

Quelles nouvelles perspectives pour dessaler l'eau aux Etats-Unis ?

Publié le vendredi 7 novembre 2014

Voir en ligne : <https://www.france-science.org/Quelles-nouvelles-perspectives.html>

La raréfaction de l'eau douce est une problématique globale croissante en raison de l'accroissement de la population, de l'activité industrielle et humaine et du réchauffement climatique. En effet, les Nations Unies estiment qu'un tiers de la population mondiale vit dans des zones en stress hydrique et ce chiffre devrait doubler d'ici 2025 [1]. Les Etats-Unis n'échappent pas à ce problème et plusieurs centres de recherche américains, parfois soutenus par les Etats, étudient les technologies de dessalement de l'eau de mer, voire de l'eau saumâtre, en tant que nouvelle source d'approvisionnement en eau douce étant donné son abondance [2].

L'Université du Nebraska Lincoln en association avec le Département Américain de l'Agriculture (*US Department of Agriculture* ou USDA) a mis en place un système de suivi de la sécheresse dans le pays [3]. Si l'on en croit la carte présentée sur le site plus du tiers des Etats-Unis souffre d'une manière ou d'une autre d'un manque d'eau, les Etats les plus affectés étant les Etats de la côte ouest et les Etats du sud, touchant respectivement 51 millions et 15 millions d'habitants. L'Etat de Californie est particulièrement touché par la sécheresse, la majorité de l'Etat ayant été déclaré en situation de "sécheresse exceptionnelle," c'est-à-dire le plus haut niveau d'alerte. Les conséquences de cette dernière sont importantes et des efforts de réduction de consommation ont été demandés à la population.

Le cas de l'Etat du Texas est intéressant à mentionner. Dans cet Etat, le manque d'eau est chronique et bien que, en moyenne sur l'ensemble de l'Etat, la disponibilité en eau douce n'ait que relativement peu diminué, le manque de cette dernière s'est fait de plus en plus sentir au cours de la décennie passée, exacerbé par un accroissement important de la demande en eau. Cet accroissement est dû en particulier au boom du secteur de l'énergie fossile qui est un grand consommateur d'eau, en particulier les usines de raffinage et les technologies de fracturation hydraulique, ainsi qu'à une augmentation significative de la population du Texas. En effet, 500 nouvelles personnes s'installent à Houston chaque jour attirées par la prospérité économique actuelle de l'Etat. Ainsi, des tensions entre les différents secteurs consommateurs d'eau, population, agriculture et secteur énergétique, commencent à voir le jour [4]. C'est pourquoi le *Texas Water Development Board* (TWDB) a inscrit le dessalement d'eau dans leur plan stratégique sur l'eau dès 2012 [5]. Ils projettent que d'ici 2060, cette technique produira près de 155 millions de m³, ce qui représentera 1,5% des besoins en eau de l'Etat. En fait, le Texas comprend à ce jour 46 usines de dessalement d'eau (eau saumâtre) avec une capacité municipale de traitement de 123 millions de gallons par jour. A cette capacité s'ajoutent entre 60 et 100 millions de gallons d'eau par jour issus du dessalement dans les industries énergétiques et des semi-conducteurs. Il est intéressant de noter que la plus grande usine de dessalement d'eau saumâtre en Amérique du Nord se situe à El Paso, Texas, avec une capacité d'environ 27,5 millions de gallons d'eau par jour [6]. L'usine Kay Bailey Hutchison est opérationnelle depuis août 2007. Cette infrastructure comporte également un centre de recherche accessible aux universités et aux infrastructures de recherches intéressées et un centre de formation et d'éducation. Le coût de cette infrastructure a été de 90 millions de dollars avec un coût d'élimination des concentrés de 19 millions de dollars. Alimenté par de l'énergie solaire, le puits d'injection en eau profonde permet de stocker 3 millions de gallons/jour de concentrés issus du dessalement avec un impact environnemental limité [7]. D'autres projets de dessalement d'eau de mer sont également en cours d'étude pour augmenter la production d'eau douce au sein de l'état.

Le dessalement de l'eau

La disponibilité en eau potable, qu'elle soit destinée à la consommation, à l'irrigation agricole ou à l'industrie, est de plus en plus réduite. Or, les réserves en eau salée, qu'elles proviennent des océans ou des nappes souterraines, sont considérables. D'où, l'idée de transformer l'eau salée en eau douce potable par un procédé de dessalement. L'opération de dessalement d'eau requiert de grandes infrastructures et une quantité importante d'énergie pour leur fonctionnement, limitant ainsi leur développement à travers le monde.

Le dessalement d'eau est le procédé d'élimination des sels et autres minéraux pour l'obtention d'eau potable. La salinité de l'eau peut être classée en 3 catégories suivant sa teneur en sels dissous [8] :

- Eau douce : 0 - 1.000 mg/L
- Eau saumâtre : 1.000 - 10.000 mg/L
- Eau salée : >10.000 mg/L

A titre d'exemple, l'eau de mer a une teneur d'environ 35.000 mg/L de sels dissous et le procédé le plus simple pour la dessaler repose sur des étapes de vaporisation-condensation. En raison de sa consommation énergétique élevée, ce procédé n'est pas favorisé industriellement. Actuellement la technique de dessalement de l'eau la plus employée est l'osmose inverse. Elle représente environ 40% de la production d'eau potable mondiale par dessalement [9]. Le coût moyen de production de 1233 m³ d'eau potable à partir d'eau saumâtre souterraine varie entre 357 et 782\$ alors que le coût estimé de production du même volume mais à partir d'eau de mer varie entre 800 et 1400\$.

Le marché du dessalement d'eau est en constante augmentation et devrait atteindre 87,8 milliards de dollars en 2016 même si cela ne représente que 1% de l'eau potable mondiale [10]. Un exemple de l'intérêt croissant pour ce marché est le rachat récent de la société américaine NanoH₂O, spécialisée dans le développement et la production de membranes pour l'obtention d'eau douce par osmose inverse, par le groupe coréen LG Chem., valorisant ainsi l'entreprise à 22 milliards de dollars [11]. Les membranes QuantumFlux RO développées par NanoH₂O, dont le siège restera à Los Angeles, sont implantées dans plus de 150 infrastructures de dessalement réparties dans 36 pays, avec une production de plus de 300 millions de litres d'eau par jour.

Toutefois bien que différentes technologies de dessalement d'eau existent actuellement sur le marché, aucune n'est satisfaisante notamment en termes d'énergie et en termes de simplicité d'utilisation. Ainsi, la recherche et le développement de nouvelles technologies dans ce domaine reste très active. Aux Etats-Unis, le *Bureau of Reclamation* (BoR) du *US Department of Interior*, organisme dédié à la gestion de l'eau dans l'Ouest, finance chaque année des projets de recherche et des usines pilotes dans le cadre du programme de Purification et Dessalement de l'eau. En août 2014, le BoR a annoncé les noms des lauréats d'un programme de financement de la recherche doté de 1,4 millions de dollars [12]. Parmi les 9 projets retenus, 4 projets de recherche à l'échelle du laboratoire étudient la faisabilité de procédés novateurs et 3 projets à l'échelle du pilote portent sur la viabilité et la pertinence d'un procédé. Le BoR a également renouvelé le financement de deux projets pilotes de l'an dernier. Il est intéressant de souligner que parmi les lauréats, un tiers des projets provient du Texas : l'Université de Houston va ainsi recevoir une bourse pour son projet sur les prétraitements avancés pour la nanofiltration d'eau saumâtre de surface ; l'Université du Texas à San Antonio va de son côté étudier l'utilisation des boues actives des usines de retraitement des eaux pour le dessalement d'eau saumâtre et, enfin, la ville de Corpus Christi a vu le renouvellement du financement de son pilote de dessalement d'eau de mer.

Les technologies de désalement de l'eau salée

Aux Etats-Unis, la R&D associée au dessalement de l'eau se concentre essentiellement sur les technologies d'osmose inverse avec l'amélioration des membranes. D'autres technologies innovantes ne nécessitant pas de membrane sont en cours d'étude.

1. Amélioration des technologies à base de membranes

1.1. Osmose : naturelle ou inverse ?

Le phénomène d'osmose fait référence à l'équilibrage des concentrations en un soluté donné entre deux liquides de part et d'autre d'une membrane semi-perméable sans action extérieure. Dans le cas de l'osmose inverse, l'eau douce est obtenue par pressurisation de l'eau salée à travers une membrane semi-perméable ne laissant passer que l'eau. Cette technique bien que très efficace requiert des membranes délicates et onéreuses qui peuvent facilement être contaminées. De plus, l'eau salée doit subir un traitement au préalable complexe et chronophage. Ce procédé industriel requiert également des pressions de l'ordre de 50 à 80 bars pour des rendements de l'ordre de 50% alors que la pression osmotique de l'eau de mer est d'environ 29 bars. L'un des principaux inconvénients de l'osmose inverse est donc son coût notamment en raison des

fortes pressions nécessaires à son fonctionnement. Dans une perspective de réduction des coûts, de nouveaux filtres, Perforene™ en graphène, ont été développés par Lockheed Martin avec des trous d'un nanomètre de diamètre capables de laisser passer l'eau en bloquant les ions sodium et chlorure. Avec ces filtres, le dessalement peut être opéré avec une pression deux fois moindre que celle utilisée traditionnellement ce qui permettrait une diminution des coûts énergétiques de 15 à 20% [14], [15].

1.2. Nanotechnologies à base de graphène

Les propriétés physiques du graphène font de ce matériau un élément de choix pour la réalisation de filtres ultrafins pour le dessalement de l'eau. Le graphène est une structure plane hexagonale de carbones d'un atome d'épaisseur. Il est le constituant structural de nombreux matériaux tels que les nanotubes de carbone. Matériau robuste et quasiment transparent, il présente des propriétés conductrices.

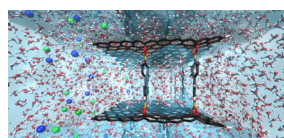
Utilisation de filtres bombardés

C'est en effet le matériau choisi par une équipe internationale composée de chercheurs du MIT, du Laboratoire National Oak Ridge et de l'Université du Pétrole et des Minéraux King Fahd en Arabie Saoudite [16]. Afin d'obtenir un filtre ultrafin, ils ont développé une technique pour réaliser des trous de taille contrôlée sur des feuilles de graphène. Pour cela, ils bombardent les feuilles de graphène avec des ions gallium à haute énergie, ce qui engendre des défauts cristallins et affaiblit des liaisons C-C environnantes. En plongeant ces feuilles de graphène modifiées dans une solution oxydante, les défauts vont être altérés jusqu'à former des trous dans les feuilles de graphène. Plus le temps d'immersion de la feuille est important, plus les trous formés seront grands. En maîtrisant la taille des pores, les chercheurs peuvent alors contrôler le passage de divers éléments (cations, anions, molécules organiques ou rien) à travers les feuillets de graphène modifiés.

Grâce cette technique, il est ainsi possible de créer un filtre pour le dessalement de l'eau de mer avec des débits plus importants que ce qui est actuellement commercialisé. Contrairement aux membranes classiques qui présentent une faible perméabilité, les filtres en graphène peuvent supporter un flux bien plus élevé avec une épaisseur plus faible en raison de leur densité élevée en pores nanométriques. Les chercheurs ont obtenu une membrane avec 5 trillions de pores au cm², densité, semble-il, bien adaptée pour le dessalement de l'eau avec un taux de rejet en sel élevé et un flux d'eau à travers le filtre important. D'après une simulation informatique, leur membrane présenterait une perméabilité 50 fois supérieure à celle des membranes à base de polymère traditionnellement utilisées. Les chercheurs désirent maintenant développer de plus grands filtres pour des applications commerciales. Au-delà du dessalement d'eau, de nombreuses applications peuvent être envisagées pour cette nouvelle technique en particulier pour la production et le stockage de l'énergie ainsi que pour la production pharmaceutique.

Déssalement avec un filtre oxydé

De leur côté, les Dr. Vincent Meunier et Adrien Nicolai de l'Institut Polytechnique Rensselaer, New York, et le Dr. Bobby Sumpter du Laboratoire National Oak Ridge ont modélisé informatiquement un matériau hybride peu coûteux, le réseau d'oxyde de graphène (*Graphene Oxide Framework* ou GOF), afin d'étudier ses performances comme membrane de purification de l'eau [17]. Le GOF est constitué de feuilles d'oxyde de graphène reliées entre elles par des liants chimiques spécifiques au niveau de certains sites d'oxydation. Le caractère hydrophobe, la résistance à l'eau et les propriétés électroniques ajustables de ce matériau en font un bon candidat comme membrane pour le dessalement. De plus, en circulant entre les deux feuilles d'oxyde de graphène hydrophobes, l'eau forme des canaux ce qui engendre un temps de traversée du système plus court et ainsi un accroissement de la performance du dispositif.



Simulation à l'échelle atomique réalisée à l'Institut Polytechnique Rensselaer qui illustre le potentiel des graphene oxide frameworks (en noir) pour éliminer les contaminants tels que les sels (en bleu et vert) des eaux saumâtres et de mer

Les chercheurs ont entre autre simulé l'impact sur ses performances de l'épaisseur des couches, de la densité des liants chimiques et de la pression appliquée sur le matériau. Ils ont déterminé qu'il existe un équilibre optimum entre la perméabilité et la sélectivité du matériau, critères déterminants pour l'efficacité de ce dernier. En effet, si le lien est trop dense, le matériau sera très sélectif mais à contrario il aura un flux d'eau plus faible. Les simulations ont montré que pour la structure GOF optimisée, l'élimination des ions de l'eau salée serait 100 fois plus rapide que les matériaux traditionnels utilisés en osmose inverse. De plus, leur faible coût de fabrication rend les filtres à base de GOF très intéressants pour améliorer la viabilité économique du procédé de dessalement d'eau. Enfin, d'après de récentes simulations, en plus de cette application, les GOF pourraient également être utilisés pour l'élimination d'autres contaminants tels que les bactéries.

1.3. Autres types de nanotechnologies

Imitation du phénomène d'ébullition

L'équipe du Dr. Rohit Karnik, professeur en ingénierie mécanique au MIT, développe des membranes qui imitent le processus d'ébullition, procédé le plus simple pour le dessalement mais sans chauffage [18]. Cette fine membrane est composée de nanopores, s'apparentant à des nanotubes dont une extrémité est hydrophile alors que l'autre est hydrophobe. Ainsi lorsque l'eau parcourt les nanopores passant d'une zone hydrophile à une zone hydrophobe, elle passe de l'état liquide à l'état gazeux au niveau de l'interface hydrophile-hydrophobe simulant ainsi l'étape d'ébullition. Les deux variables principales de cette technique sont la longueur du tube ainsi que la température d'utilisation, la longueur du tube influençant le débit d'eau et la température influençant la probabilité qu'une molécule d'eau rebondisse ou qu'elle se condense de l'autre côté de la membrane sous forme d'eau pure. Les conditions optimales sont alors des longueurs de tubes et des températures faibles.

Emploi de filtres autoassemblés

À l'Université de Chicago, l'équipe du Dr. Heinrich Jaeger, en collaboration avec Xiao-Min Lin, chercheur au Centre des Matériaux à l'échelle Nanométrique d'Argonne, a développé un système de nanofiltration [19]. En effet pour que le dessalement devienne une solution viable, il faut réduire le coût des composants du procédé en plus du coût énergétique. Le système développé par les chercheurs présente ce potentiel en utilisant une membrane ultrafine (30 nm d'épaisseur) constituée de nanoparticules auto-assemblées. Grâce à sa finesse et à son excellente perméabilité, cette membrane peut être réutilisée de nombreuses fois pour des filtrations à basse pression. Les caractéristiques des pores de la membrane (taille, forme et structure chimique) peuvent être ajustées pour optimiser les propriétés de filtration. Avec leur membrane, ils ont réussi à obtenir un flux 100 fois plus important qu'avec une membrane classique pour une même pression.

Afin d'étudier la faisabilité économique de son système, le Dr. Jaeger a obtenu fin 2011, une bourse d'un montant de \$65.000 de la part du Fonds d'Innovation de l'université. Ce financement permet également d'optimiser les caractéristiques techniques du produit et de réaliser des tests de respect de l'environnement. Il a conduit, fin 2012, au dépôt d'un brevet. Initialement conçu pour de petits systèmes de traitement de l'eau, la technologie pourrait être développée pour des systèmes semi-industriels, voire industriels.

2. Développement de technologies innovantes

2.1. Electrodialyse

L'électrodialyse consiste à faire circuler l'eau salée entre deux électrodes de charges opposées, ce qui provoque une séparation des ions sodium et chlorure avant le passage au travers d'une série de membranes pour récupérer l'eau douce en sortie. Ce procédé est moins consommateur en énergie que l'osmose inverse car il requiert de plus faibles pressions et les sels qui obstruent les pores des membranes peuvent être éliminés en inversant la polarité électrique, ce qui augmente leur durée de vie. De plus, cette technique permet de récupérer plus de 90% de l'eau, ce qui représente un gros avantage dans les zones en stress hydrique. L'équipe du Dr. Amos Winter du MIT a conduit une étude pour déterminer le meilleur procédé pour dessaler l'eau en Inde. Compte-tenu de la salinité de l'eau saumâtre souterraine et du manque d'électricité sur

une grande partie du territoire, près d'un foyer sur deux n'a pas accès au réseau électrique, le système électrodialyse-photovoltaïque est apparu comme la solution la plus adaptée. En effet, d'après ces simulations, ce système portable est viable [20].

2.2. Bio-dessalement

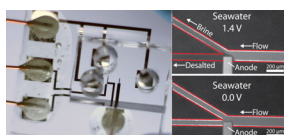
Cette méthode, relativement récente et populaire parmi les chercheurs, permet de réduire l'impact carbone par rapport aux techniques conventionnelles. Par exemple, lors de la 7ème Conférence Internationale en Sciences et Technologies de l'Environnement, en juin dernier, le Dr. Endalkachew Sahle-Demessie, chercheur au *USEPA-National Risk Management Research Laboratory*, a présenté une technique de bio-dessalement de l'eau par des algues halophytes, algues qui vivent dans un environnement salé : les *Scenedesmus sp.* et *Chlorella vulgaris* [21]. Cette technique ne permet pas un dessalement total mais elle pourrait être utilisée en prétraitement combiné avec les méthodes traditionnelles afin de diminuer l'impact carbone.

L'utilisation des bactéries représente une autre technique de bio-dessalement. Les Drs. Jose Onuchic et Herbert Levine, à Rice University, considèrent en effet les bactéries comme des systèmes biologiques programmables par mutation génétique afin d'effectuer des actions spécifiques [22]. En plus de leur utilisation pour le dessalement d'eau, ces bactéries "reprogrammées" pourraient avoir des applications dans de nombreux domaines tels que l'environnement (dépollution), le milieu médical et pharmaceutique... Ce projet est financé par le programme INSPIRE de la Fondation Nationale pour les Sciences (*National Science Foundation*), un programme dédié à des projets pluridisciplinaires à hauts risques pouvant avoir potentiellement des retombées colossales en cas de succès.

Les chercheurs ont simulé les conséquences de mutations génétiques sur les interactions entre protéines. Les systèmes de signaux à deux composants (Two-Component Signaling system, TCS) sont les moyens dominants par lesquels les bactéries appréhendent leur environnement et portent les actions appropriées en réaction, par exemple, à un stimulus extérieur. Leur projet porte sur la mise en place d'un étalon pour l'interprétation des interactions entre protéines TCS et la prédiction de l'impact de mutations génétiques sur les systèmes TCS. En effet, pour que ce dernier continue à produire un signal, toute mutation sur une protéine doit se retrouver sur sa partenaire. D'un point de vue expérimental, les chercheurs envisagent d'utiliser la bactérie *Bacillus subtilis* comme prototype pour le dessalement de l'eau en réduisant la formation de biofilms à la surface des membranes, ces derniers ayant tendance à obstruer leurs pores. Pour cela, l'introduction de bactéries *B. subtilis* programmées pour engendrer une mort cellulaire permettrait d'affaiblir les biofilms existants.

2.3. Dessalement par voie électrochimique

Grâce à un financement du Département de l'Energie (*U.S. Department of Energy*), les Drs. Richard Crooks, à l'Université du Texas à Austin, et Ulrich Tallarek, de l'Université de Marburg en Allemagne, ont développé une nouvelle méthode de dessalement plus simple que les techniques conventionnelles avec une consommation énergétique plus faible [23]. Cette méthode de purification repose sur l'application d'une tension de 3V à une puce remplie d'eau de mer. Cette puce est constituée d'un microcanal avec deux branches à la jonction desquelles, une électrode bipolaire est intégrée. Elle neutralise certains ions chlorures de l'eau salée afin de créer une "zone d'épuisement" qui accroît le champ électrique local comparé au reste du canal. Pour conserver l'électroneutralité de la solution, les anions suivent le même cheminement que les cations entraînant une modification dans le champ électrique suffisant pour orienter les sels dans une branche de la puce et l'eau dessalée dans l'autre.



A gauche : photographie du dispositif de dessalement de l'eau par voie électrochimique en PDMS/verre avec une électrode de platine. A droite : Micrographie par fluorescence du dispositif indiquant l'emplacement d'un traceur qui représente les ions présents dans l'eau de mer. En haut, avec une tension de 1,4V, le traceur est redirigé vers le courant de saumure et en bas, lorsque la

tension est nulle, le traceur est réparti équitablement entre les deux canaux. Les parois des canaux sont représentées en rouge.

Crédits : Kyle Knust

La réaction de neutralisation qui a lieu à l'électrode est l'étape clé du procédé. Jusqu'alors les chercheurs ont obtenu un taux de dessalement de 25% et ils sont confiants sur la possibilité d'atteindre les 99% requis pour avoir une eau potable. Ce procédé breveté et en développement commercial par la startup Okeanos Technologies [24] peut fonctionner avec une batterie commerciale ce qui rendrait le dispositif portable. Bien que ce procédé requière des améliorations et une production à plus grande échelle - actuellement avec des microcanaux de la taille d'un cheveu humain - le dispositif produit 40 nL/min d'eau dessalée. Cette technologie semble très prometteuse pour fournir de l'eau potable à grande échelle de manière simple et portable.

Perspectives

Alors que les perspectives d'eau douce s'amoinissent aussi rapidement que la population s'accroît, il est urgent et vital de trouver de nouvelles ressources d'eau potable présentant des coûts d'exploitation ou de production raisonnables dans les années à venir. Ces nouvelles avancées scientifiques représentent une première étape dans ce processus mais plusieurs années d'optimisation de procédés sont encore nécessaires afin qu'elles atteignent le niveau d'efficacité qui les rendra économiquement viables. Le but ultime étant de pouvoir développer ces technologies partout dans le monde et notamment dans les pays en voie de développement où la pénurie d'eau potable atteint des proportions dramatiques.

Sources :

- [2] Article sur le New York Times : "Mapping the Spread of Drought Across the U.S." - http://www.nytimes.com/interactive/2014/upshot/mapping-the-spread-of-drought-across-the-us.html?_r=0&abt=0002&abg=0
- [3] Site du United States Drought Monitor : <http://droughtmonitor.unl.edu/>
- [4] BE Etats-Unis 374 : "La problématique de l'eau au Texas à l'honneur : 2014 Texas Water Summit" - <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/76204.htm>
- [5] Site internet du Texas Water Development Board : <http://www.twdb.texas.gov/innovativewater/desal/facts.asp>
- [6] Description de l'usine de dessalement Kay Bailey Hutchison à El Paso : https://www.twdb.state.tx.us/innovativewater/desal/worthitssalt/doc/Worth_Its_Salt_Jan2014_KBH.pdf
- [7] Article "Quenching a Desert Community's Thirst" : <http://cdmsmith.com/en/Solutions/Water/Quenching-a-Desert-Communitys-Thirst.aspx>
- [8] Document sur le dessalement d'eau saumâtre au Texas : http://www.twdb.texas.gov/publications/shells/Desal_Brackish.pdf
- [9] Site internet du Oak Ridge National Laboratory : "Sweet spot for salty water" - <http://www.ornl.gov/ornl/news/features/2014/e89b38c1-8cbd-4c32-a7bc-004f53b2474b>
- [10] Site internet de l'Université de Chicago : "Fresh water scarcity and cost-effective desalination" : http://tech.uchicago.edu/learn/features/20130307_desalination/
- [11] Press release : "NanoH2O Acquired by LG Chem" - <http://www.lg-nanoh2o.com/company/news/2014/98>
- [12] Site internet du Bureau of Reclamation : "Nine Desalination and Water Purification Research Projects and Pilot Studies Receive \$1.4 million from the Bureau of Reclamation" - <http://www.usbr.gov/newsroom/newsrelease/detail.cfm?RecordID=47709>
- [13] Site internet du MIT : "Study shows forward osmosis desalination not energy efficient" - <http://newsoffice.mit.edu/2014/study-shows-forward-osmosis-desalination-not-energy-efficient>
- [14] Press release : "Lockheed Martin Achieves Patent for Perforene Filtration Solution, Moves Closer to Affordable Water Desalination" - <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2013/march/lockheed-martin-achieves-patent-for-perforene-filtration-solutio.html>
- [15] Article : "Texas Water Report : Going Deeper for the Solution" - <http://www.window.state.tx.us/specialrpt/water/gamechangers/desalination.php>
- [16] Site internet du MIT : "How to create selective holes in graphene" - <http://newsoffice.mit.edu/2014/how-to-create-selective-holes-in-graphene-0225>

- [17] Site internet du Laboratoire National Oak Ridge : "Sweet spot for salty water" : <http://www.ornl.gov/ornl/news/features/2014/e89b38c1-8cbd-4c32-a7bc-004f53b2474b>
- [18] Site internet du MIT : "Novel membrane reveals water molecules will bounce off a liquid surface" - <http://newsoffice.mit.edu/2014/novel-membrane-reveals-water-molecules-will-bounce-off-a-liquid-surface>
- [19] Site internet du Center for Technology Development and Ventures : "Fresh water scarcity and cost-effective desalination" - http://tech.uchicago.edu/learn/features/20130307_desalination/
- [20] Site internet du MIT : "Sun-powered desalination for villages in India" - <http://newsoffice.mit.edu/2014/solar-desalination-india-0908>
- [21] BE Etats-Unis 375 : "7ème Conférence Internationale en Sciences et Technologie de l'Environnement (IC-EST2014)" - <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/76284.htm>
- [22] Site internet de la NSF : "Researchers investigate remarkable approach to desalination" - http://www.nsf.gov/discoveries/disc_summ.jsp?cntn_id=132168&org=NSF
- [23] Site internet de University of Texas at Austin : "Chemists Work to Desalt the Ocean for Drinking Water, One Nanoliter at a Time" - <http://www.utexas.edu/news/2013/06/27/chemists-work-to-desalt-the-ocean-for-drinking-water-one-nanoliter-at-a-time/>
- [24] Technologie de dessalement de la startup Okeanos Technologies : <http://www.okeanostech.com/technology/>

Pour en savoir plus, contacts :

[1] Rapport sur la rareté en eau des Nations Unies en 2006 : <http://www.un.org/waterforlifedecade/scarcity.shtml>

Code brève

ADIT : 77087

Rédacteurs :

- Maud Bernollin, Attachée Scientifique Adjointe, deputy-phys@ambascience-usa.org ;
- Suivre le secteur Physique, Chimie, Nanotechnologies sur twitter [@Fr_US_Nanotechs](https://twitter.com/Fr_US_Nanotechs).
- Retrouvez toutes nos activités sur <http://france-science.org>.