**SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE
SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE FILTRATION**

Colloque d'hydrotechnique — 20 et 21 novembre 1985

Transfert de matière et hydrodynamique
dans les procédés de séparation par membranes

Transfert de matière aux interfaces membrane-fluide

Transfer of material at membrane-fluid interfaces

M. Clifton

CNRS. — Laboratoire de chimie-physique et électrochimie
Université Paul Sabatier — Toulouse

Dans tous les procédés de séparation par membranes, la concentration de la solution traitée est modifiée à l'interface membrane-solution. C'est ce phénomène que l'on appelle « polarisation de concentration ». Dans beaucoup de procédés, la polarisation ne représente qu'une légère complication, mais dans certains d'entre eux, tels que l'ultrafiltration ou l'électrodialyse, c'est ce phénomène qui limite la productivité des installations. La polarisation peut aussi constituer la première étape vers le colmatage, c'est-à-dire la formation d'un dépôt sur la membrane, qui, au cours du temps, réduit progressivement l'efficacité du système.

In all membrane separation processes, the concentration of the treated solution is modified at the membrane-solution interface. This phenomenon is known as "Concentration polarization". In many processes, the polarization represents only a slight complication, but in some of these cases, such as that involving ultrafiltration or electrodialysis, this phenomenon limits the productivity of installations. Polarization may also constitute the first step towards colmatation, i.e. the formation of a deposit on the membrane, which, over the course of time, progressively slows down the system's efficiency.

1 - INTRODUCTION

Dans tous les procédés de séparation par membrane, le rôle de la membrane est d'arrêter le passage de certaines espèces et d'en laisser passer d'autres. La séparation se fait à la surface même de la membrane et si le mélangeage à cet endroit n'est pas parfait, il se crée au voisinage de la membrane un changement local dans la composition du fluide à traiter. Si ce fluide est une phase gazeuse (perméation gazeuse, diffusion gazeuse) le changement sera infime, mais dans les autres procédés qui traitent des produits en phase liquide, la plus forte viscosité et les plus faibles coefficients de diffusion dans cette phase imposent un mélangeage moins efficace et freinent le transfert de matière. Ainsi apparaît une couche de diffusion à la surface de la membrane qui agit comme une barrière supplémentaire. Ce phénomène, que l'on appelle "polarisation de concentration", a toujours pour effet de réduire l'efficacité des séparations. Dans beaucoup de procédés, la polarisation ne représente qu'une légère complication, mais dans certains d'entre eux, tels que l'ultrafiltration ou l'électrodialyse, c'est ce phénomène qui limite la productivité des installations.

2 - LA DIALYSE

Elle est sans doute le plus simple des procédés de séparation par membrane et le premier à être couramment utilisé, même si pendant très longtemps ses applications se limitaient aux préparations de laboratoire. A l'heure actuelle, elle représente, sous la forme d'hémodialyse, le procédé à membrane qui a le plus d'importance sur le plan économique. Elle opère par tamisage à l'échelle moléculaire et la force agissante est un gradient de concentration. Le principe de la dialyse est schématisé sur la figure 1.

Ce procédé est utilisé lorsqu'on a une solution qui contient à la fois des solutés A de forte masse molaire (macromolécules) et d'autres solutés B de faible masse molaire que l'on cherche à éliminer. D'un côté de la membrane de dialyse, on fait circuler la solution à traiter, de l'autre côté une solution qui ne contient pas de macromolécules et d'où sont absentes surtout les espèces B. La membrane retient les macromolécules, mais elle est suffisamment poreuse pour laisser passer les espèces de faible taille; ainsi les espèces B sont libres de diffuser au travers de la membrane sous l'effet de la différence de concentration en B dans les deux solutions. De cette façon, on arrive à éliminer les espèces B dont la présence est gênante, sans modifier sensiblement la concentration en macromolécules A.

Considérons maintenant de quelle manière l'effet de la polarisation de concentration intervient dans ce procédé. Pour que la dialyse puisse opérer, il faut que le système reste en état de déséquilibre, c'est-à-dire qu'il faut préserver la différence de concentration de part et d'autre de la membrane. Cette exigence est étroitement liée à l'efficacité du transfert de matière dans les deux couches de

Figure 1. La dialyse

solution qui sont en contact avec la membrane: les espèces qui passent au travers de la membrane doivent être remplacées d'un côté et évacuées de l'autre. Au sein de la solution, le transfert de matière peut se faire rapidement, par convection, mais au voisinage de la membrane, la convection n'est plus aussi forte et le transport par diffusion devient de plus en plus important au fur et à mesure que l'on s'approche de l'interface membrane-solution. A l'interface même, la convection, évidemment, est nulle et le transfert est exclusivement diffusif. Ainsi se créent les profils de concentration tels qu'on les voit sur la figure 1.

La présence des couches de polarisation réduit la différence de concentration qui peut opérer au niveau de la membrane et ralentit la séparation. On peut atténuer ces effets en augmentant l'agitation des deux côtés de la membrane: une agitation plus forte réduit l'épaisseur des couches de polarisation et accélère le renouvellement des solutions au voisinage de la membrane. Ainsi, dans les hémodialyseurs, la polarisation du côté dialysat de la membrane est très faible, mais du côté sang, où une agitation trop forte risquerait de provoquer la formation d'un caillot, l'effet de la polarisation peut être sensible [1].

3 - L'ULTRAFILTRATION

L'ultrafiltration a ceci en commun avec la dialyse que la membrane utilisée retient les macromolécules et laisse passer les petites espèces; elle opère aussi par un effet de tamisage. Elle diffère de la dialyse en ce que la force agissante est une différence de pression. De cette façon, il y a non seulement les solutés de petite taille qui traversent la membrane mais aussi et surtout les molécules de solvant. Le principe de l'ultrafiltration est schématisé sur la figure 2.

Figure 2. L'ultrafiltration

En ultrafiltration, les macromolécules qui sont amenées vers la surface de la membrane par le mouvement du solvant ont tendance à s'y accumuler. En régime stationnaire, cet effet est équilibré par la diffusion qui résulte du gradient de concentration en macromolécules (voir la figure 2).

La couche de polarisation en ultrafiltration se distingue des couches qui apparaissent dans d'autres procédés par le fait que les macromolécules diffusent bien plus lentement que les molécules de petite taille: le coefficient de diffusion pour une protéine est environ cent fois plus faible que pour un sel minéral. Pour cette raison, la couche de polarisation en ultrafiltration n'a qu'une épaisseur de quelques microns et la concentration de macromolécules à la surface de la membrane peut atteindre cent fois la valeur qui existe

Figure 3. Vitesse de perméation (v , $\mu\text{m/s}$) en fonction de la pression appliquée (ΔP , bar) dans l'ultrafiltration de solutions d'albumine de sérum bovin à quatre concentrations d'alimentation (2; 10; 30 et 60 g/litre).

au sein de la solution. De telles variations de concentration donnent lieu à d'importantes variations dans les propriétés de la solution: variations de viscosité, de pression osmotique et du coefficient de diffusion des macromolécules. L'effet de ces variations se manifeste dans le fonctionnement des unités d'ultrafiltration. On trouve même que ce sont les phénomènes de polarisation qui limitent la capacité des appareils. Pour une solution d'alimentation de concentration donnée, si l'on trace le flux d'ultrafiltrat à travers la membrane en fonction de la pression appliquée (figure 3), on trouve une courbe qui monte de façon linéaire à basse pression, puis s'incurve avant d'atteindre un palier qui représente un flux limite. Une fois le flux limite atteint, une augmentation supplémentaire de pression n'entraîne plus d'augmentation de flux. La valeur de la vitesse limite de perméation dépend des conditions opératoires: lorsqu'on augmente la concentration de la solution d'alimentation, elle diminue et elle augmente lorsqu'on augmente la vitesse de balayage de la surface de la membrane.

La première explication proposée pour rendre compte de ce phénomène est la "théorie du gel" [2]. Selon cette théorie, la solution à la surface de la membrane, au delà d'une certaine pression, peut devenir si concentrée en macromolécules qu'il y a dépôt d'un gel. Cette couche de gel agit comme une épaisseur supplémentaire de membrane et crée une résistance additionnelle au passage d'ultrafiltrat. Augmenter, sous ces conditions, la pression imposée ne fait que provoquer un épaissement de la couche de gel sans augmenter le flux de solvant. Le flux d'ultrafiltrat que l'on observe dans ce cas serait ainsi le flux limite.

Cette théorie est plausible parce qu'on trouve souvent, en effet, un dépôt gélatineux sur la surface des membranes après une opéra-

tion d'ultrafiltration. D'autre part, les auteurs de cette théorie avait proposé une relation entre la vitesse limite de perméation et la concentration c' de la solution d'alimentation:

$$v_{\text{lim}} = k \ln(c/c') \quad (1)$$

où k est le coefficient de transfert de matière et c est la concentration de gélification. Dans beaucoup de cas, les observations expérimentales confirment cette relation semi-logarithmique.

Maintenant cette théorie est dépassée et il est possible de donner une explication plus détaillée de ce qui se passe dans la couche de polarisation en ultrafiltration. D'abord, il a été trouvé que l'on pourrait observer un flux limite avec des solutions d'alimentation qui ne forment jamais de dépôt et dans des cas où l'on peut s'assurer que la couche de polarisation reste fluide [3]. Ceci est le cas notamment avec des solutions de polymères très solubles. Il semble que le flux limite dans ces cas peut s'expliquer par l'effet de la pression osmotique. La vitesse de perméation v d'une membrane d'ultrafiltration est proportionnelle à la différence de pression efficace entre les deux faces de la membrane:

$$v = L_p (\Delta P - \Delta \Pi) \quad (2)$$

où L_p est la perméabilité hydraulique de la membrane, ΔP est la différence de pression hydraulique et $\Delta \Pi$ est la différence de pression osmotique. Ainsi la pression osmotique agit contre le passage d'ultrafiltrat. Les auteurs de la théorie du gel avaient considéré, d'après l'équation de VAN'T HOFF, que les macromolécules, à cause de leur forte masse molaire, devraient provoquer des pressions osmotiques négligeables. Mais en réalité, dans le cas des solutions macromoléculaires, l'équation de VAN'T HOFF n'est valable qu'à des concentrations très faibles. Aux concentrations élevées que l'on peut trouver dans la couche de polarisation en ultrafiltration, la pression osmotique est du même ordre de grandeur que la pression que l'on applique dans ce procédé et elle augmente avec la concentration d'une façon exponentielle. Certains auteurs [4 - 7] ont proposés des modèles mathématiques de ce phénomène qui démontrent que la pression osmotique à elle seule est capable de rendre compte de l'existence d'un flux limite. Dans le traitement très simple mis au point par SMOLDERS et coll. [5, 6], on retrouve une relation semi-logarithmique semblable à l'équation (1).

Par ailleurs, le lien entre le flux limite et la présence d'un dépôt sur la membrane ne semble plus aussi étroit que dans la théorie du gel. La perméabilité hydraulique d'une membrane sur laquelle un dépôt s'est formé est certes bien plus faible que la perméabilité de la membrane avant utilisation mais le changement n'est pas suffisamment importante pour expliquer le flux limite. Evidemment, la perméabilité hydraulique de la membrane encrassée se mesure en remplaçant la solution d'alimentation par du solvant pur et on est obligé de

supposer que la couche de gel garde les mêmes propriétés au cours de cette substitution. Mais c'est à cela que l'on devrait s'attendre s'il s'agit d'un véritable gel.

Si la présence d'un dépôt sur la membrane n'explique pas l'existence d'un flux limite, il pourrait bien expliquer un autre phénomène que l'on observe en ultrafiltration. Lorsqu'un appareil est utilisé à une pression fixe, on remarque que le flux de perméat n'est pas constant mais diminue au cours du temps. La baisse est rapide juste après la mise en marche de l'appareil et s'atténue progressivement sans jamais disparaître entièrement. Il est assez bien établi que cette diminution du débit d'ultrafiltrat est due à une réduction continue de la perméabilité de la membrane, une réduction qui pourrait s'expliquer par la formation d'une couche de gel, c'est-à-dire par le colmatage de la membrane.

Le colmatage de la membrane est accéléré par la polarisation de concentration. La forte concentration de macromolécules que l'on trouve à la surface de la membrane, même si à elle seule elle ne provoque pas de dépôt de gel, favorise cependant certains processus - la dénaturation des protéines, l'adsorption - qui eux peuvent donner lieu à la formation d'un gel. La cinétique de ce colmatage peut donc être ralentie en évitant d'opérer sous des conditions de forte polarisation; cela implique surtout le choix d'une pression opératoire inférieure à la pression qui donnerait le flux limite. De toute manière, un certain colmatage des membranes est inévitable lorsqu'on veut traiter des liquides d'intérêt industriel (des bains de peinture, le lait, le plasma sanguin etc.) qui sont invariablement des produits salissants. Le seul remède est d'incorporer une phase de lavage dans le cycle d'opération de toute installation d'ultrafiltration. En ce qui concerne les produits biologiques, ce lavage serait nécessaire de toute façon pour des raisons d'hygiène.

Dans le cas de l'ultrafiltration le seul moyen efficace que l'on a trouvé pour réduire la polarisation se trouve dans la conception de l'appareil. Normalement, on fait circuler la solution à traiter au contact avec la membrane dans des "canaux minces", c'est-à-dire d'un diamètre hydraulique de l'ordre du millimètre. L'écoulement est dans le régime laminaire et la petite taille du canal sert à augmenter la contrainte de cisaillement à la surface de la membrane. L'utilisation du régime turbulent ou l'introduction de "promoteurs de turbulence" dans les canaux dépense une certaine énergie de pompage que l'on pourrait dépenser avec un meilleur rendement dans le régime laminaire et avec des canaux minces [8, 9]. La turbulence provoquée au sein de la solution est peu efficace parce qu'elle ne pénètre pas jusqu'à la couche de polarisation qui, en ultrafiltration, est d'une très faible épaisseur.

Le détail de l'hydrodynamique de la couche de polarisation en ultrafiltration est assez intéressant. L'existence d'un gradient de concentration à l'intérieur de la couche de polarisation, implique la présence d'un fort gradient de viscosité. Dans un écoulement la-

Figure 4. Profil de vitesse de balayage du côté haut pression en ultrafiltration

minaire, un tel gradient donne lieu à un profil de vitesse qui comporte un point d'inflexion (voir la figure 4) et un écoulement de ce type étant instable, on devrait s'attendre à ce qu'il se produise des remous dans la couche de polarisation. Ces remous vont accélérer le transfert de matière en ajoutant un effet convectif au transport diffusionnel et de cette façon on devrait obtenir une augmentation du flux limite. Dans nos propres travaux, nous avons observé certains effets qui confirment cette hypothèse [4] et d'autres auteurs [3, 9] ont pu observer directement la présence de perturbations hydrodynamiques dans la couche de polarisation.

On peut voir que le phénomène de polarisation en ultrafiltration est particulièrement complexe et jusqu'ici aucune théorie n'a réussi à en donner une représentation satisfaisante. Donc pour le moment (et peut-être pour toujours) la valeur du flux limite reste imprévisible. Si l'on veut choisir une unité d'ultrafiltration adaptée à une tâche spécifique, il est préférable de faire des essais préliminaires avec un appareil pilote. Le fait que les membranes d'ultrafiltration sont vendues sous forme de cartouches rend relativement facile la mise en oeuvre de tels essais.

4 - L'OSMOSE INVERSE

L'osmose inverse, que l'on appelle aussi "hyperfiltration", ressemble à l'ultrafiltration de certains points de vue puisque la force agissante est la même (voir la figure 5). La distinction entre les deux se trouve dans l'action de la membrane: la membrane d'ultra-

Figure 5. L'osmose inverse

filtration ne retient que les macromolécules alors que la membrane d'osmose inverse retient les ions minéraux et les molécules organiques, même la plupart des molécules les plus petites. La séparation se fait dans une certaine mesure par tamisage (les grosses molécules sont en général plus faciles à retenir que les petites) mais les affinités chimiques des solutés (aptitude à former des liaisons hydrogène par exemple) sont très importantes. C'est en essayant de rendre compte de ce dernier aspect que l'on a proposé un mécanisme de solution-diffusion: la peau dense de la membrane est considérée comme une phase continue et pour passer au travers de la membrane, la molécule en question doit se dissoudre dans cette phase et ensuite diffuser vers la face basse pression.

La polarisation se produit en osmose inverse, comme en ultrafiltration, par une opposition entre convection et diffusion. Toutefois, elle n'a pas ici la même importance: les solutés que l'on sépare par osmose inverse diffusent assez rapidement et en plus, les membranes d'osmose inverse sont moins perméables que celles d'ultrafiltration, ce qui implique des vitesses de perméation plus faibles. On peut dire aussi que la polarisation en osmose inverse est mieux comprise et plus facile à atténuer; elle est prédite de façon satisfaisante par le coefficient de transfert de matière donné par les corrélations classi-

ques du génie chimique. Cependant, il serait dangereux de ne pas tenir compte de la polarisation lors d'un calcul d'appareillage. Son effet, par rapport à un état de mélange idéal, est d'augmenter la pression osmotique de la solution en contact avec la membrane, ce qui entraîne une diminution du flux d'eau et une augmentation du flux de soluté. D'autre part, le traitement de certaines solutions contenant des solutés peu solubles provoque la précipitation de ces substances sur la surface de la membrane. Le dessalement de certaines eaux saumâtres nécessite un prétraitement assez considérable, ce qui est gênant surtout étant donné que la plupart des installations de dessalement par osmose inverse fonctionnent dans des sites isolés. Un problème analogue se pose dans l'utilisation de l'osmose inverse pour concentrer les moûts de raisin (saturés en tartrates). De toute façon, même si la polarisation de concentration ne prend pas ici la même importance qu'en ultrafiltration, elle pose souvent des problèmes épineux surtout aux fabricants de modules industriels d'osmose inverse.

La relation entre la concentration à la surface de la membrane (c_s), la concentration d'alimentation (c') et la concentration du perméat (c'') peut se calculer avec une précision suffisante à l'aide de la relation suivante, basée sur le modèle du film [9, 10]:

$$(c_s - c'') / (c' - c'') = \exp(v/k) \quad (3)$$

où v est la vitesse de perméation de la membrane et k est le coefficient de transfert de matière. Ce dernier peut s'estimer à partir d'une des corrélations courantes, par exemple l'équation de SIEDER et TATE [10] dans le cas d'un écoulement turbulent:

$$Sh = 0,023 Re^{0,80} Sc^{0,33} \quad (4)$$

5 - LA PERVAPORATION

La pervaporation tient une place particulière parmi les procédés à membrane. C'est, en effet, le seul procédé qui comporte un changement de phase et qui s'applique généralement aux mélanges liquides plus qu'aux solutions. Son intérêt principal réside dans le fait qu'elle permet de séparer des mélanges azeotropiques, mais elle peut servir aussi pour l'élimination d'impuretés présentes sous forme de traces. Son principe de fonctionnement est schématisé sur la figure 6.

D'un côté de la membrane s'écoule le mélange liquide à traiter, de l'autre côté de la membrane on crée un vide de telle façon que le liquide qui a diffusé au travers de la membrane s'évapore et que la concentration des composants du mélange soit toujours proche de zéro. On fait passer la vapeur dans un condenseur à très basse température et une phase liquide se reconstitue. La membrane est fabriquée d'un matériau qui a une affinité marquée pour l'un des constituants du mélange. C'est ce constituant, A, qui passe le plus rapidement au travers de la membrane et le produit recueilli sera enrichi en A. Ce procédé est

Figure 6. La pervaporation

capable d'atteindre des sélectivités extrêmement élevées.

La polarisation de concentration en pervaporation crée des profils de concentration d'une forme particulière (voir la figure 6). Les deux constituants sont portés vers la membrane à une vitesse qui correspond à la vitesse moyenne de perméation, mais le composant A traverse la membrane à une vitesse plus grande que la moyenne et une diffusion de A vers la membrane doit s'ajouter à la convection. Pour le composant B, l'inverse est vrai et la diffusion a lieu en sens inverse. En même temps que la polarisation de concentration, il existe aussi une polarisation thermique. Pour que l'évaporation puisse avoir lieu à la surface de la membrane, il faut fournir la chaleur d'évaporation. Cette chaleur est amenée par conduction et par convection mais au prix de l'apparition de gradients de température. Cette deuxième polarisation constitue, sans doute, un frein plus sérieux au procédé que la polarisation de concentration.

Figure 7. L'électrodialyse

6 - L'ELECTRODIALYSE

Tous les procédés examinés jusqu'ici opèrent avec des membranes qui sont électriquement neutres (ou à peu près neutres). A la différence de ces procédés, l'électrodialyse utilise des membranes à charges fixes; la force agissante est un champ électrique continu. L'électrodialyseur (figure 7) est constitué, dans un arrangement de type filtre-presse, par un empilement de membranes respectivement sélectives aux anions et aux cations (membranes anioniques et cationiques) séparées par des cadres où circulent à co-courant les solutions à concentrer ou à diluer. Par suite de l'alternance des membranes sélectives, les ions

enlevés d'un compartiment sous l'influence du champ électrique (compartiment diluat) se concentrent dans les compartiments voisins (compartiments concentrat). L'électrodialyseur est ainsi constitué d'un empilement de motifs élémentaires, chacun comprenant une membrane anionique, une membrane cationique, un compartiment diluat et un compartiment concentrat (figure 7).

La polarisation de concentration dans ce cas s'explique par le fait que le courant électrique est transporté au sein de la solution par tous les ions et dans les membranes seulement par les cations ou par les anions. Ainsi la valeur du nombre de transport d'un ion est toujours supérieure dans la membrane sélective correspondante à ce qu'elle est au sein de la solution. Il en résulte (figure 8) à l'interface membrane-solution un effet de pompage du côté fournisseur d'ions (compartiment diluat) lié à une accumulation du côté receveur d'ions (compartiment concentrat). L'écoulement des solutions parallèlement aux membranes limite le développement de ce phénomène vers l'intérieur du compartiment à une couche comparable aux couches de polarisation que l'on trouve ailleurs.

Pour une densité de courant donnée, un état stationnaire s'établit pour lequel au transport des ions par migration vient s'ajouter un transport par diffusion. Si on augmente le courant électrique, le gradient de concentration augmente jusqu'à une valeur limite atteinte lorsque la concentration à une paroi d'un compartiment diluat tend vers zéro. La densité de courant correspondante est appelée "densité de courant limite", i_{lim} . La figure 9 montre la variation de la densité de courant i en fonction de la différence de potentiel U appliquée à un motif d'électrodialyse. Il faut remarquer la similitude entre cette figure et la figure 3: l'ultrafiltration et l'électro-

Figure 8. Profils de concentration en électrodialyse

Figure 9. La densité de courant (i , $A m^{-2}$) en fonction de la différence de potentiel (ΔU , volt) appliquée dans l'électrodialyse de solutions de KCl à trois concentrations d'alimentation (0,05; 0,1 et 0,2 mole/litre)

dialyse sont toutes deux des procédés dont la capacité de production est limitée par des effets de transfert de matière.

La connaissance de la valeur de la densité de courant limite à une importance capitale dans la conception d'une installation d'électrodialyse. Compte tenu du prix élevé des membranes sélectives, il convient d'opérer à des densités de courant les plus grandes possibles, donc proches de i_{lim} , afin de minimiser la surface de membrane nécessaire à une séparation donnée. Toutefois, il ne faut pas dépasser cette valeur car alors, la résistance des solutions au voisinage des membranes devient très élevée, ce qui entraîne des champs électriques locaux très importants. Il y a alors déplacement de l'équilibre d'ionisation de l'eau dans le sens de la formation d'ions H^+ et OH^- . Outre la variation locale de pH qui peut provoquer la précipitation d'hydroxydes et la détérioration des membranes, il se produit également une augmentation de l'énergie dépensée et une baisse du rendement.

La valeur de i_{lim} peut se calculer à partir de la concentration au sein du compartiment diluat (c''), les nombres de transport de l'ion particulier dans la membrane ($\bar{t}$) et dans la solution (t):

$$i_{lim} = Fkc''/(\bar{t}_+ - t_+) \quad (5)$$

pour une membrane cationique, où F est le faraday et k le coefficient de transfert de ma-

tière. Ce dernier doit se calculer à l'aide de corrélations spécifiques puisque les compartiments d'électrodialyseur contiennent presque toujours des promoteurs de turbulence [11], généralement sous forme de grilles. Cette façon d'améliorer le transfert de matière s'avère efficace dans ce procédé parce que les sels minéraux que l'on sépare par électrodialyse diffuse rapidement; cela implique une couche de polarisation qui dans un canal dégagé serait assez épaisse. Les promoteurs de turbulence permettent de réduire considérablement cette épaisseur et d'augmenter dans la même proportion la valeur de k .

7 - LA PIEZODIALYSE

La piézodialyse est un procédé qui permet de désioniser l'eau en utilisant une pression comme force agissante. Dans ce procédé une solution fortement concentrée en sel passe au travers de la membrane et la solution qui reste en trouve sa salinité réduite. Les membranes utilisées sont des membranes à charges fixes qui possèdent des zones échangeuses d'anions et de cations disposées en forme de "mosaïque". La juxtaposition serrée de résines échangeuses d'anions et de cations dans une même membrane permet d'obtenir une membrane fortement perméable au sel.

Par rapport à l'osmose inverse, ce procédé a l'avantage de constituer un système où

Figure 10. La piézodialyse

c'est le composant mineur, le sel, qui passe au travers de la membrane: ainsi la présence d'une fuite n'implique qu'une légère perte de produit plutôt que sa contamination. Parce que le chemin de transfert du courant peut être beaucoup plus court que dans le cas de l'électrodialyse, les problèmes de polarisation devraient être moins graves que dans ce dernier procédé [12].

En dépit de ces avantages, la piézodialyse est restée jusqu'ici au stade d'un sujet de recherche et cette recherche a été entreprise presque exclusivement par une seule société américaine. L'explication de cette situation se trouve dans les difficultés que l'on a rencontrées au cours de la mise au point des membranes. A l'heure actuelle, il semble peu probable que ce procédé ait jamais une importance commerciale quelconque.

La polarisation intervient à deux niveaux dans la piézodialyse. Il y a une polarisation macroscopique telle que l'on la voit sur la figure 10; le transfert de sel dans la membrane étant plus rapide que le transfert d'eau, la solution à l'interface membrane-solution s'appauvrit en sel. Cette polarisation ressemble à celle que l'on trouve dans le compartiment dilué en électrodialyse. L'autre polarisation est à plus petite échelle: elle concerne le transfert d'ions, et ainsi le transfert de courant, entre les zones cationiques et les zones anioniques de la membrane. L'effet de cette micro-polarisation peut être atténué en diminuant la taille des zones de charge différente: ceci fait partie des problèmes de fabrication des membranes.

8 - CONCLUSION

Les procédés de séparation par membranes ont fait des progrès remarquables en relativement peu de temps et en dépit d'une méfiance initiale de la part des utilisateurs potentiels, leur insertion dans l'industrie est bien avancée. On peut dire que ces procédés

ont atteint, ou sont près d'atteindre, le stade de la maturité. Pourtant, notre compréhension du transfert de matière dans ces procédés est encore incomplète. Ceci est particulièrement évident dans le cas de l'ultrafiltration où des progrès considérables restent à faire et où les recherches sont toujours très actives. Un autre domaine où l'on peut s'attendre à du nouveau est celui du perfectionnement des promoteurs de turbulence. Jusqu'ici la conception des promoteurs a été surtout intuitive et un plus grand effort de réflexion pourrait apporter une amélioration notable.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C.K. COLTON, K.A. SMITH, E.R. MERRILL et S. FRIEDMAN, *AIChE J.*, 17(1971)800
- [2] W.F. BLATT, A. DRAVID, A.S. MICHAELS et L. NELSEN, *Membrane Science and Technology*, p. 47, Plenum Press, New York, 1970
- [3] G. JONSSON, *Desalination*, 51(1984)61
- [4] M.J. CLIFTON, N. ABIDINE, P. APTEL et V. SANCHEZ, *J. Membrane Sci.*, 21(1984)233
- [5] J.G. WIJMANS, S. NAKAO et C.A. SMOLDERS, *J. Membrane Sci.*, 20(1984)115
- [6] J.G. WIJMANS, S. NAKAO, J.W.A. VAN DEN BERG, F.R. TROELSTRA et C.A. SMOLDERS, *J. Membrane Sci.*, 22(1985)117
- [7] P. AIMAR et V. SANCHEZ, 2nd International Conference on Fouling and Cleaning in Food Processing, 14-17 July 1985, Madison, U.S.A.
- [8] J. HIDDINK, D. KLOOSTERBOER et S. BRUIN, *Desalination*, 35(1980)149
- [9] R.F. MADSEN, *Hyperfiltration and Ultrafiltration in Plate-and-frame Systems*, Elsevier, New York, 1977
- [10] H. STRATHMANN, *Chemie-Ing. Techn.*, 44(1972)1160
- [11] G. JONSSON et C.E. BOESEN, *Desalination*, 21(1977)1
- [12] F. SCHWAGER, P.M. ROBERTSON et N. IBL, *Electrochim. Acta*, 25(1980)1655
- [13] F.B. LEITZ, *Membrane Separation Processes*, p. 261, ed. P. Meares, Elsevier, Amsterdam, 1976

Discussion*Président : M. R. BUVET*

M. QUEMENEUR demande des explications sur la mise en évidence du point d'inflexion de la courbe de la figure 4 du texte de la conférence. *M. CLIFTON* répond que ce point a été calculé dans le cas d'un écoulement stable mais que la réalité peut être différente et que les turbulences peuvent intervenir avant d'atteindre cet état. Il précise également que la modélisation de cette zone reste à faire mais que l'interaction entre transfert de matière et écoulement hydrodynamique rend le problème très difficile. Une méthode de mesure physique semble difficile à appliquer car les grandeurs en jeu sont de l'ordre de quelques microns.

M. HACHE ajoute que l'anémométrie laser permet de descendre au 100^e de millimètre et devant l'objection de *M. CLIFTON* qui précise qu'il s'agit de distances inférieures, il préconise une maquette de simulation à une plus grande échelle en utilisant les similitudes. Le problème serait d'obtenir des gradients de viscosité importants.

M. GRIFFON : La limite entre ultra et microfiltration étant mal définie et le problème de polarisation étant important en ultrafiltration, qu'en est-il en microfiltration ?

M. CLIFTON explique qu'il y a effectivement lieu de se poser la question car, étant donné que les particules ne diffusent pas, il n'y a pas de gradient de concentration près de la membrane. Des études ont été menées sur le comportement de suspension de particules en cisaillement mais la réalité semble plutôt se rapprocher de la théorie traditionnelle des gâteaux de filtration.

M. RIOS souligne l'importance des interactions entre membrane et constituants d'une part et entre constituants eux-mêmes d'autre part par rapport au phénomène de polarisation de concentration (des recherches sont menées sur ce thème dans le cas des protéines). Il insiste sur l'intérêt de disposer en ultrafiltration de moyens d'étude permettant de jouer distinctement sur débit de perméation et taux de rejet.

M. CLIFTON explique que l'on espère séparer albumines et globulines par l'application d'un champ électrique qui influe alors sur le rejet.