriguées, aussi bien pour la tomographie à fils que pour le collecteur. Le phénomène de dispersion radiale est aussi observé dans ce cas, avec des valeurs mesurées par la tomographie à fils qui sont nettement plus faibles pour les zones centrales (qui est, comme on peut l'observer sur l'image en $Z=33\text{cm}$, plus irriguée que la zone correspondant à l'entrée excentrée de liquide – peut être à cause d'un défaut du distributeur) que pour les zones extérieures. Pour le distributeur 3, les considérations concernant la dispersion radiale sont, en raison du nombre d'entrées, plus compliquées. Il est cependant possible de remarquer la concentration du liquide pour les zones 4 et 8 avec la tomographie à fils ou avec le collecteur.

6. Conclusions

Une nouvelle façon d'étudier la maldistribution du liquide dans les RCLFA a été présentée. Le système conçu permet de visualiser la distribution du liquide pour une section transversale du réacteur avec une résolution spatiale raisonnable, tout en évitant l'utilisation d'algorithmes de résolution complexes. Même en étant intrusive et incapable de quantifier les débits locaux du liquide, son faible coût et sa simplicité font de la tomographie à fils une bonne alternative pour la visualisation de la distribution du liquide à l'intérieur d'un lit fixe. Comme un exemple des capacités de la technique, le système a été utilisé pour observer la distribution du liquide imposée par trois distributeurs différents. Les résultats sont satisfaisants et encouragent le développement de la technique.

Bibliographie

- Boyer C., Duquenne A-M. & Wild G. (2002). Measuring techniques in gas-liquid and gas liquid-solid reactors. *Chemical Engineering Science*, 57, 3185-3215.
- Boyer C., Koudil A., Chen P. & Dudukovic M.P. (2005). Study of liquid spreading from a point source in a trickle bed via gamma-ray tomography and CFD simulation. *Chemical Engineering Science*, 60, 6279-6288.
- Johnson ID (1987). Method and apparatus for measuring water in crude oil. United States Patent, No 4,644,263.
- Marcandelli C., Lamine A.S., Bernard J.R. & Wild G. (2000). Liquid distribution in trickle-bed reactor. *Oil & Gas Science and Technology*, 55 (4) 407-415.
- Marchot P., Toye D., Crine M., Pelsser A-M. & L'Homme G. (1999). Investigation of liquid maldistribution in packed columns by X-ray tomography. *Transactions of the Institution of chemical Engineers*, 77, 511-518.
- Nguyen N.L., van Buren V., von Garnier A., Hardy E.H. & Reimert R. (2005). Application of magnetic resonance imaging (MRI) for investigation of fluid dynamics in trickle bed reactors and of droplet separation kinetics in packed beds. *Chemical Engineering Science*, 60, 6289-6297.
- Prasser H.-M., Böttger A. & Zschau J. (1998). A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 9, 111-119.
- Ravindra P.V., Rao D.P. & Rao M.S. (1997). Liquid flow texture in trickle-bed reactors: an experimental study. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 36, 5133-5145.
- Reinecke N. & Mewes D. (1997). Investigation of the two-phase flow in trickle-bed reactors using capacitance tomography. *Chemical Engineering Science*, 52, 2111-2127.
- Warsito W. & Fan L.S. (2005). Dynamics of spiral bubble plume motion in the entrance region of bubble columns and three-phase fluidized beds using 3D ECT. *Chemical Engineering Science*, 60, 6073-6084.