

5

Utiliser au mieux les matières premières

Pour utiliser au maximum une matière première, il faut être capable de la fractionner en composés de plus petite taille possible pour ensuite les valoriser tous. Si nous avons fait du bon travail, ce qui restera sera considéré comme un déchet ultime. Il sera forcément en quantité très faible et présentera *a priori* une toxicité elle aussi faible.

Pour obtenir ce résultat, il est nécessaire de faire de l'ingénierie au niveau de la molécule et de mettre en œuvre un tamis moléculaire capable de faire le tri entre les molécules et si possible d'isoler les plus toxiques.

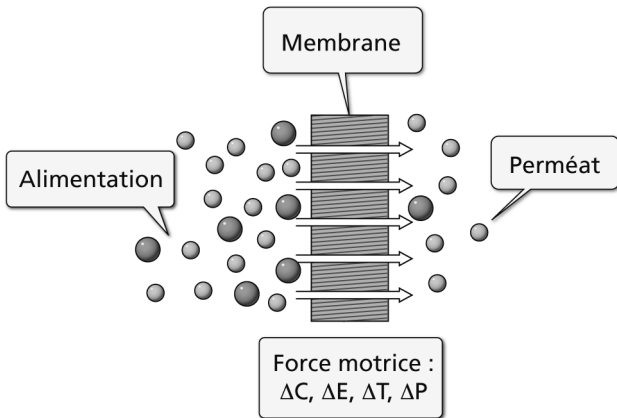
Cet outil existe ; il s'appelle une membrane, et nous allons maintenant investiguer le domaine des procédés membranaires.

MEMBRANES ET PROCÉDÉS MEMBRANAIRES : DES OUTILS POUR L'INGÉNIERIE VERTE AU NIVEAU DE LA MOLÉCULE

Vous ne le savez peut-être pas, mais les procédés de séparation à membranes sont déjà impliqués dans de nombreuses opérations industrielles. Le domaine d'application de ces techniques est très

étendu et concerne en particulier : l'agroalimentaire et la production d'eau potable ; le traitement d'eaux usées pour le recyclage ; la médecine, avec la mise au point d'organes artificiels ; la pharmacie, pour la diffusion contrôlée des médicaments ; la production de l'énergie de demain, avec les piles à combustible ; enfin, la protection globale de l'environnement.

Les membranes sont à la base de ces procédés et font l'objet d'un grand nombre de travaux de recherche dans leur conception et leur mode de mise en œuvre. La membrane, du latin « *membrana*, *membre* » est tout simplement un filtre qui agit comme un tamis. Les trous de ce tamis sont tellement petits qu'ils peuvent filtrer des molécules. On parle donc de membrane, ou « tamis moléculaire ». La membrane est définie comme une « *structure matérielle mince permettant l'arrêt ou le passage de substances entre les volumes qu'elle sépare, sous l'effet d'une force de transfert* ». Elle autorise le passage préférentiel de certaines substances entre deux phases : « l'alimentation » et le « perméat ». Paul Mulder, un chercheur hollandais, l'a décrite en 1991 de la manière suivante :



16 | Schéma de principe de la séparation membranaire.

Comme le précise la définition, un aspect fondamental des procédés membranaires est la force motrice mise en jeu. Cette force motrice provient d'une différence de paramètres de nature variable : concentration (ΔC), potentiel électrique (ΔE), pression (ΔP) ou température (ΔT).

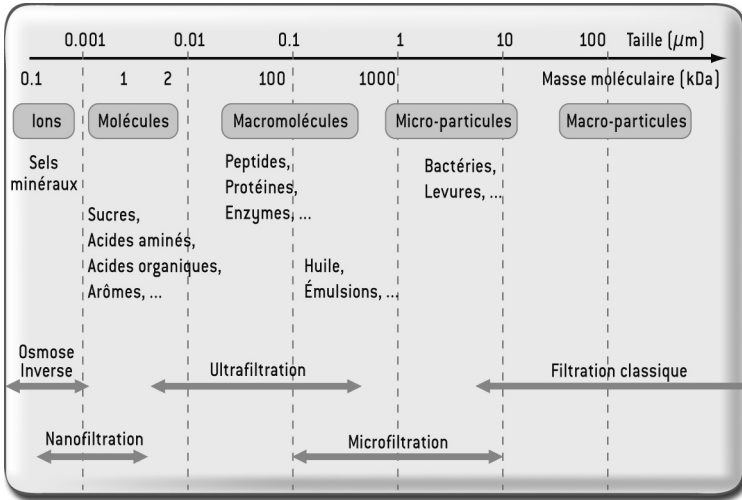
Si vous réfléchissez au problème, votre machine à café est un réacteur sophistiqué de génie des procédés. Le filtre à café peut être en effet considéré comme une membrane de filtration. Elle retient le café mais laisse passer l'eau et les arômes préalablement extraits. La force motrice de cette séparation est une force de pression liée à la gravitation. Imaginez que vous mettiez votre cafetière à l'envers ! Il n'y aurait plus de procédé possible et votre cuisine serait dans un triste état...

Les différents procédés traitant une phase liquide sont classés par famille dans le tableau suivant :

Procédé membranaire	Nature du perméat	Force motrice
Microfiltration (MF)	Liquide	ΔP
Ultrafiltration (UF)	Liquide	ΔP
Nanofiltration (NF)	Liquide	ΔP
Osmose Inverse (OI)	Liquide	ΔP
Dialyse	Liquide	ΔP
Osmose	Liquide	ΔP
Électrodialyse (ED)	Liquide	ΔE
Pervaporation (PV)	Gazeux	ΔP
Distillation Membranaire (DM)	Liquide	ΔT
Thermo-Osmose	Liquide	ΔT

17 | Tableau des procédés membranaires.

Pour savoir quels procédés vous devez utiliser en fonction des composés à séparer, la figure suivante vous permet de devenir rapidement un chimiste spécialiste des procédés membranaires utilisant la ΔP pour mettre les espèces en mouvement.



18 | Les procédés membranaires et les performances de séparation.

SÉPARATION MEMBRANAIRE AU NIVEAU MOLÉCULAIRE POUR LES ALIMENTS, COMPATIBLE AVEC LA CHIMIE VERTE

La filtration sur membrane est une technique efficace de clarification, de concentration, de fractionnement (séparation de différents éléments), de dessalement, de purification... Elle sert également à améliorer la sécurité des aliments, tout en évitant de les soumettre à un traitement thermique. Cela permet d'économiser de l'énergie fossile.

Cette technologie intervient dans la fabrication de produits alimentaires : les jus de fruits et de légumes (jus de carottes ou de pommes), les fromages (ricotta), la crème glacée, le beurre ou certains laits fermentés, les produits laitiers écrémés ou pauvres en lactose, le lait microfiltré, et enfin les bières non alcoolisées, les vins et les cidres, etc.

Prenons l'exemple du fromage. L'ultrafiltration du lait constitue la première innovation réelle de l'histoire de la fabrication du fromage,

et offre des avantages non négligeables aux fabricants et aux consommateurs que nous sommes. Certains des nutriments, comme les glucides, les vitamines et les minéraux solubles présents dans le lait disparaissent du lactosérum au cours du processus de fabrication du fromage. Ces pertes ont des répercussions considérables sur l'économie du processus de transformation. En récupérant ces molécules valorisables, la marge dégagée est plus importante et de ce fait le procédé devient encore plus rentable.

L'ultrafiltration est un moyen efficace de récupération de ces produits dérivés, qui peuvent ensuite être utilisés dans la fabrication d'autres produits alimentaires. Parallèlement, elle permet d'obtenir à meilleur coût des fromages à plus forte valeur nutritionnelle. La microfiltration favorise aussi l'élimination des micro-organismes indésirables dans le lait entrant dans la fabrication de fromages au lait cru.

Un exemple concret ? Les Pavés d'Affinois sont issus des techniques de l'ultrafiltration mises au point par Jean-Claude Guilloteau et l'INRA. Ce procédé permet d'obtenir un caillé plus homogène et donne des fromages à très grandes valeurs nutritionnelles. Le procédé permet aussi de fractionner le lait et d'en récupérer toutes les composantes intéressantes. Alors, la prochaine fois que vous verrez un Pavé d'Affinois dans un rayon de supermarché, vous aurez la démonstration que la chimie verte est déjà à votre portée.

Avec l'exemple du lait, les techniques classiques utilisées pour améliorer la durée de conservation et la sécurité d'emploi reposent sur un traitement thermique comme la pasteurisation et la stérilisation. La microfiltration est de plus en plus utilisée pour réduire la présence de bactéries, pour améliorer la sécurité microbiologique des produits laitiers et surtout pour préserver le goût ! Le lait microfiltré frais a une durée de conservation supérieure au lait frais pasteurisé selon les techniques traditionnelles. La technologie de filtration sur membrane connaît aussi de nouveaux développements comme la « thermisation » du lait écrémé à 50 °C, qui garantit le même niveau

de sécurité alimentaire. Cela permettra la commercialisation de nouveaux laits pouvant être conservés à température ambiante pendant six mois et dont le goût sera comparable au lait frais pasteurisé. Stabiliser un produit alimentaire sans ajouter d'additifs, sans avoir à le chauffer et à utiliser de l'énergie, en respectant les molécules qui le composent, voici un très bel exemple de chimie verte.

LES MEMBRANES EMPÊCHERONT-ELLES LA TERRE DE MANQUER D'EAU DOUCE ?

Séparer au niveau moléculaire, c'est aussi dépolluer ou décontaminer un produit noble pour le rendre utilisable ou réutilisable. Entre séparation moléculaire et recyclage de matière, nous sommes ici aussi dans le domaine de la chimie verte avec un exemple important, celui de l'eau potable, dont nous avons déjà abordé les risques de pénurie.

Surexploitées, polluées, ou encore asséchées par la canicule, les réserves d'eau potable sont mises à mal ; ce qui laisse présager une pénurie d'eau d'ici quelques décennies. La sécheresse et la canicule exceptionnelle de l'été 2003, suivies par les mêmes phénomènes climatiques en 2005, ont entraîné une baisse record du niveau des fleuves et des nappes d'eaux souterraines en Europe. Les nappes souterraines sont en danger à cause d'une surexploitation. Dans le Midwest américain, le niveau moyen a baissé de 3 mètres en dix ans. Enfin la pollution... Pesticides, bactéries, engrais et déchets industriels contaminent durablement les nappes. C'est le cas des nitrates en agriculture, qui s'infiltrent dans les sols et polluent les eaux phréatiques.

Pourquoi ne pas éviter les pénuries en faisant de l'eau douce avec de l'eau de mer ou de l'eau... sale ? Après tout, c'est logique de prendre l'eau là où elle est la plus abondante, dans la mer et les océans ; mais aussi de traiter les eaux saumâtres, les eaux usées. Comment ? Par les membranes !

Les procédés à membranes tels que l'osmose inverse et l'électrodialyse sont des procédés de référence pour le dessalement de l'eau

de mer ou des eaux saumâtre. Ils sont une alternative technico-économique particulièrement intéressante aux procédés thermiques comme la distillation.

Le dessalement de l'eau de mer, c'est d'abord pomper cette eau, qui a une salinité importante due au NaCl (35-39g/l en mer Méditerranée, 40 g/l en mer Rouge, 13 g/l en mer Caspienne et 270 g/l en mer Morte). La prise d'eau de mer est suivie d'une filtration grossière. Ensuite un prétraitement est appliqué avec une filtration plus fine et une addition de composés biocides et antitartre. Le procédé de dessalement lui-même est alors appliqué ; les membranes utilisées ont des tailles de pores tellement faibles qu'ils retiennent tout sauf l'eau. Un post-traitement avec reminéralisation de l'eau produite est prévu : une eau trop pure débarrassée totalement de sel serait impropre à la consommation. Il faut donc ajuster la concentration en sel autour de 0,5 g/l, c'est-à-dire 500 ppm, pour la rendre directement potable.

Des projets énormes existent sur le pourtour méditerranéen et en Asie. Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse est une réponse qui s'intègre parfaitement dans la philosophie de la chimie verte à condition que nous, les chercheurs, soyons capables de répondre de façon tangible à la question que vous devez vous poser : que fait-t-on de la partie concentrée en sel ? Les projets en cours d'installation dans le sud de l'Espagne répondent à cette question par des rejets de saumures entre 5 et 10 km au large, avec des débits faibles afin de permettre une dilution instantanée dans la mer Méditerranée. Concernant la consommation énergétique (électrique) des procédés d'osmose inverse, si elle est comparée à celle du procédé concurrent, la distillation flash détente, les valeurs sont plus favorables, avec une empreinte écologique plus forte pour le procédé thermique de distillation, qui produit des quantités importantes de CO₂.

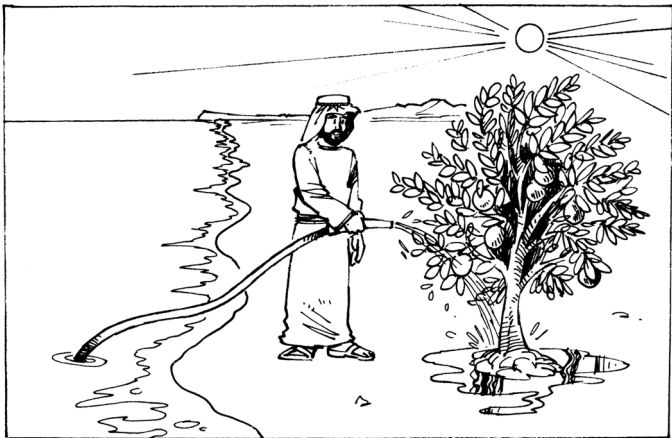
Les procédés membranaires sont donc très bien positionnés dans des applications de séparation de grande envergure. Au titre des avantages de ce type de séparation, le produit final obtenu est de grande qualité et totalement inerte du fait des performances de séparation

élevées, du traitement doux à basse température et d'une absence de résidus indésirables. Les membranes remplacent efficacement les traitements utilisant des solvants organiques comme le dichlorométhane ou l'hexane. Elles sont faciles d'emploi, et l'extrapolation pour construire des usines est aisée. L'automatisation, la compacité, la conception modulaire font des membranes des « legos » faciles à mettre en place en fonction des besoins. Enfin, des économies d'énergie sont à attendre par rapport aux procédés thermiques, qui utilisent essentiellement du fuel ou du gaz.

Toutefois, le niveau d'investissement et le temps de retour en amortissement sont encore élevés, avec un coût de fonctionnement devant intégrer le remplacement des membranes. Ces dernières nécessitent un nettoyage régulier du fait du colmatage, phénomène incontournable de la filtration.

Les procédés membranaires ne sont pas encore à la portée de toutes les bourses mais les travaux faits sur les membranes et le génie des procédés qui lui sont associés tendent à limiter les coûts.

Restons donc optimistes, la chimie verte se doit de devenir accessible à tous et partout !



19 | Faire pousser des oranges dans le désert : un défi pour les membranes.