



HAL
open science

Hydrodynamique de l'aération et colmatage dans un bioréacteur à membrane immergée

Claire Albasi, Romuald van Kaam, Marion Alliet, Dominique Anne-Archard

► **To cite this version:**

Claire Albasi, Romuald van Kaam, Marion Alliet, Dominique Anne-Archard. Hydrodynamique de l'aération et colmatage dans un bioréacteur à membrane immergée. Intégration des MEMbranes dans les PROCédés - MEMPRO3, Apr 2006, Nancy, France. pp.0. hal-04105928

HAL Id: hal-04105928

<https://hal.science/hal-04105928>

Submitted on 25 May 2023

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.

HYDRODYNAMIQUE DE L'AERATION ET COLMATAGE DANS UN BIOREACTEUR à MEMBRANE IMMERGEE.

C.Albasi^{1*}, R.Van Kaam¹, M.Alliet¹, D.Anne-Archard²

*¹Laboratoire de Génie Chimique, 5 rue paulin talabot, 31106 TOULOUSE ; * claire.albasi@ensiacet.fr
²Institut de mécanique des fluides,*

Résumé : Une analyse rhéologique de la boue d'un bioréacteur à membranes immergées a été réalisée afin de relier ses caractéristiques au mode de gestion du procédé : La boue est un fluide viscoplastique. Une étude spécifique a démontré qu'elle semblait pouvoir se restructurer si elle était soumise à une contrainte de cisaillement inférieure à la valeur du seuil d'écoulement. La contrainte de cisaillement dans le réacteur étant directement induite par l'aération, des expériences ont été réalisées en injectant l'air de façon intermittente. Elles ont démontré que ce mode d'aération permet de préserver l'intégrité de la boue.

1. Introduction :

La gestion du colmatage dans les procédés à membranes est à la base de nombreuses études. Certains auteurs cherchent à comprendre son développement par une analyse des phénomènes intervenant dans la formation du colmatage [1-2]. D'autres s'orientent plus sur l'optimisation dans le choix des moyens de combattre ce colmatage à l'aide d'un mode de filtration adapté [3-5]. Dans le cas particulier des BAMI tout le monde s'accorde à dire que l'aération est le paramètre clé afin de prévenir de ce phénomène. Il permet en effet de générer de la turbulence dans le milieu [6] et limite ainsi l'apport de matière à la surface de la membrane. Récemment Gui et al. [7] ont démontré qu'au delà d'un certain débit, l'aération pouvait avoir un effet destructeur. Ce paramètre est également le plus coûteux énergétiquement [8-9]. Une bonne gestion en est donc primordiale.

Pour pouvoir proposer une gestion de ce paramètre on a alors essayé de comprendre, par des études rhéologiques comment réagissait la boue aux contraintes de cisaillement dans un BAMI. De nombreuses études ont déjà abordé sous l'angle rhéologie la liqueur mixte présente dans les procédés de boues activées [10-11] mais peu font mention d'une telle caractérisation dans le cas des BAMI [12] et aucune ne s'en servent réellement pour proposer une gestion du procédé. Cette étude a pour but de caractériser la rhéologie d'une boue activée issue d'un BAMI en vue d'identifier une stratégie dans la gestion du colmatage.

2. Matériel et méthodes :

2.1 Description du pilote et des conditions opératoires

L'ensemble de l'étude a été réalisé en utilisant un bioréacteur à membranes immergées de conception classique (Hernandez et al, 2005 [13]). Ce réacteur est composé d'une colonne en PVC de 15 L, (1 m de haut), dans laquelle est immergé le module membranaire. Les modules fabriqués par la société Polymem ont une

surface de $0,3\text{m}^2$. Les fibres creuses sont en polysulfone ($D_e = 0,72\text{ mm}$, $D_i = 0,28\text{ mm}$, seuil de coupure $0,1\text{ micron.}$, perméabilité initiale de $200\text{ à }400\text{ L/h.bar.m}^2$).

Le réacteur estensemencé par de la boue activée issue de la station d'épuration de Toulouse Ginestous. L'alimentation du réacteur se fait ensuite par le haut. Le perméat est aspiré à travers la membrane par une pompe PCM Moineau série 1 Monobloc et stocké dans un réservoir de 30 L pressurisable. La pression transmembranaire, le débit de perméation, la température, le pH sont enregistrés toutes les secondes à l'aide d'un programme d'acquisition automatique DasyLab. L'apport d'oxygène nécessaire à la bonne épuration est assuré par une diffusion continue de fines bulles d'air en base de colonne à 50 L/h à travers une membrane Flygt. Ce débit permet d'être constamment en saturation d'oxygène dans le milieu. Cette aération conduit de plus à une homogénéisation de la liqueur mixte et à une mise en suspension de la phase solide.

2.2 L'effluent

Deux types d'effluent ont été utilisés lors de cette étude :

La majeure partie de l'étude a consisté au traitement d'un effluent synthétique à base de Viadox. (dilué 2 fois et complété en azote par ajout de $4,5\text{ g/L}$ de NH_4Cl). Les caractéristiques similaires à celles d'une ERU sont rapportées sur le tableau 1.

Tableau 1 : Composition de l'effluent synthétique

DCO	130 g/L
DBO	85 g/L
NTK	8.75 g/L
N-NH ₄	1.9 g/L
P-PO ₄	1.1 g/L

La dernière partie de l'étude a été réalisée en utilisant un effluent domestique issu de la collecte des eaux usées de Brax (31) commune de 2000 habitants sans apport d'effluent industriel. La valeur de la DCO oscille entre $300\text{ et }600\text{ mg/L}$.

2.3 Contrôle du colmatage

Toutes les expériences ont été réalisées à un flux constant brut de 10 L/h.m^2 en accord avec des résultats de filtration de boue activée obtenus au préalable au sein de l'équipe [14]. Le protocole de filtration du pilote est basé sur une séquence de filtration-arrêt avec éventuellement introduction de rétrolavages.

Pour contrôler le colmatage il faut prévenir l'apport de matière ou favoriser son relargage en induisant un mouvement des fibres et/ou du fluide proche de la membrane. On a opté pour l'injection de grosses bulles en cinq points à la base de la membrane Une électrovanne permet de contrôler le mode d'injection de ces bulles soit en mode continu soit avec un temps d'arrêt dans l'admission d'air.

2.4 Rhéologie

L'ensemble des études rhéologiques a été réalisé sur un rhéomètre Bohlin C-Vor à 23°C . Ce travail a été effectué selon deux protocoles bien distincts : viscosimétrie et oscillation. Le premier mode aussi appelé de cisaillement simple renseigne essentiellement sur le comportement en écoulement des matériaux alors que le

deuxième, nommé aussi mode de mesure dynamique, permet de caractériser un comportement viscoélastique des matériaux. (Van Kaam, (2005),[15])

3. Résultats :

3.2 Caractérisation rhéologique de la boue d'un BAMI

3.2a Expériences réalisées sur effluent synthétique.

Selon la courbe réalisée en contrainte croissante (figure 1), il semble que la boue suive un modèle de fluide viscoplastique. Les valeurs de viscosités sous 0,1 Pa (valeur approximative du seuil) sont en effet comprises entre 100 et 1000 Pa.s, pour chuter rapidement et se stabiliser autour de $3 \cdot 10^{-3}$ Pa.s après le seuil.

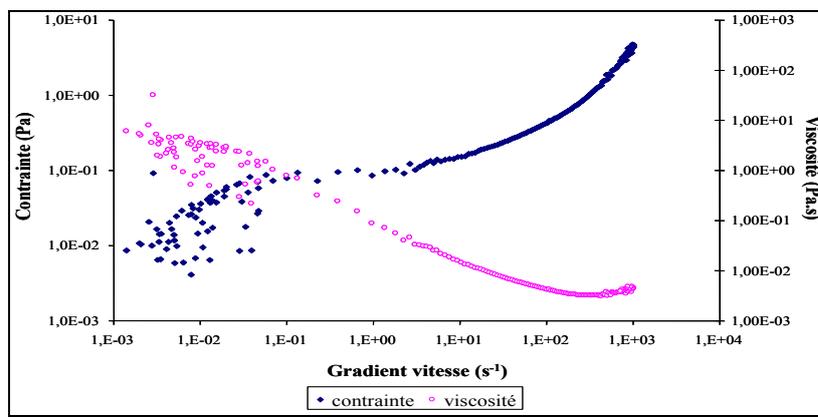


Figure 1 : Rhéogramme en contrainte croissante

Pour valider cette hypothèse, on a réalisé des expériences en oscillation, qui ont confirmé que la boue est un fluide viscoplastique avec un seuil d'écoulement autour de 0,1 Pa.

3.2b Expériences sur effluent domestique

Les expériences précédentes ont été réalisées avec de la boue alimentée par un effluent synthétique. On peut alors se demander si la caractérisation de ce fluide est liée à l'effluent ou si c'est une caractéristique du procédé BAMI.

Les analyses rhéologiques d'une boue alimentée par une eau domestique ont alors été réalisées. Dans un premier temps elles ont consisté en une comparaison des propriétés de la boue d'ensemencement et la boue une fois stabilisée.

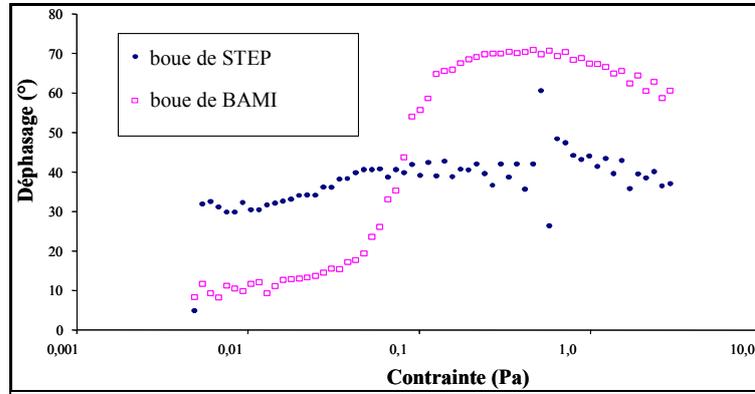


Figure 2 : Comparaison des échantillons en oscillation à fréquence de 0,1 Hz
 boue STEP : boue d'ensemencement
 boue de BAMI : boue alimentée par un effluent domestique et stabilisée

Pour confirmer la différence de comportement entre l'échantillon d'ensemencement et celui de la boue une fois stabilisée on a opéré des analyses rhéologiques en oscillation. Les résultats de ces analyses présentés sur la figure 2, confirment clairement la différence de comportement. La boue en phase stabilisée est viscoplastique avec un seuil d'écoulement qui se trouve autour de 0,1 Pa alors que la boue d'ensemencement ne montre pas de seuil. Ces résultats confirment donc que la viscoplasticité du fluide est bien une propriété intrinsèque du procédé BAMI et non pas liée à l'effluent.

Une dernière manière d'étudier le comportement sous cisaillement de la boue est de travailler en imposant des contraintes en palier. Lorsqu'on applique ou lorsqu'on supprime brutalement un cisaillement, va se manifester un régime transitoire pendant lequel la structure et donc la viscosité de l'échantillon évoluent avant de se stabiliser (Tixier, 2003) [16]. L'expérience suivante consiste alors en une montée en contraintes par paliers croissants de 120 secondes de 0,05, 0,1, 0,5, 1 et 2 Pa, suivie d'une descente symétrique (figure 3)

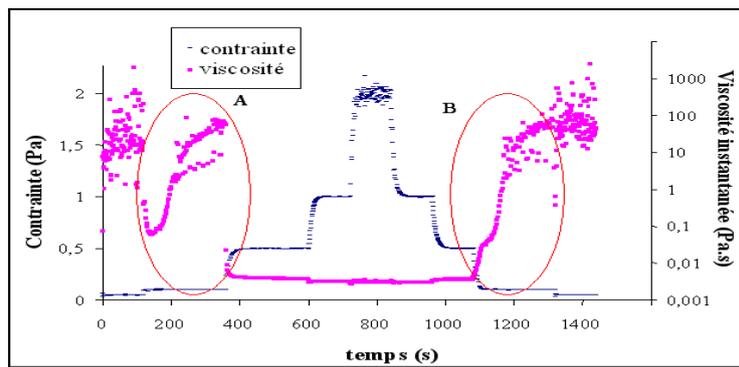


Figure 3 : Rhéogramme par paliers de contraintes.

Pour des faibles contraintes (inférieure à 0,1 Pa) le rhéomètre enregistre des valeurs de viscosité de l'ordre de 100 voire 1000 Pa.s. Ces valeurs de viscosités instantanées sont des valeurs importantes ce qui est la preuve que l'on se trouve dans la partie élastique, au dessous du seuil d'écoulement. Si on augmente la contrainte, la viscosité chute brutalement jusqu'à une valeur limite d'environ $3 \cdot 10^{-3}$ Pa.s pour 1 et 2 Pa de contrainte imposée. Quand on diminue les contraintes de façon inverse, on s'aperçoit que le phénomène est réversible. La boue semble donc avoir bien des propriétés de restructuration.

D'autre part si on fait un zoom sur les premiers paliers (0,05 et 0,1 Pa) et qu'on superpose les valeurs de viscosités obtenues en montée (zone A) et descente (zone B) on obtient la figure 4. Les paliers de 0,05 Pa et de 0,1 Pa se retrouvent respectivement sur les parties 1 et 2 de la figure. Il est alors remarquable de voir à 0,1 Pa, une chute de la viscosité suivie d'une remontée malgré l'application toujours constante de la contrainte. Le fluide semble se comporter de façon antagoniste :

- La contrainte de 0,1 Pa imposée tend dans un sens à déstructurer, désorganiser la boue. La viscosité chute alors.
- On observe ensuite une réaugmentation de cette viscosité malgré l'application toujours constante de la contrainte, comme si une force opposée à la force tangentielle imposée par la contrainte tendait à restructurer la boue

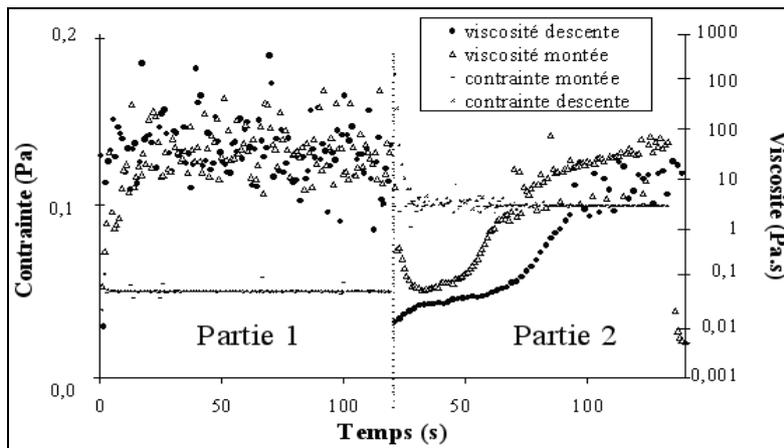


Figure 4 : Rhéogramme par paliers de contraintes croissantes (zoom).

Ce résultat est très intéressant d'un point de vue de la gestion du colmatage. En effet il est reconnu que plus la boue est floculée et plus aisée sera la filtration. Il apparaît donc d'après ces derniers résultats qu'il faille minimiser la contrainte de cisaillement au sein du réacteur. Or dans le cadre des BAMI, l'aération génère le plus de cisaillement nécessaire à la limitation du colmatage. Un compromis est donc à trouver afin de satisfaire à ces deux exigences antagonistes. Une aération intermittente pourrait être un bon compromis. En effet on peut émettre l'hypothèse que ce mode d'aération permettrait d'induire un cisaillement suffisant à la limitation du colmatage

quand l'air est injecté. Le temps sans aération permettrait au contraire de laisser des temps avec des cisaillements moindres pour que la boue se restructure.

3.3 Utilisation de la rhéologie dans la gestion du procédé :

3.3a simulation d'une aération intermittente avec un rhéomètre.

Pour vérifier cette hypothèse une dernière expérience a été réalisée sur un échantillon de boue dont le seuil d'écoulement a été déterminé à 0,01 Pa. L'expérience a consisté à simuler le syncopage de l'aération avec le rhéomètre. On a réalisé une expérience en imposant des contraintes en palier d'une minute à 0,05 Pa suivi d'un palier de 6 minutes à 0,005 Pa et on a suivi l'évolution de la viscosité au cours du temps. Les résultats de cette expérience sont représentés sur la figure 5.

Selon cette figure, on s'aperçoit bien que pendant la période où la contrainte est à son maximum (0,05 Pa) la viscosité du fluide est à son minimum (3.10^{-3} Pas) ce qui tend à prouver que la boue est dans son état de défloculation le plus avancée. En revanche quand on impose une contrainte plus basse (0,005 Pa) la viscosité a tendance à croître et peut atteindre une valeur de 0,1 Pa.s. Cette expérience semble donc bien démontrer la capacité de restructuration de la boue soumise à des contraintes de cisaillement intermittentes.

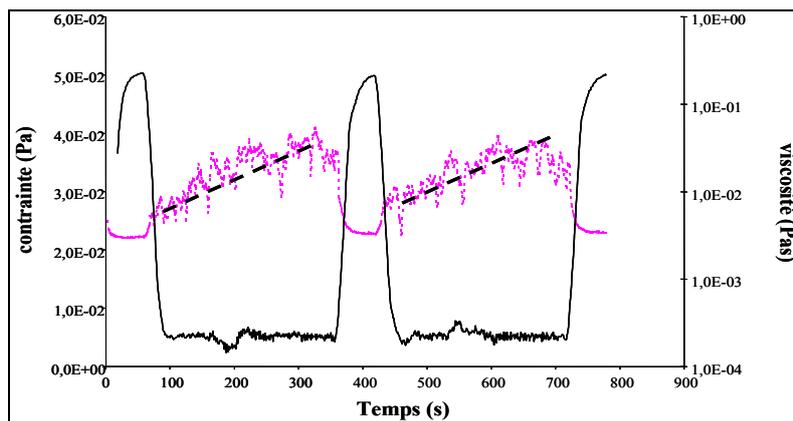


Figure 5 : contraintes en palier : 0,5Pa / 1 minute et 0,05 Pa / 6 minutes.

3.3b Intérêt de l'aération intermittente dans un BAMI

Pour minimiser la consommation énergétique engendrée par l'injection de ces bulles il faut parvenir à minimiser la dérive de pression tout en utilisant un débit le plus petit possible. Des expériences préliminaires au sein de l'équipe [17] avaient démontré qu'un débit d'air proche de 50 L/h suffisait pour limiter le colmatage sur deux jours d'expériences. On a donc choisi de travailler autour de ce débit mais distribué différemment.

- Dans une première expérience l'air a été injecté à 50 L/h en continu (flux net de 166 L/h.m²),
- Dans une deuxième expérience un débit de 200 L/h d'air a été injecté une minute toutes les six minutes (flux net 111 L/h.m²).

- Une troisième expérience a été réalisée avec un débit d'air de 370 L/h d'air mais en espaçant la fréquence d'injection toutes les 12 minutes (flux net 100 L/h.m²).
 A la fin de chaque expérience la membrane est sortie du réacteur et remplacée par une autre afin de partir du même état initial.
 En parallèle de ces expériences on a suivi l'indice de décantation de la boue selon ces différents modes d'aération. Cette expérience a été réalisée afin d'étudier l'impact du mode d'aération sur l'état de la boue. Les résultats sont consignés dans le tableau 2. Il est intéressant de noter que l'indice de boue décroît avec une diminution de la fréquence d'aération. Pour une aération continue la boue est non décantable alors que pour une aération syncopee 1/12 l'indice de décantation souligne une boue ayant une bonne floculation. Il semble donc qu'une augmentation du débit d'aération ne perturbe pas l'état de floculation de la boue.
 En revanche plus l'aération est fréquente (tendance à être continue) et plus l'état de la boue s'en trouve perturbé (augmentation de son indice de boue). Ces expériences confirment les résultats obtenus au paragraphe 3.3a : le fait d'injecter l'air de façon intermittente permet à la boue de se restructurer.

Tableau 2 : Evolution de l'indice de boue selon le mode d'aération

Mode	Débit	Indice de boue
Continu	50 L/h	Non décantable
1/6	200 L/h	241 (Décantable)
1/12	370 L/h	86 (Très décantable)

Mais pour pouvoir conclure quant à la réelle efficacité de l'intermittence de l'aération, il faut évaluer l'état de colmatage de la boue selon ces différents modes d'aération. Les dérives de pression associées à ces différentes expériences sont donc représentées sur la figure 6.

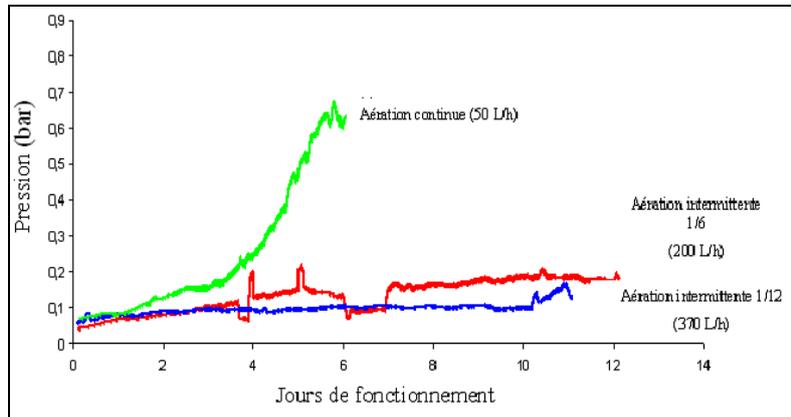


Figure 6 : pression transmembranaire selon le mode d'injection du débit d'aération pour une boue stabilisée à un âge de boue de 14 jours.

Les dérives de pression diminuent avec la fréquence d'aération. Pour une aération continue on observe une faible dérive de pression pendant les trois premiers jours.

Ce résultat est cohérent avec les résultats préliminaires mais cette dérive augmente brutalement après le quatrième jour de fonctionnement pour atteindre au final une dérive de 493 Pa/h. En revanche, pour l'aération intermittente d'une minute sur six, une très faible dérive est enregistrée durant les deux semaines d'expérience (58 Pa/h). Si on augmente encore l'espacement dans la fréquence d'injection des bulles on obtient alors une très faible dérive de 39 Pa/h. D'après cette expérience il est indéniable que le fait de syncoper l'aération soit bénéfique pour une meilleure prévention du colmatage. Cette technique ouvre également une voie dans la minimisation de la consommation énergétique liée à l'aération.

4. Conclusion

Cette analyse rhéologique a permis de démontrer que la boue activée présente dans le bioréacteur possédait les propriétés d'un fluide viscoplastique. Cela signifie que la boue possède des propriétés de restructuration si la contrainte de cisaillement qu'on lui impose n'est pas continue. Un temps de non application de contrainte est nécessaire. D'un point de vue gestion du colmatage dans le BAMI nous apportons ici une interprétation du bénéfice retiré d'une aération intermittente dans les BAMI : le cisaillement engendré par l'aération non continue permet à la boue de retrouver au moins partiellement sa structure et par la suite une bonne aptitude à la filtration.

Références bibliographiques

- [1] Chang I.S., Le-Clech P., Jefferson B., Judd S.J., *J. Environ. Eng.* 128 (2002) 1018-1029
- [2] Lee W., Kang S., Shin H., *Journal of Membrane Science* 216 (2003) 217-227
- [3] Bouhabila E.H., Ben Aïm R., Buisson H., *Desalination* 118 (1998) 315-322
- [4] Chua H.C., Arnot T.C., Howell J.A., *Desalination* 149 (2002) 225-229
- [5] Bai R., Leow H.F. *Separation Purification Technology* 29 (2002) 189-198
- [6] Cui Z.F., Chang S., Fane A.G., *Journal of Membrane Science* 221 (2003) 1-35
- [7] Gui P., Huang X., Chen Y., Qian Y., *Desalination* 151 (2002) 185-194
- [8] Gander M., Jefferson B., Judd S., *Separation Purification Technology* 18 (2000) 119-130
- [9] Owen G., Bandi M., Howell J.A., Churchouse S.J., *Journal of Membrane Science* 102 (1995) 77-91
- [10] Guibaud G., Dollet P., Tixier N., Dagot C., Baudu M., *Process Biochemistry* 39 (2003) 1803-1810
- [11] Slatter P.T., *Water Science Technology* 36 (1997) 9
- [12] Hasar H., Kinaci C., Ünlü A., Togrul H., Ipek U., *Biochemical Engineering Journal* 20 (2004) 1-6
- [13] M.E. Hernandez Rojas, R. Van Kaam, S. Schetrite, C. Albasi, *Desalination* 179 (2005) 95 -107
- [14] Albasi C., Bessière Y., Desclaux S., Remigy J.C., *Desalination* 146 (2002) 427-431
- [15] R. Vankaam, *Bioréacteur à membrane immergés pour le traitement d'eau usée domestiques ; influence des conditions de filtration et de l'hydrodynamique sur les performances du procédé*. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, spécialité Génie des Procédés 2005.
- [16] Tixier N., *Approches de propriétés rhéologiques de suspensions biologiques floculées*, Thèse Université de Limoges (2003)
- [17] Albasi C., Loos J.B., Alvarez C., Lorain O., *Récents progrès en génie des procédés- Lavoisier Technique et Documentation* 89 (2003) 321-328

Remerciements

Ce travail a reçu l'appui financier de la région Midi Pyrénées et de la société POLYMEM. Les auteurs ont bénéficié de l'utilisation à titre gracieux du rhéomètre de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse dans le cadre de la fédération de recherche FERMaT.