



MATIÈRE

Dessaler l'eau de mer grâce aux membranes bio-inspirées

Par Mihail Barboiu, directeur de recherche au CNRS et membre de l'Institut européen des membranes¹ de Montpellier.

Plus de 2,2 milliards de personnes – soit un être humain sur trois – manquent d'eau potable.

Compte tenu de l'évolution rapide de la croissance de la population mondiale et de ses activités économiques sur fond de changement climatique, de nombreux pays auront besoin de solutions urgentes. Dessaler l'eau de mer est une idée séduisante. Pour ce faire, des membranes filtrantes, laissant passer les molécules d'eau mais stoppant les ions qui composent le sel, ont été mises au point depuis une cinquantaine d'années. Mais leurs performances n'ont jusqu'à présent permis d'obtenir que des solutions très coûteuses en énergie, contribuant elles-mêmes au changement climatique. La membrane hybride que nous avons mise au point² pourrait changer la donne. Combinaison d'une matrice en polyamide, déjà utilisée par les industriels de la désalinisation, et de canaux artificiels d'eau, elle permet de dessaler trois fois plus d'eau et de consommer 12 % d'énergie en moins pour chaque mètre cube d'eau traité que les méthodes actuelles.

Environ 100 millions de mètres cubes d'eau par jour sont actuellement dessalés dans le monde. Plusieurs technologies de pointe sont utilisées. Elles sont majoritairement fondées sur un procédé inspiré de la nature : l'osmose. Celle-ci correspond par exemple au passage spontané d'eau à travers les pores d'une membrane qui sépare deux solutions de concentrations différentes en sel : l'eau passe de la moins concentrée à la plus concentrée, ce qui dilue cette dernière et

aboutit à réduire la différence de concentration entre les deux solutions. Mais pour dessaler l'eau de mer, il faut au contraire « pousser » l'eau dans le sens inverse à ce mouvement spontané, afin d'obtenir des concentrations en sel très différentes de part et d'autre de la membrane, voire une concentration nulle ou presque d'un côté. Il faut pour cela appliquer de fortes pressions sur l'eau. On parle d'osmose inverse sous pression.

La synthèse de telles membranes, dites biomimétiques car elles reproduisent des processus biologiques, bénéficie des progrès constants de la chimie. Plus d'un demi-siècle s'est écoulé depuis la conception de la première membrane utilisée pour le dessalement par osmose inverse. Réalisée sous la forme d'une couche mince de polyamide, elle présente une perméabilité d'eau allant de 1 à 1,5 litre par mètre cube par heure par bar, et un taux de rejet de sel de 99 %. Plus récemment, la fabrication de

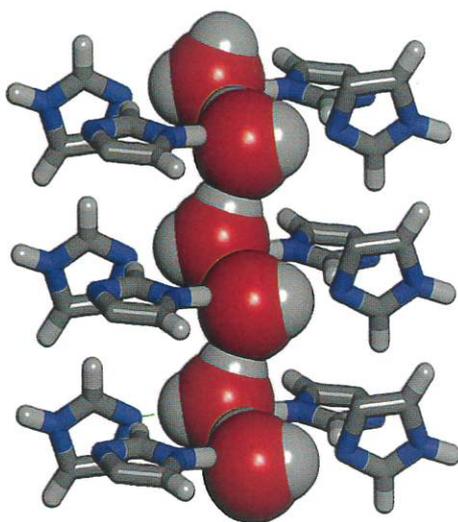
membranes constituées de films minces en polyamide englobant des nanoparticules a amélioré la perméabilité avec cependant un plus faible taux de rejet du sel.

Des protéines pour membranes bio-assistées

D'autres membranes, mises au point dans les années 2010, ont misé sur une imitation encore plus poussée de la nature. Elles incorporent des protéines, les aquaporines, formant des canaux perméables à l'eau et rejetant les ions. La découverte de ces aquaporines, qui assurent cette tâche au sein de la membrane des cellules biologiques, a valu le prix Nobel de chimie au biologiste américain Peter Agre en 2003. Grâce à elles, la perméabilité des membranes s'est améliorée d'environ de 30 %, mais avec une sélectivité aux ions réduite (le taux de rejet du sel n'est que de 97 %). Et surtout, les applications à grande échelle de membranes hybrides polyamide-aquaporines souffrent toujours de nombreux inconvénients : coût élevé de production des aquaporines par biosynthèse, faible stabilité, contraintes de fabrication, instabilité aux hautes pressions...

Canaux artificiels et fils d'eau moléculaire

Pour améliorer les membranes pour le dessalement, les aquaporines peuvent être remplacées par des canaux synthétiques, les canaux artificiels d'eau (ou AWC pour *artificial water channel*), pour lesquels l'intérêt s'est considérablement accru ces dix



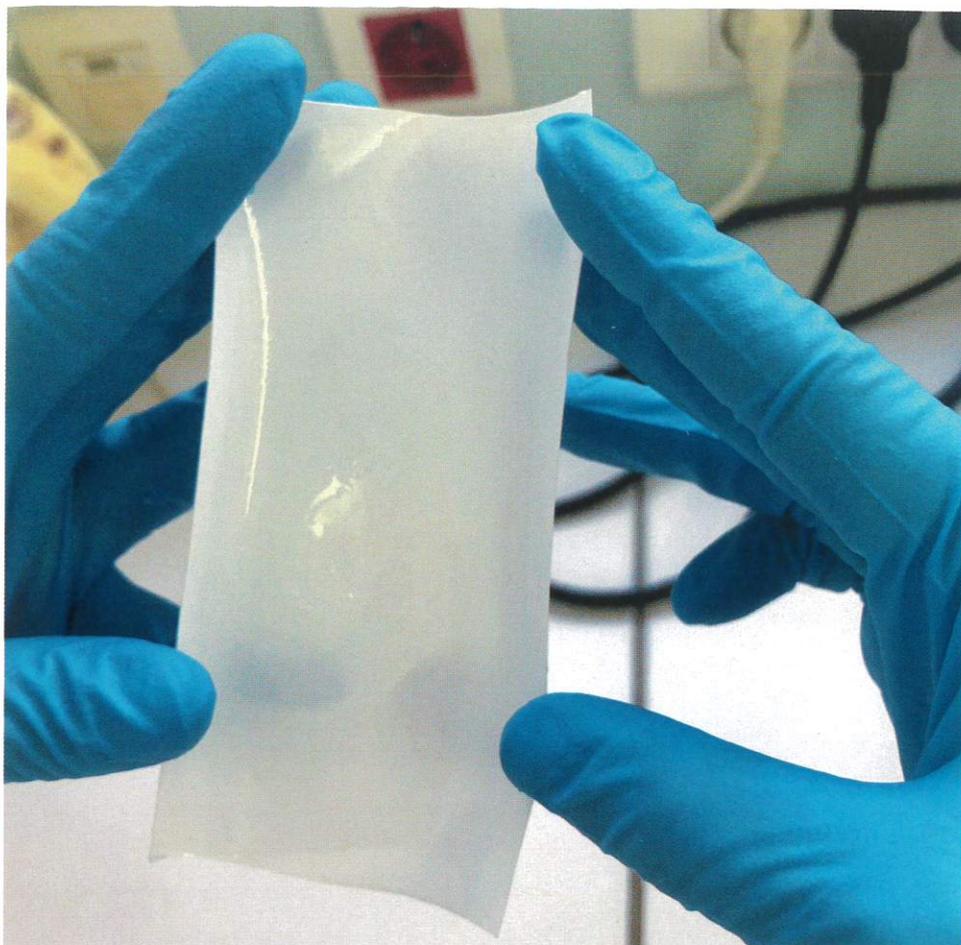
© MIHAIL BARBOIU, INSTITUT EUROPEEN DES MEMBRANES

► Molécules d'eau alignées en file indienne dans un canal artificiel d'eau.

POLYAMIDE

Matière synthétique dont la structure chimique se caractérise par la répétition d'un ou de plusieurs atomes ou de groupes d'atomes. Le nylon est un polyamide.

1. Unité CNRS/Univ. Montpellier/ENSC Montpellier. 2. Coordonnée par l'Institut européen des membranes de Montpellier, l'équipe du CNRS a coopéré avec des chercheurs de l'École polytechnique de Turin, de l'Université des sciences et technologies du roi Abdallah (Arabie saoudite) et du Lehn Institute of Functional Materials, School of Chemistry (Chine).



► La membrane hybride bio-mimétique mise au point par les chercheurs.

dernières années. Nous avons par exemple travaillé sur des canaux dits « l-quartet » qui peuvent s'insérer dans une bicouche lipidique, semblable à la membrane de nos cellules biologiques. Nous avons alors découvert que pour traverser ces canaux, les molécules d'eau s'alignent sélectivement en file indienne (on parle de fils d'eau moléculaire).

Mieux encore : celles-ci sont orientées d'une façon bien précise qui s'explique par la polarité de la molécule d'eau conjuguée à l'asymétrie des canaux eux-mêmes. Comparé à un agencement aléatoire, cet arrangement dit chiral engendre une plus grande mobilité des molécules dans les canaux, favorisant ainsi les transports de matière, avec un apport énergétique extérieur réduit.

Ces canaux d'eau artificiels ont donc vite représenté une alternative prometteuse mais fabriquer à l'échelle du mètre de telles membranes biomimétiques s'est avéré complexe. Pour

POLARITÉ DE LA MOLÉCULE D'EAU

Une molécule d'eau (H_2O) se comporte comme un petit aimant avec deux pôles positifs et un négatif. Cette polarité conduit les molécules d'eau à s'attirer les unes les autres.

CHIRAL

Un objet est chiral s'il n'est pas superposable à son image dans un miroir.

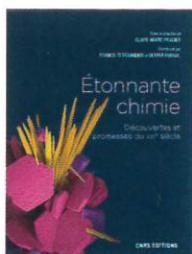
réussir ce passage à l'échelle, nous avons donc plutôt mis sur la combinaison des AWC avec l'éprouvé polyamide des premiers temps. Tout l'enjeu étant d'intégrer les AWC en douceur sans créer de défauts dans la membrane. Nous y sommes parvenus en améliorant le processus conventionnel de polymérisation utilisé pour produire les membranes polyamide. Et nous avons obtenu une structure hybride AWC-polyamide en forme de « super-éponge ». Ces travaux ont fait l'objet d'une demande de brevet en

2019 et de telles membranes hybrides sont en cours de développement avec plusieurs partenaires industriels.

Des membranes hautement sélectives

Leurs performances en perméabilité (3 litres par mètre cube par heure par bar) et rejet de sel (supérieure à 99,5 %) permettent de réduire de 12 % la facture d'énergie pour trois fois plus d'eau produite qu'avec les méthodes actuelles dont les rendements stagnent depuis cinquante ans. Elles constituent donc un changement d'échelle, tout en offrant une amélioration de la stabilité à long terme de ces matériaux et la réduction des dimensions des installations de dessalement. On pourrait aussi envisager l'utilisation de ces membranes pour la production d'une façon plus simple d'eau ultra-pure nécessaire à la fabrication des vaccins ou des composants de la microélectronique, tout en évitant d'utiliser des procédés coûteux d'échange ionique très sensibles à la dureté de l'eau dans certaines régions du monde.

Comprendre l'écoulement sélectif de l'eau dans des canaux artificiels est un domaine tendant un pont entre des recherches fondamentales et des applications industrielles. Étonnamment, des canaux artificiels d'eau de dimension nanométriques (un nanomètre vaut un millionième de millimètre, soit 10^{-9} mètre !) permettent de fabriquer des mètres carrés de membranes pour produire des millions de mètres cubes d'eau dessalée par jour... C'est la beauté de la chimie qui a le pouvoir de construire ses objets à des échelles différentes et pour des applications si diverses. ||



Pour en savoir +

Étonnante chimie. Découvertes et promesses du XXI^e siècle, sous la direction de Claire-Marie Pradier, coordonné par Francis Teyssandier et Olivier Pradier, CNRS Éditions, 22 €, à paraître le 1^{er} avril 2021.

www.cnrseditions.fr