



**HAL**  
open science

## Etude par CFD de l'influence des internes sur l'hydrodynamique monophasique d'une colonne

Rodolphe Sardeing, Hélène Chaumat, Anne-Marie Billet

► **To cite this version:**

Rodolphe Sardeing, Hélène Chaumat, Anne-Marie Billet. Etude par CFD de l'influence des internes sur l'hydrodynamique monophasique d'une colonne. *Récents Progrès en Génie des Procédés*, 2005, 92. hal-04775420

**HAL Id: hal-04775420**

**<https://hal.science/hal-04775420v1>**

Submitted on 10 Nov 2024

**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.

## **Etude par CFD de l'influence des internes sur l'hydrodynamique monphasique d'une colonne**

SARDEING Rodolphe, CHAUMAT Hélène et BILLET-DUQUENNE Anne-Marie\*

Laboratoire de Génie Chimique

5, Rue Paulin Talabot – B.P. 1301 – 31106 TOULOUSE Cedex 1 – France

### **Résumé**

Le pilote d'un procédé industriel de type colonne verticale est étudié par mécanique des fluides numérique (CFD) dans l'objectif de déterminer l'influence sur l'hydrodynamique des internes présents à l'intérieur de la colonne et des conditions d'entrée. Un écoulement piston, c'est à dire un profil de vitesses plat dans l'appareil est recherché pour favoriser la réaction chimique qui aura lieu à terme au sein de la colonne. Il s'avère que les conditions d'entrée ont une grande influence sur les écoulements. Une plaque de redistribution en bas de colonne est utile : elle permet de répartir l'alimentation liquide sur toute la section de la colonne. Par contre, la présence d'un plateau très proche du bas de la colonne n'est pas souhaitable même si elle permet de bloquer le développement d'instabilités liées aux conditions d'entrée. Enfin, un profil de vitesses non plat en entrée de l'appareil entraîne une dissymétrie de l'écoulement au sein de la colonne.

**Mots-clés :** CFD, hydrodynamique, liquide, géométrie, conditions d'alimentation

### **1. Introduction**

Dans les colonnes industrielles, un écoulement de type « piston », c'est à dire un profil de vitesses du liquide plat, est parfois recherché afin d'améliorer les performances du point de vue de la réaction chimique. Pour accéder à de tels écoulements, des modifications de la géométrie de la colonne sont souvent envisagées : introduction d'internes de type plateaux perforés, garnissage... (Trambouze et Euzen, 2002).

Des géométries non-triviales sont ainsi envisagées. Afin de déterminer la géométrie la plus adaptée, la mécanique des fluides numérique (CFD) constitue un complément indispensable à l'expérimentation, car il est irréaliste de tester expérimentalement toutes les combinaisons géométriques.

Il s'agit ici d'étudier à l'aide du code de calcul commercial de mécanique des fluides numérique Fluent (version 6.1.18) un pilote industriel de type colonne verticale. Un profil plat de vitesses du liquide est souhaité pour bien maîtriser l'avancement de la réaction qui aura lieu à terme au sein de l'écoulement liquide. L'effet, sur le degré de mélange du liquide, d'une plaque permettant de répartir l'alimentation liquide sur toute la section de la colonne, et de l'ajout d'un plateau supplémentaire en fond de colonne, est testé. Un diagnostic est réalisé quant aux perturbations provoquées sur l'hydrodynamique par un accident placé sur la canalisation d'alimentation.

Après une présentation de la géométrie du pilote expérimental, la mise en œuvre des simulations (géométrie, maillage, aspects numériques) est détaillée. Les simulations de la colonne de référence, c'est à dire de la colonne expérimentale, sont ensuite analysées. L'approche numérique est alors validée par comparaison, en terme de Détermination de Temps de Séjour (DTS), de ces résultats aux résultats expérimentaux. A partir de là, des modifications des internes et des conditions d'entrée du liquide dans la colonne sont envisagées et leurs effets, tant sur l'écoulement interne de la colonne que sur la DTS, sont étudiés.

---

\* Toute correspondance doit être adressée à Anne-Marie BILLET- DUQUENNE : AnneMarie.Billet@ensiacet.fr

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1 Conditions opératoires

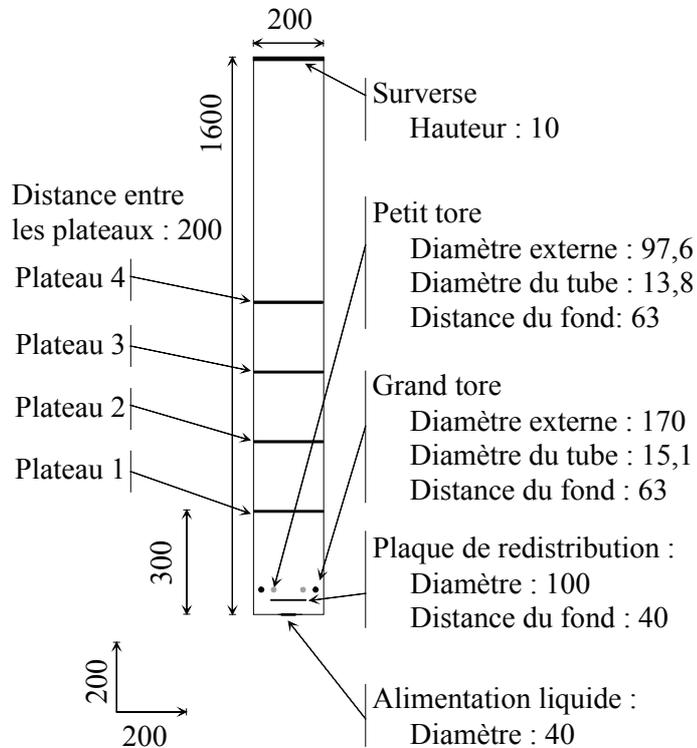
La colonne utilisée pour cette étude a un diamètre de 0,2 m, diamètre suffisant pour limiter les effets de bords, et une hauteur de 1,6 m (Figure 1). Elle est alimentée en liquide par le bas par une conduite de 0,04 m de diamètre. Afin de répartir au mieux le courant liquide entrant sur toute la section de la colonne, une plaque de redistribution de 0,1 m de diamètre est placée face à cette arrivée. En bas de colonne se trouvent également deux tores concentriques respectivement de 0,098 m et 0,170 m de diamètre externe par où du gaz peut être injecté. La colonne est équipée de quatre plateaux perforés d'orifices de 0,03 m et ouverts à 30% ; ils sont placés dans la colonne à 0,3, 0,5, 0,7 et 0,9 m du fond de la colonne.

Pour ces essais, le liquide utilisé est de l'eau ( $\rho_L = 998 \text{ kg.m}^{-3}$  ;  $\mu_L = 0,001 \text{ Pa.s}$ ) ; son débit est de  $8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ , ce qui assure un écoulement pleinement turbulent, tant dans la conduite d'alimentation ( $Re \approx 66\,000$ ) que dans la colonne ( $Re \approx 22\,000$ , soit  $u_L = 0,07 \text{ m.s}^{-1}$ ).

Pour caractériser le mélange de la phase liquide, des essais de DTS sont réalisés. Pour cela, environ 0,15 moles de KOH sont injectées à l'entrée de la colonne (injection de type Dirac) et l'évolution au cours du temps de la conductivité en entrée et en sortie de la colonne est suivie (Chaumat, 2004).



Figure 1. Vue du pilote expérimental



Dimensions en mm - Schéma à l'échelle

Figure 2. Géométrie simulée

### 2.2 Configuration de référence

Le cas de référence utilisé pour la simulation correspond aux conditions opératoires de la colonne : colonne comprenant 4 plateaux et une plaque de redistribution (Figure 2). Ce cas permet de valider les résultats de la simulation, car il peut être comparé aux résultats expérimentaux. A partir de là, d'autres configurations sont explorées. Les modifications géométriques abordées sont les suivantes : suppression de la plaque de redistribution, ajout d'un plateau supplémentaire à 0,108 m du fond et présence d'un coude sur la canalisation d'alimentation. Comme peu de variations tangentielle sont observées dans l'écoulement simulé, un seul plan de visualisation est présenté pour chaque cas.

## 2.3 Mise en œuvre des simulations

### 2.3.1 Géométrie

La géométrie simulée de la colonne est conforme à la géométrie réelle ; elle est schématisée sur la Figure 2. Pour simplifier les simulations effectuées en 3D, l'épaisseur de la plaque de redistribution et des plateaux perforés est supposée nulle et les tiges de support des plateaux ne sont pas représentées. Enfin, la hauteur d'eau au-dessus de la surverse est supposée égale à 0,010 m.

### 2.3.2 Maillage

Le maillage hybride (Ranade, 2002) est créé avec le logiciel Gambit® (version 2.0.4). Il est structuré à mailles hexaédriques sous la plaque de redistribution et au niveau de la surverse et non-structuré à mailles tétraédriques partout ailleurs. Le maillage non-structuré permet ici de bien prendre en compte la géométrie circulaire des plateaux et de leurs orifices (Figure 3). Les nœuds sont distants d'au plus 0,005 m sur toutes les arêtes. Le maillage volumique comporte près de 400 000 mailles. La valeur maximale de la distorsion pour ce maillage est de 0,84 ce qui est dans la norme conseillée par Fluent (Fluent, 2002) ; maximum conseillé : 0,95.

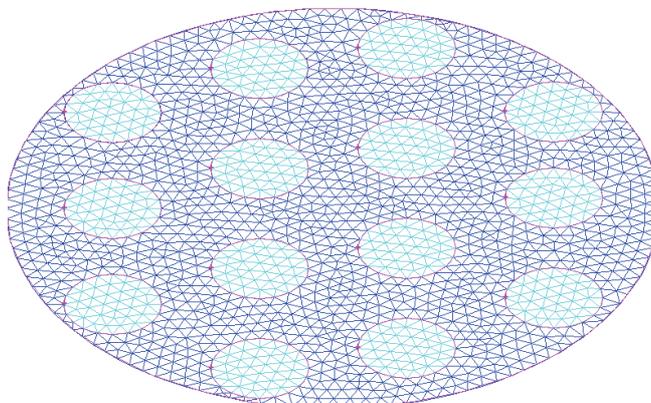


Figure 3. Maillage d'un des plateaux

### 2.3.3 Modèles

Le modèle de turbulence employé est le modèle k- $\epsilon$  standard (Launder et Spalding, 1974). Les zones proches des parois sont représentées par les lois de parois logarithmiques standards (Launder et Spalding, 1974). Ces modèles sont choisis car ils ont déjà fait leurs preuves dans la simulation de nombreux systèmes industriels (voir Sardeing et al., 2003, par exemple).

### 2.3.4 Modélisation et aspects numériques

L'entrée du liquide est définie en imposant sur la surface d'entrée les profils de vitesses, d'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente correspondant à un profil turbulent « plat » parfaitement établi dans une canalisation. A la condition limite de sortie, le logiciel extrapole les informations nécessaires à partir des cellules de calculs en amont : un flux de diffusion nul pour toutes les variables de l'écoulement dans la direction normale au plan de sortie est imposé (Fluent, 2002). Pour les parois, des conditions de non-glissement sont imposées (Ranade, 2002). Une condition limite de type symétrie (vitesses et gradients de toutes les variables perpendiculaires à la surface nuls) est appliquée aux cellules représentant la surface du liquide (Ranade, 2002).

Toutes les variables sont discrétisées en employant un schéma du second ordre (Hirsch, 1988). L'algorithme SIMPLE est choisi pour coupler les équations de conservation (Patankar et Spalding, 1972). La convergence est considérée atteinte lorsque le résidu normé de l'équation de continuité est de l'ordre de  $10^{-5}$  et de  $10^{-6}$  pour les équations des trois composantes du vecteur vitesse, de l'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente. La convergence est atteinte en 2 000 itérations pour un temps C.P.U. d'environ 20 heures (1 processeur MIPS R14000 à 500 MHz d'une machine Silicon Graphics Origin 3000).

### 2.3.5 Détermination des Temps de Séjour numérique

Des essais de DTS numérique (Détermination des Temps de Séjour) sont réalisés en effectuant le suivi lagrangien d'environ 20 000 particules, nombre au-delà duquel le résultat n'évolue plus et qui induit un temps de calcul réaliste. Les particules sont sphériques indéformables, sans interactions entre elles ou avec le fluide. Les caractéristiques de la turbulence de la phase liquide, et en particulier l'échelle intégrale, ont été prises en compte. De part leur diamètre,  $d_p = 10^{-6}$  m, et leur densité,  $d_p = \rho_L$ , elles suivent parfaitement l'écoulement sans le modifier. Toutes les particules sont injectées simultanément à l'entrée de la colonne de manière à reproduire l'impulsion de Dirac expérimentale. En sortie de la colonne, un histogramme du nombre de particules ayant séjourné un intervalle de temps fixé dans l'installation est disponible. De là, la fonction de distribution des temps de séjour  $E(t)$ , qui est également un histogramme, est atteinte (Fogler, 1992). La largeur de classe choisie sur le temps de séjour est de 0,5 s, largeur en dessous de laquelle une non-évolution de l'allure des histogrammes est atteinte. Pour des raisons de lisibilité ces histogrammes sont représentés sous forme de courbes, où chaque point correspond au temps de séjour moyen dans la classe considérée.

## 3. Simulation de la colonne de référence en liquide seul

### 3.1 Résultats des simulations

La simulation du cas de référence montre que la plaque de redistribution placée en bas de colonne joue son rôle (Figure 4a) : le mouvement purement axial du liquide entrant dans la colonne se brise ; il comprend alors une composante radiale forte après la plaque. Deux boucles de circulation prennent place entre la plaque de redistribution et le fond de la colonne. Au-dessus de la plaque de redistribution ( $h > 0,040$  m), un jet de liquide ayant une vitesse importante remonte contre les parois, ce qui engendre de deux boucles de circulation inversées (montée en parois / descente au centre). Ces re-circulations occupent 15% de la hauteur de la colonne. Même si ces boucles de circulation prennent fin avant le premier plateau, leur influence se fait encore sentir à ce niveau ( $h = 0,1$  m). Des vitesses plus faibles au centre du plateau que sur les bords sont observées : le profil de vitesses du liquide arrivant sur le plateau 1 n'est pas parfaitement plat. Plus haut dans la colonne ( $h > 0,3$  m) les effets d'entrée s'estompent ; les profils de vitesses sont relativement bien établis et plats (Figure 5a). Le premier plateau permet donc de stopper le développement des boucles de circulation de grande échelle présentes en amont. Toutefois, vu l'espacement entre les trous d'un plateau, de petites boucles de circulation apparaissent entre les orifices (Figure 6a).

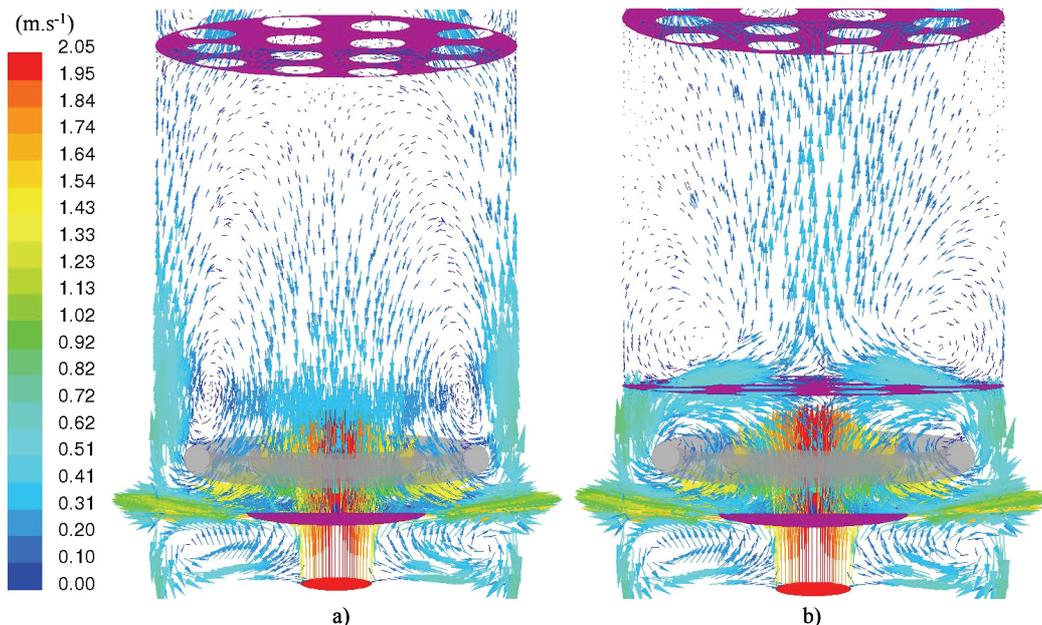


Figure 4. Champs de vitesses moyennes en bas de colonne  
a) Cas de référence, b) Cas avec un plateau supplémentaire : le « plateau 108 »

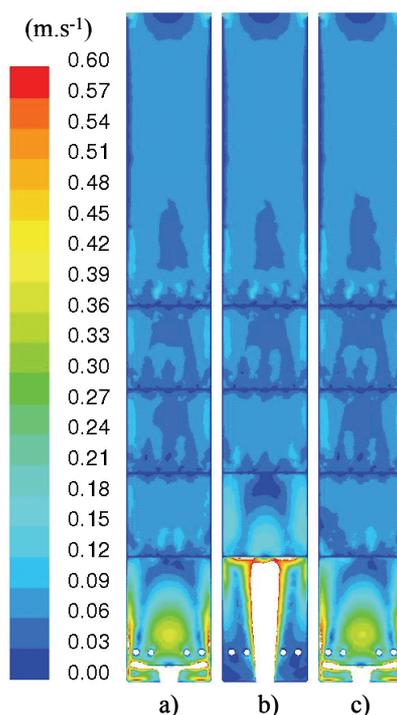


Figure 5. Contours de vitesses moyennes le long de la colonne  
 a) Cas de référence, b) Cas de référence sans la plaque de redistribution, c) Cas de référence avec un coude sur la canalisation d'alimentation  
 Seules les vitesses inférieures à  $0,6 \text{ m.s}^{-1}$  sont représentées, les zones où les vitesses sont supérieures à cette valeur sont représentées en blanc

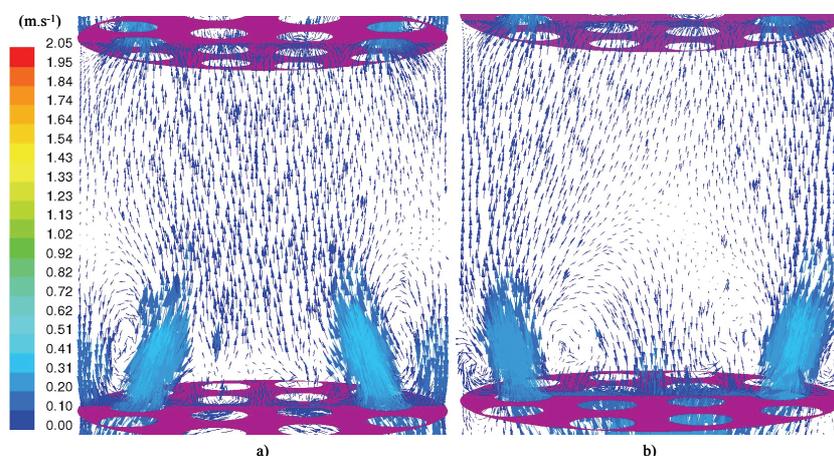


Figure 6. Champs de vitesses moyennes entre le plateau 1 et le plateau 2  
 a) Cas de référence, b) Cas avec un plateau supplémentaire : le « plateau 108 »

### 3.2 Comparaison avec les résultats expérimentaux

L'obtention expérimentale d'une cartographie complète du champ de vitesses liquide de la colonne est très lourde et souvent impossible. La comparaison entre les résultats de la simulation et le comportement réel de la colonne est réalisée ici à l'échelle globale de l'appareil (comme souvent pour un procédé industriel), via des essais de détermination des temps de séjour. Les courbes  $E(t)$  obtenues numériquement et expérimentalement (Chaumat, 2004) sont très similaires (Figure 7) et correspondent respectivement à une série de 21 et 24 Réacteurs Parfaitement Agités (RAC). Les faibles écarts observés peuvent être dus à la différence des conditions d'entrée dans la colonne : le profil de vitesse dans le cas réel peut être légèrement différent du profil plat retenu pour la simulation numérique. L'approche numérique employée est considérée comme validée.

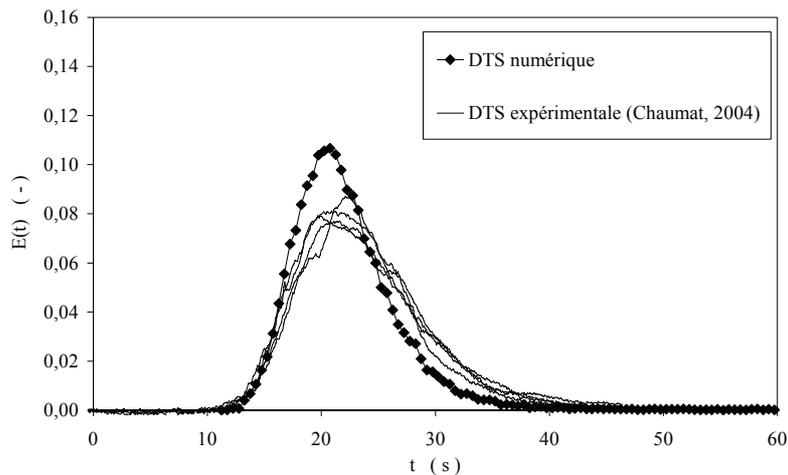


Figure 7. Courbes  $E(t)$  numériques et expérimentales dans le cas de référence

## 4. Influence de la géométrie sur les écoulements simulés au sein de la colonne

### 4.1 Influence de la plaque de redistribution

Pour étudier l'influence de la plaque de redistribution sur l'écoulement, des simulations sont réalisées avec et sans cette plaque (Figure 5). Sur la Figure 5 seules les vitesses inférieures à  $0,6 \text{ m.s}^{-1}$  sont représentées, les zones où les vitesses sont supérieures à cette valeur sont représentées en blanc sur le contour.

L'important flux purement axial provenant de l'alimentation liquide est clairement visible (Figure 5b) ; ce jet se brise sur le plateau 1 qui bloque son développement et empêche sa propagation dans le reste de la colonne. L'écoulement entre le plateau 1 et le plateau 2 reste profondément modifié par l'absence de la plaque de redistribution (Figure 5b) : deux larges boucles de circulation se développent et occupent 86% du volume de ce compartiment. Au-delà du plateau 2 ( $h > 0,5 \text{ m}$ ), l'écoulement observé avec la plaque de redistribution est retrouvé.

L'absence de la plaque de redistribution modifie nettement la DTS numérique (Figure 8) en l'étalant. D'une part les premières particules sortent un peu plus rapidement car les vitesses sont plus importantes en bas de la colonne. D'autre part, le temps nécessaire pour évacuer toutes les particules injectées est plus long, ce qui témoigne de la présence de zones mortes : la sortie des particules entraînées dans les grandes boucles de circulation est retardée. Le rétro-mélange est de ce fait beaucoup plus important qu'en présence de la plaque de redistribution : le nombre de RAC en série passe de 21 à 9.

Il est donc défavorable pour cet écoulement de supprimer la plaque de redistribution. Toutefois, une étude plus approfondie pourrait permettre d'optimiser sa géométrie (diamètre, hauteur, perforation...).

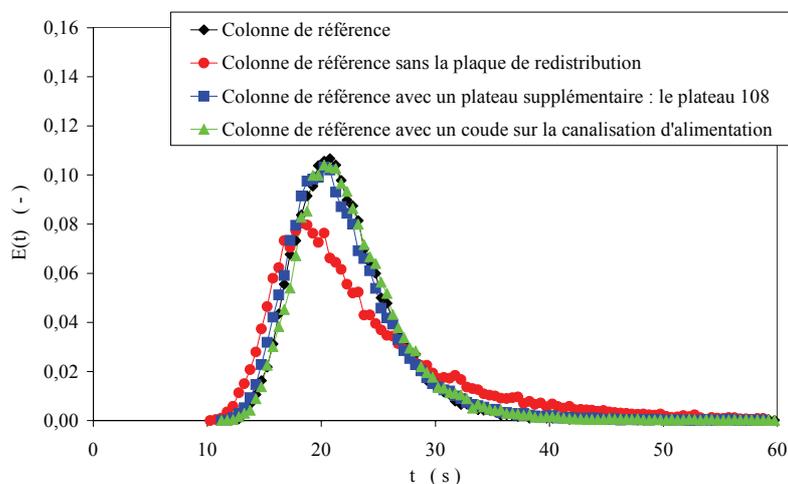


Figure 8. Influence de la géométrie sur les courbes  $E(t)$

#### 4.2 Rajout d'un plateau en bas de colonne

Afin d'obtenir un profil de vitesses plus plat en amont du plateau 1, l'ajout d'un plateau à 0,108 m du fond de la colonne est envisagé, le « plateau 108 ».

La Figure 4b présente le champ de vitesses moyennes en bas de la colonne en présence du plateau 108. L'écoulement est identique au cas où ce plateau est absent (Figure 4a) jusqu'à la plaque de redistribution ( $h = 0,04$  m). Au-dessus de la plaque de redistribution, un jet de liquide ayant une vitesse importante remonte contre les parois jusqu'au plateau 108. Là, l'écoulement se divise en deux : une partie longe le plateau 108 sans le traverser, l'autre le traverse par un de ces orifices. Le liquide longeant le plateau 108 crée deux boucles de circulation qui occupent la moitié du volume du compartiment compris entre la plaque de redistribution et le plateau 108. Les jets de liquide traversant le plateau 108 sont obliques et dirigés vers le centre de la colonne. Deux grandes boucles existent entre ces jets et la paroi. Elles occupent en hauteur près de la moitié de la hauteur du compartiment délimité par le plateau 108 et le plateau 1. Deux autres petites boucles se trouvent au centre du plateau 108.

Le profil de vitesses qui arrive sur le plateau 1 est beaucoup plus plat que lorsque le plateau 108 est absent, ce qui est l'effet escompté. Toutefois les vitesses sont plus fortes au centre qu'au bord du plateau.

Les jets sortant des orifices du plateau 1 sont dirigés vers les parois (Figure 6b) alors que lorsqu'il n'y a pas de plateaux supplémentaires, ils sont dirigés vers le centre de la colonne. La zone où le profil de vitesses est plat entre le plateau 1 et le plateau 2 se trouve diminuée par rapport au cas sans plateau supplémentaire. Il semble que pour que le profil de vitesses soit plat entre deux plateaux il faut que le jet de liquide provenant des orifices soit vertical voire légèrement incliné vers l'intérieur de la colonne. Une inclinaison dirigée vers les parois externes favorise la création de boucles de circulation au centre de la colonne (Figure 6b) ce qui casse le profil de vitesses plat entre deux plateaux. Dans le reste de la colonne ( $h > 0,5$  m) l'écoulement est relativement similaire au cas où le plateau 108 est absent.

La courbe de DTS obtenue dans la configuration avec le plateau supplémentaire est très proche de celle obtenue pour la géométrie de référence (Figure 8). Le même nombre de RAC en série est trouvé, à savoir 21.

En conclusion, l'ajout de ce plateau supplémentaire ne semble pas intéressant : il n'y a pas d'effet visible sur le nombre de RAC en série et le profil de vitesses est finalement plat dans une moins grande partie de la colonne.

#### 4.3 Influence d'un accident sur la canalisation d'alimentation

La mise en place expérimentale d'une colonne de ce type nécessite la présence d'un coude sur la canalisation d'alimentation en liquide plus ou moins proche de l'entrée dans la colonne. Pour étudier son influence, un coude est placé ici à 0,6 m avant la jonction avec la colonne.

A cause de ce coude, le profil de vitesses en entrée de la colonne n'est plus le profil turbulent « plat » axisymétrique classique (Figure 9a) : les vitesses sont plus élevées du côté correspondant à l'extérieur du coude (Figure 9b). Ceci correspond bien au phénomène physique attendu.

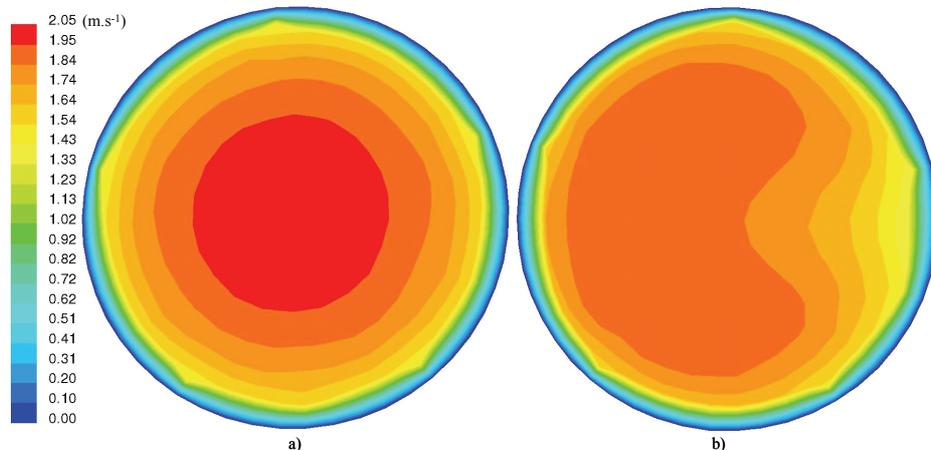


Figure 9. Champs de vitesses moyennes à la sortie du tube d'alimentation en entrée de la colonne  
Vue de dessus : a) En l'absence d'un coude, b) En présence d'un coude

L'influence du coude sur l'alimentation ne se fait sentir que par une légère dissymétrie de l'écoulement juste sous le plateau 1 (Figure 5c). Après la plaque de redistribution ( $h > 0,04$  m), les vitesses sont plus importantes du côté gauche, côté correspondant à l'extérieur du coude. Le plateau 1 empêche le développement de cette dissymétrie dans le reste de la colonne ( $h > 0,3$  m) où l'écoulement est identique que le coude soit présent ou non sur la canalisation d'alimentation.

L'absence du coude n'entraîne aucune modification visible sur les courbes de DTS (Figure 8). Un nombre de RAC en série identique est trouvé : 21.

L'effet du coude sur l'écoulement au sein de la colonne reste limité. Toutefois, pour qu'il soit nul, le coude devra être placé encore plus loin du fond de la colonne.

## 5. Conclusions

La simulation d'une colonne de géométrie interne non triviale (présence de plateaux et d'une plaque de redistribution) est entreprise en écoulement liquide. Le but est d'optimiser la géométrie de la colonne afin d'obtenir un profil de vitesses du liquide assez plat dans la colonne. Les résultats de la géométrie de référence correspondant au pilote industriel montrent qu'un profil de vitesses plat apparaît dès le premier plateau de la colonne ( $h = 0,3$  m). La DTS numérique obtenue s'avère très proche de la DTS expérimentale ce qui valide cette approche.

Les conditions d'entrée dans la colonne ont une influence certaine sur l'écoulement au sein de la colonne.

La plaque de redistribution permet de bloquer le développement d'un jet liquide ayant une forte vitesse au sein de la colonne. L'existence d'un tel jet peut réduire le temps de séjour dans la colonne et être préjudiciable à la réaction chimique. La plaque de redistribution est donc à conseiller.

Le premier plateau permet de stabiliser l'écoulement (pour  $h > 0,3$  m) et de gommer les hétérogénéités apparaissant en fond de la colonne, même lorsque la plaque de redistribution est absente.

L'effet de l'ajout d'un plateau ( $h = 0,108$  m) en amont du plateau 1 est peu significatif. Il se traduit par une déstabilisation de l'écoulement entre le plateau 1 et le plateau 2 bien que le profil de vitesses arrivant sur le plateau 1 soit beaucoup plus plat dans ce cas là, ce qui était le but recherché. Cette configuration ne semble finalement pas à conseiller.

La présence d'un accident sur la canalisation d'alimentation liquide, ici un coude, proche de la jonction avec la colonne (0,6 m en amont) entraîne une dissymétrie de l'écoulement dans la colonne : les vitesses sont plus fortes du côté correspondant au côté externe du coude. Même si cet effet est limité, il est préférable d'avoir un profil de vitesses le plus plat possible pour l'alimentation liquide et donc d'éviter tout accident trop proche de la colonne dans la conduite d'alimentation liquide.

La configuration générale la plus intéressante est ainsi dégagée : présence d'une plaque de redistribution à  $h = 0,1$  m dans cette étude, premier plateau assez éloigné du fond de la colonne (ici  $h = 0,3$  m) et une longueur droite certaine sur la canalisation d'alimentation en liquide avant sa jonction avec la colonne (plus de 0,6 m en amont, pour ce travail).

## Références

- Chaumat H., 2004, Hydrodynamique locale et globale d'une colonne à bulles en conditions industrielles. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Fluent Incorporated, 2002, Fluent 6. User's Guide. Fluent Incorporated.
- Fogler H.S., 1992, Elements of Chemical Reaction Engineering. PTR Prentice Hill.
- Hirsch C., 1988, Numerical Computation of Internal and External Flows. Volume 1: Fundamentals of Numerical Discretisation. John Wiley & Sons Ltd.
- Lauder B.E. et Spalding D.B., 1974, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 44, 13.
- Patankar S.V. et Spalding D.B., 1972, Int. J. Heat and Mass Transfer, 15, 1787.
- Ranade V.V., 2002, Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering. Academic Press.
- Sardeing R., Poux M., Avrillier P. et Xuereb C., 2003, Proceedings of the 11<sup>th</sup> European Conference on Mixing, Bamberg, Allemagne, 621.
- Trambouze P. et Euzen J.-P., 2002, Les réacteurs chimiques : de la conception à la mise en œuvre. Technip.