

Effet de la compacité du faisceau sur les performances de filtration d'un module de microfiltration à fibres creuses

GÜNTHER Jan ^{1,2}, ALBASI Claire ¹, LAFFORGUE Christine ², SCHMITZ Philippe ²

¹ Laboratoire de Génie Chimique, UMR CNRS 5503, 5 rue Paulin Talabot, BP 1301, 31106 Toulouse cedex 01, France

² Laboratoire d'ingénierie des Systèmes Biologiques et des Procédés, UMR INSA CNRS 5504, UMR INSA INRA 792, 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04, France

Résumé :

Le but de ce travail est d'étudier l'impact de la compacité d'un faisceau de fibres creuses au sein d'un module de microfiltration, à la fois sur les performances de filtration et sur la distribution spatiale du dépôt le long des fibres. Le calcul de l'écoulement dans les domaines fluide et poreux se fera à l'aide de COMSOL Multiphysics.

Abstract :

The aim of this work is to study the impact of the packing density of a hollow fibre microfiltration module on its filtration performances and on the spatial distribution of the deposit along the fibre. Flow calculation both in the fluid and porous domains will be performed using COMSOL Multiphysics™

Mots clés : filtration, modèle, fibres creuses, compacité.

1. Introduction :

La plupart des micro-organismes ne se développe pas de manière isolée mais en « mélange » ou consortium avec d'autres espèces et souvent d'autres sous-espèces ou souches de la même espèce. Ces types de populations appelées populations mixtes, ou hétérogènes, entretiennent des relations complexes et l'étude quantitative de ces écosystèmes est un des axes importants de l'écologie microbienne. Albasi et al. [1] proposèrent un double bioréacteur couplé à des membranes de microfiltration pour l'homogénéisation de deux milieux liquides physiquement séparés contenant des micro-organismes. L'idée de base est de permettre à deux souches de partager le même environnement tout en les maintenant isolées à l'aide d'une membrane. Ainsi, des prélèvements distincts sont possibles et l'étude de chaque population est aussi aisée et précise que dans le cas d'une culture pure [1]. Afin d'assurer des conditions de culture similaires à celles réalisées en co culture dans un réacteur unique, l'étape de filtration ne doit pas être limitante vis-à-vis des cinétiques biologiques et le module de microfiltration utilisé doit être optimisé.

La présente étude se focalise sur le module de microfiltration à fibres creuses utilisé et, plus particulièrement, sur sa compacité pouvant être définie comme l'aire totale de surface membranaire externe rapportée à l'aire de la section du module. Les hautes densités de fibres entraînent des environnements hydrodynamiques inter-fibres défavorables, limitant les vitesses de filtration et participant à une utilisation non optimale du module [2], [3]. Un certain nombre d'étude ont tenté d'évaluer expérimentalement les performances d'une fibre au sein d'un module pour différentes positions conduisant à différentes conditions hydrodynamiques. Les approches numériques trouvées dans la littérature sont de trois ordres : i) modélisation d'une fibre sans canal externe; ii) le nombre de fibres est déterminé mais la compacité n'est pas prise en compte; iii) l'arrangement de fibres est aléatoire, la répartition de la densité de fibre inhomogène, et les profils de vitesse difficilement calculable. L'influence de la compacité du faisceau de fibres sur les performances de filtration est étudiée ici au moyen d'une approche simplifiée de type « cellule unitaire » dérivée du modèle de

Happel [4] permettant de travailler sur une répartition de fibre homogène sur la section, en compacité définie (FIG. 1A). L'optimisation de la densité de fibres ou compacité peut se révéler une méthode pertinente afin d'améliorer les performances du système de filtration immergé.

2. Formulation du problème.

2.1. Théorie et équations de transfert.

Parmi les différentes approches qui peuvent être utilisées pour modéliser l'écoulement dans un faisceau de fibres creuses, l'approche microscopique est la plus employée. Le faisceau de fibres est modélisé comme un arrangement de cylindres parfaitement régulier, et on calcule l'écoulement sur un élément de base ou « cellule unitaire » de cet arrangement. C'est le principe du modèle de Happel [5], développé initialement pour calculer la perméabilité d'un empilement régulier de fibres, ou des modèles dérivés, qui considère un cylindre unique, entouré d'une couche enveloppe de fluide d'épaisseur limitée, pour tenir compte de la présence des cylindres voisins. La condition limite à la frontière de la cellule peut être une condition de non glissement ou une contrainte tangentielle nulle. Nous adoptons ce modèle et considérons donc un domaine géométrique constitué d'une fibre creuse unique, entourée d'une couche fluide et soumise à une pression transmembranaire de 0.8 bar (FIG. 1). La fibre, de rayon extérieur 210 μm est constituée d'un canal interne de rayon 125 μm et donc d'un milieu poreux d'épaisseur 85 μm , l'ensemble ayant une hauteur de 125 mm. Pour le calcul numérique, nous considérons un écoulement stationnaire, laminaire et incompressible dans les canaux fluides où le modèle de Navier Stokes traduisant le transfert de quantité de mouvement est résolu :

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2)$$

où \vec{v} est la vitesse du liquide, P sa pression et μ sa viscosité dynamique. Le modèle de Darcy-Brinkman, extension du modèle de Darcy traduisant la capacité de l'écoulement à transmettre une force par le biais de la contrainte visqueuse dans le cas de très fortes perméabilités, est utilisé et ses équations sont résolues pour le calcul de l'écoulement dans le milieu poreux :

$$\mu_{\text{eff}} \Delta \vec{v} - \vec{\nabla} P - \frac{\mu}{K} \vec{v} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (4)$$

où \vec{v} est la vitesse du liquide, P la pression, μ_{eff} représente la viscosité effective (μ/ε , ε étant la porosité du sous-domaine poreux) et K la perméabilité intrinsèque du milieu poreux. Les conditions aux limites sont les suivantes (FIG. 1B): En entrée, représentée par la frontière en pointillé noir, une condition de pression de 0,8 bar (expérimentalement utilisée) avec un écoulement perpendiculaire est fixée ($z = 0.125$ m, $p = 0.8$ bar). Différentes conditions de pression ou d'écoulement peuvent être spécifiées pour différentes applications avec également une modification du canal d'entrée. En sortie, schématisé par la frontière en pointillé gris, la condition de pression est fixée égale à 0 ($z = 0$, $p = 0$). Sur les parois représentées en trait plein noir, une condition de non glissement est imposée ; Schmitz et Prat [10] ayant montré que l'effet de glissement était négligeable à la surface d'une membranaire de microfiltration. Ainsi, la composante axiale de vitesse sur toutes les parois perméables est considérée comme égale à zéro et la condition de continuité des vitesses et de la pression est définie (trait pointillé large, pour $r = 0.125 \times 10^{-6}$ m $v_z=0$). Finalement, les conditions d'axisymétrie ($r=0$, $u_r = 0$) et de symétrie sont définies respectivement en trait discontinu et en trait fin.

La densité de fibres ou compacité est déterminée en considérant la section du module comme un arrangement régulier de disques dans un plan (FIG.1C). Ainsi en prenant une disposition hexagonale optimale, la maille élémentaire est un losange dont les sommets sont les quatre disques voisins. Sa surface est de :

$$S_l = 2R_{\text{ext}} \times \left(2R_{\text{ext}} \frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 2\sqrt{3} \times R_{\text{ext}}^2 \quad (5)$$

et contient l'équivalent d'un disque (r étant le rayon externe d'une fibre). La proportion de surface couverte, autrement dit la compacité, est donc égale à :

$$\Phi = \frac{\pi.R_{ext}^2}{2\sqrt{3}R_{ext}^2} \quad (6). \text{ Pour des compacités plus faibles on peut donc écrire : } \Phi = \frac{\pi.R_{ext}^2}{2\sqrt{3}.(R_{ext} + D)^2} \quad (7)$$

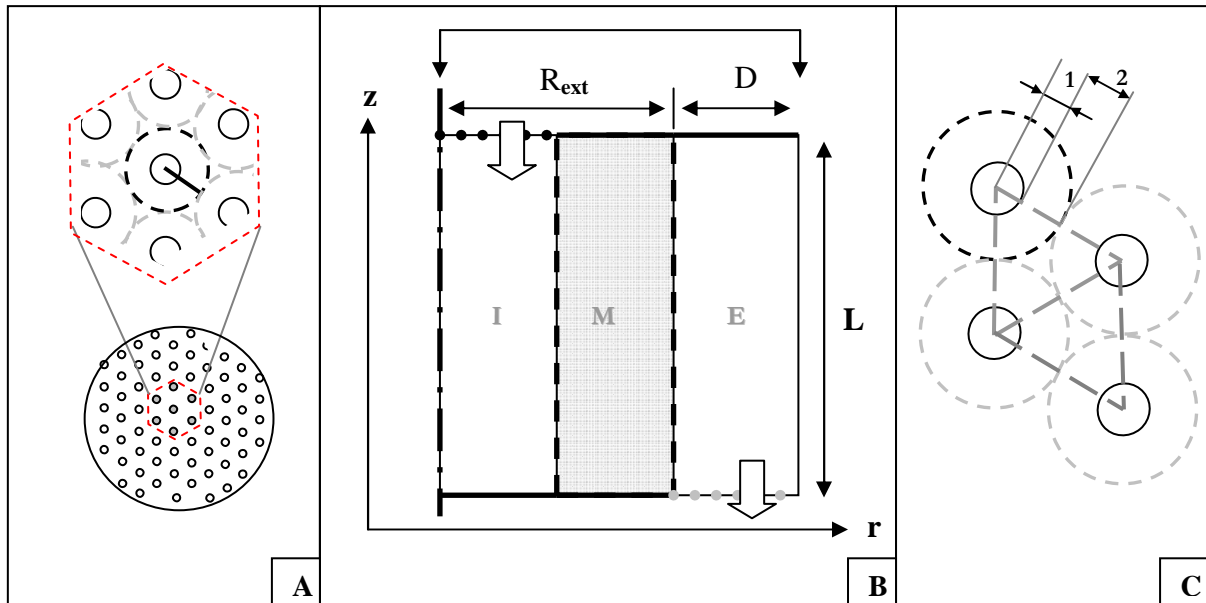


FIG. 1 – A : Représentation schématique d’une section d’un module de microfiltration à fibres creuses à faible compacité avec un arrangement hexagonal. B : schéma du modèle avec I : canal int., M : membrane, E : canal ext., R_{ext} : rayon externe=210 μm , D : espacement inter – fibre, L : Longueur de la fibre=0.125m. C : Motif élémentaires utilisé pour le calcul de la compacité ($R_{ext} \Rightarrow 1$, $D \Rightarrow 2$).

2.2. Formation d’un dépôt.

De manière générale, les particules, des micro-organismes dans notre cas, sont transportées par convection et diffusion vers la surface filtrante. Elles peuvent également subir un effet d’inertie ainsi que la gravité. Compte tenu de la taille des micro-organismes et de leur masse volumique, nous supposons qu’elles sont uniquement convectées par l’écoulement et donc qu’elles suivent les lignes de courant du fluide. Nous admettons également que les forces d’interaction moléculaires leur permettent d’adhérer à la surface de la membrane et/ou aux micro-organismes déjà adhérents. La croissance du dépôt, résultant de l’accumulation des micro-organismes sur la surface membranaire lors de la filtration, est modélisée par une déformation du domaine poreux constitué par la paroi poreuse et le dépôt. La mise en œuvre s’effectue par un déplacement de la frontière entre le domaine fluide interne (I) et le domaine poreux initialement situé à la surface interne de la membrane (M). Ceci est associé à une déformation du maillage des deux domaines [6] [7]. La perméabilité locale du nouveau domaine poreux est obtenue en considérant les résistances hydrauliques locales de la membrane et du dépôt comme deux résistances en série. En d’autres termes, l’écoulement au sein du milieu poreux est considéré comme uniforme et orienté dans la direction r dans toute section d’ordonnée z constante. Les nouveaux paramètres à considérer sont la vitesse de déplacement de la frontière en fonction de r et la perméabilité du dépôt. La vitesse de déplacement de la frontière mobile est établie à partir d’un bilan matière :

$$\vec{V}_d(t) = - \frac{dm_d}{dt} \frac{\vec{V}_f(t)}{\rho_p \cdot (1-\varepsilon) \|\vec{V}_f(t)\|} \quad (8)$$

où m_d est la masse de particules par unité de surface à l’instant t (Kg.m^{-2}), ρ_p la masse volumique des particules (Kg.m^{-3}), ε la porosité du dépôt et $\vec{V}_f(t)$ est la vitesse du fluide à l’instant t sur la frontière, calculée par le code de calcul COMSOL MultiphysicsTM lors de la résolution couplée des équations de Navier-Stokes et Darcy-Brinkman. Les particules sont donc supposées suivre les lignes de courant du fluide et le flux de masse de particules arrivant à la surface est supposé proportionnel à la vitesse du

fluide à la surface. En filtration frontale, la masse des particules déposées par unité de surface est proportionnelle à la concentration en particules de la suspension c (kg.m^{-3}) et à l'épaisseur e_d du dépôt (m) :

$$m_d(t) = e_d(t) \times c \quad (9) \text{ alors : } \frac{dm_d}{dt} = c \times \|\vec{V}_f(t)\| \quad (10). \text{ En remplaçant } \frac{dm_d}{dt} \text{ dans l'équation (8) on}$$

$$\text{obtient : } \vec{V}_d(t) = -\frac{c}{\rho_p \cdot (1 - \epsilon)} \vec{V}_f(t) \quad (11). \text{ L'épaisseur du dépôt est alors calculée ainsi :}$$

$$e_d(t_i) = e_d(t_{i-1}) + \|\vec{V}_d(t_{i-1})\| \times (t_i - t_{i-1}) \quad (12)$$

$$e_d(t_n) = \frac{c}{\rho_p \cdot (1 - \epsilon)} \sum_{i=1}^n [\|\vec{V}_f(t_{i-1})\| \times (t_i - t_{i-1})] \quad (13)$$

Il est donc nécessaire d'imposer une porosité de dépôt comme paramètre d'entrée afin de calculer le déplacement de la frontière mobile. La loi des résistances en série permet de calculer, à chaque pas de temps, la perméabilité intrinsèque totale K_t de l'ensemble dépôt + membrane :

$$\frac{e_t}{K_t} = \frac{e_d}{K_d} + \frac{e_m}{K_m} \quad (14)$$

Le calcul s'effectue ainsi : au temps $t=0$ l'épaisseur et la porosité du dépôt est nulle avec $K_t=K_m$. La vitesse initiale $\vec{v}_f(0)$ est calculée sur l'interface fluide membrane. Au pas de temps suivant, une épaisseur de dépôt est calculée à partir de $\vec{v}_f(0)$ avec une porosité nulle. La perméabilité du dépôt est ensuite calculée à partir de l'équation de Carman Kozeny en prenant comme valeur de constante $\kappa=5$ [9]. Finalement, la perméabilité totale est déterminée et une nouvelle vitesse $\vec{v}_f(t)$ est calculée sur l'interface fluide dépôt. Pour chaque pas de temps, l'épaisseur du dépôt est calculée à partir de la vitesse estimée au pas de temps précédent.

3. Résultats.

3.1. Simulation des performances de filtration à l'eau pure.

La première partie de cette étude se concentre sur les performances de filtration à l'eau pure sans particules. Le modèle géométrique précédent permet de simuler les variations de vitesse de filtration le long d'une fibre au sein du module de microfiltration.

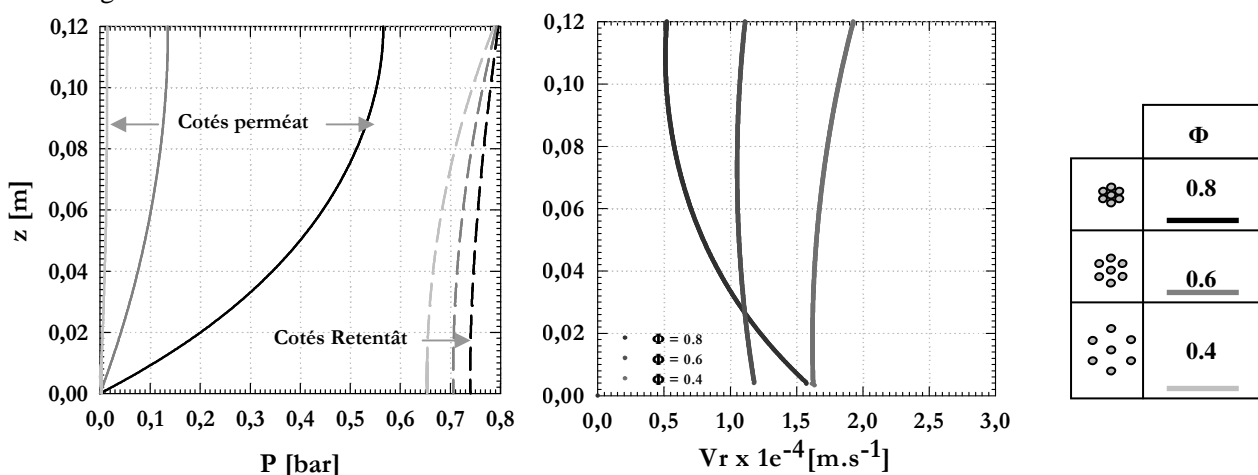


FIG. 2 – a) Variation de la vitesse de liquide et b) de la pression le long de l'axe z pour une filtration à l'eau pure pour 3 compacités différentes;

Dans un premier temps, nous avons voulu vérifier l'effet de la compacité sur la pression et l'écoulement à l'intérieur de la fibre. La FIG.2a représente les variations de pression locales le long de la fibre, à la frontière canal interne-membrane (cotés retentât – trait continue) ainsi qu'à la frontière canal externe – membrane (cotés perméat – trait pointillés) ; la FIG.2b représentant la variation des

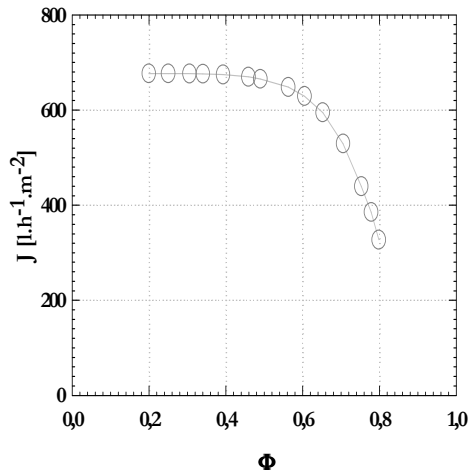


FIG. 3 –Effet de Φ sur le flux volumique de filtration $\Delta P=0.8$ bar.

(axe z) sont les conséquences directes des variations de pression transmembranaire locales. Ainsi, la restriction spatiale dans l'anneau externe due à l'augmentation de la compacité entraîne une pression plus importante dans le haut du canal externe, générant un fort gradient de pression transmembranaire locale le long de la fibre. La filtration s'effectue donc préférentiellement dans les régions où cette pression transmembranaire est plus importante : dans le bas de la fibre. La distance entre deux fibres voisines augmentant, le profil de pression transmembranaire locale devient plus uniforme et la filtration s'effectue plus uniformément. Une des conséquences majeures de cette variation des vitesses de filtration le long de la fibre, est la chute du flux volumique spécifique de filtration à mesure que la compacité augmente (FIG. 3).

vitesses de liquide V_r correspondant aux vitesses de filtration, sur la frontière interne de la membrane (coté retentât) pour une perméabilité membranaire égale à $712 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{bar}^{-1}$ ($K_m=1.68.10^6 \text{ m}^2$). La vitesse dans les zones de proche paroi ($0.11 \text{ m}<z<0.12 \text{ m}$ et $0 \text{ m}<z<0.005 \text{ m}$) n'est pas représentée car le résultat n'est pas physique. En effet, la coexistence d'une condition de vitesse nulle sur la paroi et d'une vitesse non nulle sur le nœud de calcul adjacent conduit à de fortes oscillations locales. Nous avons cependant vérifié que le calcul convergeait et que le débit était conservé. Deux observations importantes sont à relever : i) Pour de forte compacité (0,8) la variation de pression transmembranaire locale approche une valeur de plus de 70 % entre l'entrée (haut de la fibre) et la sortie (bas de la fibre). Pour de plus faibles valeurs de compacité (0,6 et 0,4), cette différence tend à diminuer rendant les profils plus homogènes avec des valeurs de pression plus élevées. ii) les variations de vitesses de liquides correspondant aux vitesses de filtration le long de la fibre

4. Effet de la compacité sur la croissance du dépôt.

La seconde partie de cette étude se focalise sur l'effet de la compacité sur la croissance d'un dépôt de particules sphériques de diamètre équivalent aux micro-organismes utilisés dans ce type de réacteur. La FIG.4 souligne les différences de répartition d'épaisseur du dépôt de filtration en fonction du temps ($t=16$ sec, caractéristique des temps de filtration utilisés dans ce bioréacteur à membrane spécifique) et pour deux compacités ou densités de fibres différentes. Pour une densité de fibres élevée, le dépôt reste d'une épaisseur négligeable sur la première moitié haute de la fibre ($<5\mu\text{m}$) et se répartit préférentiellement sur la deuxième moitié basse de la fibre atteignant une épaisseur maximale de $26 \mu\text{m}$. Pour une plus faible compacité, le dépôt reste d'épaisseur quasi homogène le long de la fibre atteignant des valeurs proches de $30 \mu\text{m}$. L'impact de la compacité est ici évident et ces données numériques sont à relier aux résultats présentés sur la FIG. 2. En effet, nous avons vu que les densités de fibres élevées provoquaient une grande disparité de vitesse de liquide à l'interface paroi poreuse-canal interne due à des profils de pression transmembranaire locale inhomogènes. Ceci provoquait une filtration préférentielle ou des chemins préférentiels des lignes de courant vers le bas de la fibre. Rappelons ici l'hypothèse que les particules suivent exactement les lignes de courant. Ainsi, la variation de l'épaisseur du dépôt en fonction de la position verticale, en début de filtration est dictée par le profil de vitesse de filtration le long de la fibre dans le canal interne, lui-même dépendant des variations longitudinales de pression transmembranaire locales. Pour résumer, une compacité élevée entraînera une vitesse de filtration faible à l'entrée favorisant de manière préférentielle la formation d'un dépôt en bas de fibre tandis qu'une densité de fibre faible permettra une vitesse de filtration plus importante rendant l'épaisseur du dépôt plus importante et plus homogène le long de la fibre. Notons que dans cette étude, le temps court de filtration ne permet au dépôt de diminuer significativement le domaine fluide à l'intérieur de la fibre. Si c'était le cas, la distribution spatiale du dépôt le long de la fibre pourrait progressivement être modifiée et par exemple conduire à son uniformisation.

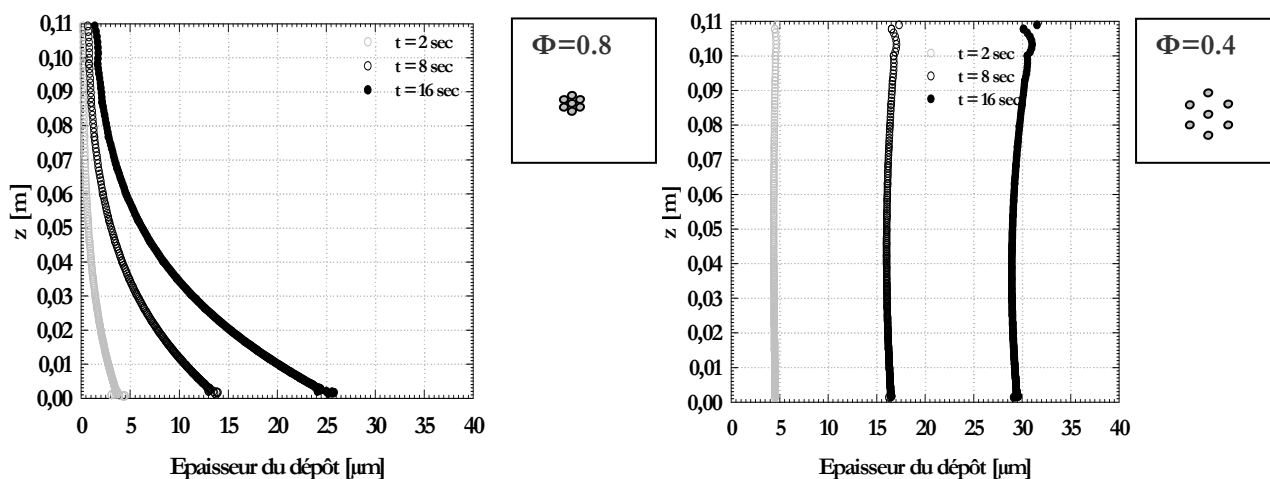


FIG. 4 – Croissance du dépôt de filtration en fonction du temps pour une compacité élevée $\Phi=0.8$ et une compacité plus faible $\Phi=0.4$ ($\Delta P=0.8$ bar $c=8$ g.l⁻¹).

4. Conclusion.

L'effet de la compacité d'un module de microfiltration sur les performances de filtration d'une eau pure et sur la répartition de l'épaisseur d'un dépôt d'une suspension de particules micrométriques a été étudié de manière numérique lors de cette étude. L'outil utilisé est le code de calcul COMSOL Multiphysics™ particulièrement adapté pour traiter ce type de problème implémentant le couplage du modèle de Navier-Stokes et du modèle de Darcy-Brinkman. L'effet de la compacité du faisceau de fibres établit une corrélation directe entre le profil de vitesse de filtration le long de la fibre et, l'épaisseur du dépôt de particules. Plus la compacité est élevée, plus la variation de vitesse de filtration du haut vers le bas de la fibre est grande. Une compacité plus forte entraînera donc un dépôt de particules plutôt dans les zones de forte vitesse de filtration, c'est-à-dire sur le bas de la fibre.

Les performances du module de microfiltration, et plus précisément, la chute de flux de filtration en mode interne-externe, au sein de ce bioréacteur à membrane, sont directement liées aux conditions hydrodynamiques présentes à l'intérieur de la fibre mais également à l'environnement hydrodynamique plus ou moins confiné présent en périphérie de la fibre. Ces deux conditions sont directement liées à la compacité ou densité de fibres du module. L'outil numérique proposé lors de cette étude permet d'effectuer une analyse de sensibilité des paramètres géométriques des modules à fibres creuses afin d'améliorer leur conception dans le but d'optimiser les performances de filtration.

- [1] Salgado Manjarrez E., Albasi C., Riba J.P., , A two reservoirs hollow fiber bioreactor for the study of mixed populations dynamics : design aspect and validation of the approach, *Biotechnology Bioengineering*, vol. 69 (4) 401-408, 2000.
- [2] Chang S., Fane A.G., Characteristics of microfiltration of suspensions with inter-fiber two-phase flow, *Journal of chemical technology and biotechnology* 75, (7), 533-540, 2000.
- [3] Zheng J., Xu Y., Xu Z., Flow distribution in a randomly packed hollow fiber membrane module, *Journal of Membrane Science* 211, (2), 263-269, 2002.
- [4] Happel J., Viscous flow relative to arrays of cylinders, *AIChE J.* 5, 1959.
- [5] Mendret J., Mise au point de méthodes de caractérisation du colmatage de membranes : application à la caractérisation in situ d'un dépôt particulaire en ultrafiltration frontale en lien avec les performances du procédé, Thèse université de Toulouse, INSA, 2007.
- [6] Mendret J., Guigui C., Schmitz P., Cabassud C., In situ dynamic characterisation of fouling under different pressure conditions during dead-end filtration: compressibility properties of particle cakes, *Journal of Membrane Science*, sous presse, 2009.
- [7] Song L., M. Elimelech, Particle Deposition onto a Permeable Surface in Laminar Flow, *Journal of Colloid and Interface Science* 173, 165-180, 1995.
- [8] G. Foley, A review of factors affecting filter cake properties in dead end microfiltration of microbial suspensions, *Journal of Membrane Science* 274, 38-46, 2006.
- [9] Schmitz P., Prat M., 3-D Laminar stationary flow over a porous surface with suction: Description at pore level. *AIChE Journal*, 41(10), p. 2212-2226 1995.