

La puissance osmotique ou la révolution française des énergies renouvelables ?

Lydéric Bocquet*, Bruno Mottet**, Jean-Christophe Rigaut***

@ 24691

Mots-clés : puissance osmotique, renouvelables, innovation, Europe de l'énergie, neutralité carbone

Le défi de l'électrification de nos sociétés nécessite plus d'énergie décarbonée, qui doit idéalement être pilotable, économe en matériaux critiques et garantissant notre souveraineté énergétique. L'énergie osmotique, spontanément libérée lors de la rencontre d'eau douce et d'eau salée, typiquement dans les estuaires, remplit ces critères. Grâce à une technologie de rupture française fondée sur une membrane biosourcée brevetée, de puissants flux ioniques salins peuvent désormais être générés, captés puis transformés en électricité, avec 20 fois plus d'efficacité que les technologies précédentes. Cette nouvelle énergie renouvelable est en passe d'être industrialisée.

1. L'énergie osmotique, une énergie renouvelable désormais exploitable

L'électrification croissante et massive des usages à l'échelle de la planète, ajoutée au remplacement des centrales électriques émettrices de CO₂, nécessite l'exploitation rapide de nouvelles formes d'énergies renouvelables qui soient à la fois pilotables, sobres en matériaux critiques et à même de garantir notre souveraineté énergétique et industrielle.

L'énergie osmotique naturelle, libérée en permanence dans les deltas et estuaires lorsque l'eau douce des fleuves rencontre l'eau salée des mers et océans, répond à l'ensemble de ces critères. À l'échelle de la planète, elle pourrait représenter un potentiel exploitable de l'ordre de 10 % de la demande d'électricité mondiale [Alvarez-Silva, 2022].

* ENS, CNRS.

** Sweetch Energy

*** EDF.

Comment cette énergie est-elle produite ?

La différence de concentration en ions Na⁺ et Cl⁻ entre l'eau salée et l'eau douce crée, lors de leur rencontre, une énergie chimique de mélange : l'énergie libre de Gibbs¹. Ce potentiel thermodynamique est associé au second principe de la thermodynamique et exprime la génération d'entropie lors du mélange des deux eaux. Pour 2 m³ d'eau douce mélangé à 2 m³ d'eau de mer d'une concentration en sel de 30 g/L à 30 °C, cette énergie représente 1 kWh [Veerman et al., 2009]. Elle est normalement évacuée sous forme de chaleur lors d'un mélange naturel dans les estuaires, mais l'astuce est de la capter pour en faire de l'électricité renouvelable en séparant les deux eaux par une membrane : c'est l'énergie osmotique.

Objet de travaux académiques et industriels depuis plusieurs décennies, l'énergie osmotique est cependant restée inexploitée jusqu'à présent. En cause, les technologies disponibles, chères,

peu performantes, et présentant des verrous technologiques qui ne permettaient pas un déploiement à grande échelle. Les récentes découvertes et ruptures technologiques françaises dans les domaines de la nanofluidique et des biomatériaux ont changé la donne : la puissance osmotique est aujourd'hui industrialisable avec des perspectives de déploiement en France comme à l'international, constituant une chance pour la France de renforcer son leadership dans le domaine des énergies bas carbone.

**2. Des bénéfices significatifs :
une énergie renouvelable, pilotable,
économique en ressources**

L'énergie osmotique est non seulement renouvelable, abondante et souveraine mais également — fait moins courant en matière de renouvelables — totalement pilotable.

Elle ne nécessite pas de matériaux critiques, reste faiblement émettrice de bruits et n'émet ni chaleur, ni gaz polluant ou à effet de serre (GES) dans l'atmosphère.

C'est une énergie renouvelable d'estuaire à faible impact sur l'équilibre naturel des milieux et à faible risque industriel pour les territoires. L'intégralité des eaux douces et salées utilisées par une station osmotique sont, de fait, restituées à l'estuaire sous forme d'eau saumâtre équivalent au mélange naturel de l'eau de rivière et de l'eau de mer.

En s'intégrant dans le cycle de l'eau, l'énergie osmotique est en fait, comme l'hydroélectricité, issue de l'énergie solaire qui, en plus d'évaporer de l'eau, dessale aussi l'eau de mer.

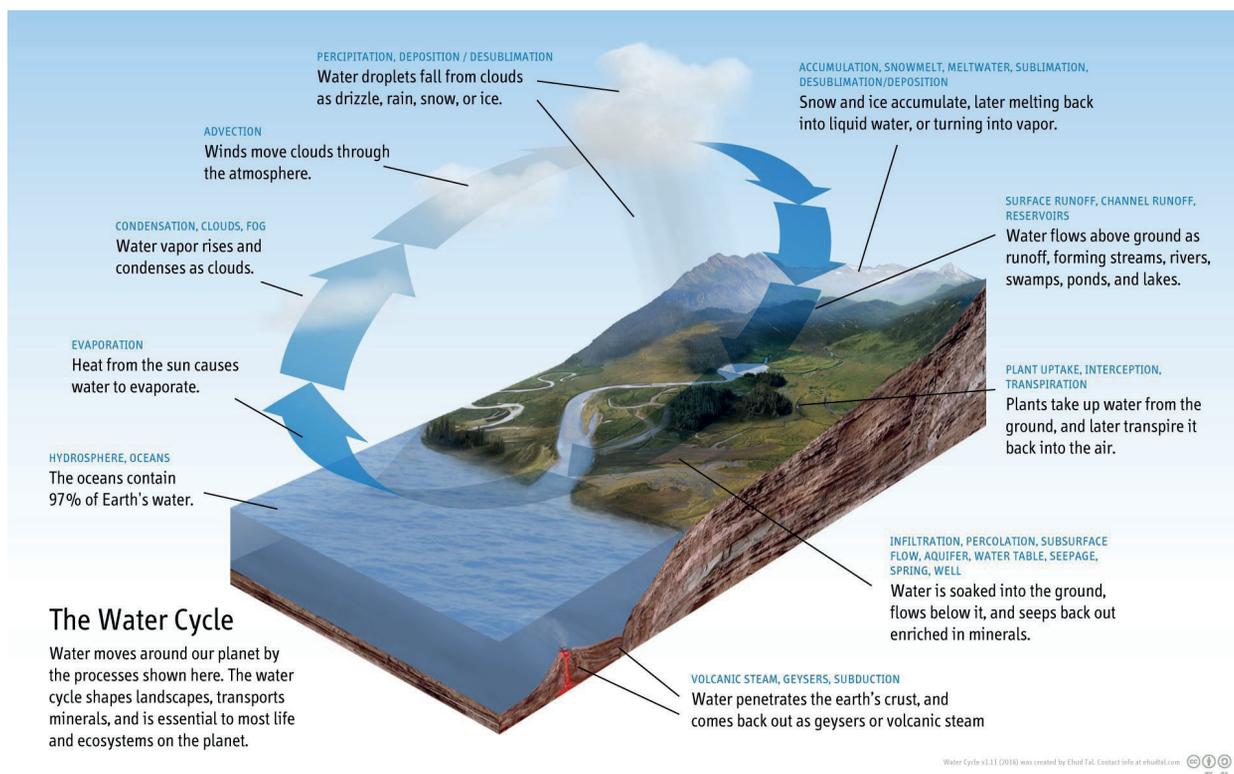


Figure 1. Cycle de l'eau
Source : Ehud Tal

3. Le potentiel de l'énergie osmotique

Le potentiel annuel de génération d'électricité à partir de l'énergie osmotique naturelle en France est estimé à plus de 35 TWh [Alvarez-Silva, 2022], dont une dizaine en métropole, le reste étant localisé en Guyane et à La Réunion (voir Figure 2). Au niveau mondial, le gisement total théorique estimé est d'environ 30 000 TWh par an qui pourrait permettre l'exploitation concrète d'environ 2000 TWh d'électricité renouvelable non intermittente, d'après les travaux du chercheur Oscar Alvarez-Silva [Alvarez-Silva, 2022], spécialiste de l'énergie osmotique et professeur à l'Universidad del Norte à Barranquilla (Colombie). C'est l'équivalent de la production mondiale éolienne en 2022, soit environ 7 % de la consommation électrique mondiale. En remplaçant ainsi une source de production carbonée pilotable telle que le charbon par de la puissance osmotique, on réduirait de 3 % les émissions de GES mondiales, soit l'équivalent de l'ensemble des émissions du transport maritime mondial.

4. Une invention française fondée sur une membrane biosourcée à tubes nanométriques

Grâce à une technologie de rupture française, fondée sur une membrane biosourcée à tubes nanométriques, les flux ioniques salins peuvent désormais être captés et transformés en électricité

continue puis alternative, avec environ 20 fois plus d'efficacité que les technologies précédentes.

En 2013, dans le cadre de travaux de recherche menés sur des nanotubes de nitrure de bore, une équipe de chercheurs de l'Université de Lyon dirigée par Lydéric Bocquet mesure des densités de charges de surface de l'ordre de 1 C/m^2 , ce qui excède les valeurs typiques d'au moins un ordre de grandeur. Des courants ioniques de l'ordre du nanoampère sont alors générés en présence d'un gradient de salinité de part et d'autre du tube, engendrant une puissance par nanotube de l'ordre de 1 kW/m^2 de membrane [Bocquet, 2013]. Ce phénomène, dit de diffusion-osmose, est la première rupture dans l'exploitation de l'énergie osmotique. En dehors du chiffre obtenu pour la puissance générée, ces résultats permettent surtout d'ouvrir considérablement le cahier des charges en termes de matériaux membranaires pour récupérer l'énergie osmotique, au-delà de ceux utilisés dans les technologies actuelles.

Cette découverte a ouvert de nouvelles perspectives pour la valorisation de l'énergie osmotique. Une start-up, Sweetch Energy, est créée en 2015 avec pour objectif de mettre en œuvre le phénomène de diffusion-osmose dans le but de produire de l'énergie osmotique à échelle industrielle. La première étape, appelée *proof of concept*, a consisté à démontrer la faisabilité du projet. Pour cela, deux premiers défis ont été relevés : l'identification d'un matériau de substitution

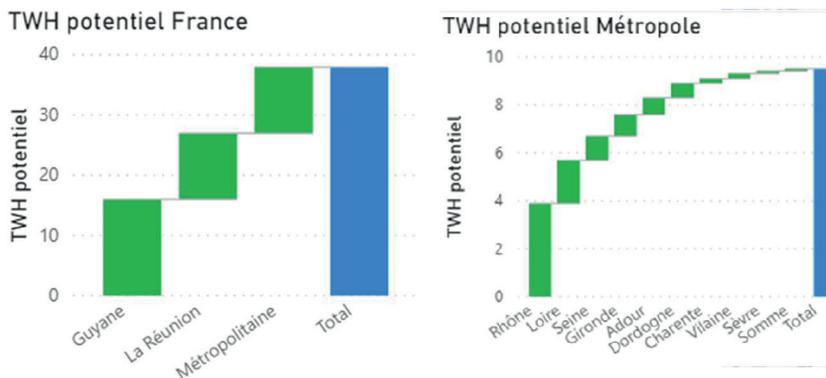


Figure 2. Estimation du potentiel exploitable annuellement en France (d'après échanges avec Oscar Alvarez-Silva)

au nitride de bore peu onéreux et disponible en volumes industriels et la conception d'une méthode de fabrication de membranes de taille industrielle qui répliquent le phénomène observé dans un minuscule nanotube sans en dégrader la performance, le tout à un coût compétitif. Cette première étape clé a été franchie en 2019.

Une seconde étape est intervenue un an plus tard, lorsque la société, désireuse dès sa création de développer une solution industrielle vertueuse d'un point de vue environnemental, a opté pour

l'usage exclusif de matériaux biosourcés pour ses membranes.

Outre la construction d'une centrale osmotique, l'impact environnemental de son fonctionnement reste limité : il consiste en deux prises d'eau ponctuelles — salée et douce — et un rejet d'eau saumâtre, mélange s'effectuant naturellement dans un estuaire. Il n'implique pas d'émissions de gaz à effet de serre, peu de nuisances sonores et aucun rejet de polluant. Comme pour tout autre projet, et en conformité avec les réglementations

Encadré 1. LE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE OSMOTIQUE

Une centrale osmotique est composée de multiples modules constitués de membranes en série, aux bornes desquelles deux électrodes transfèrent le flux ionique en électricité continue. Chaque module ressemble à un échangeur à plaques dans lequel circulerait de l'eau douce et de l'eau salée (voir figures ci-dessous).

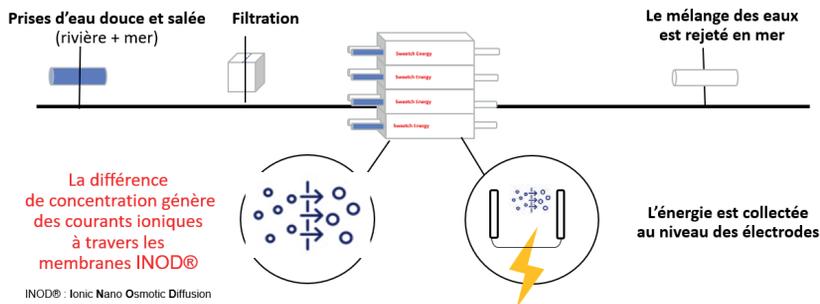
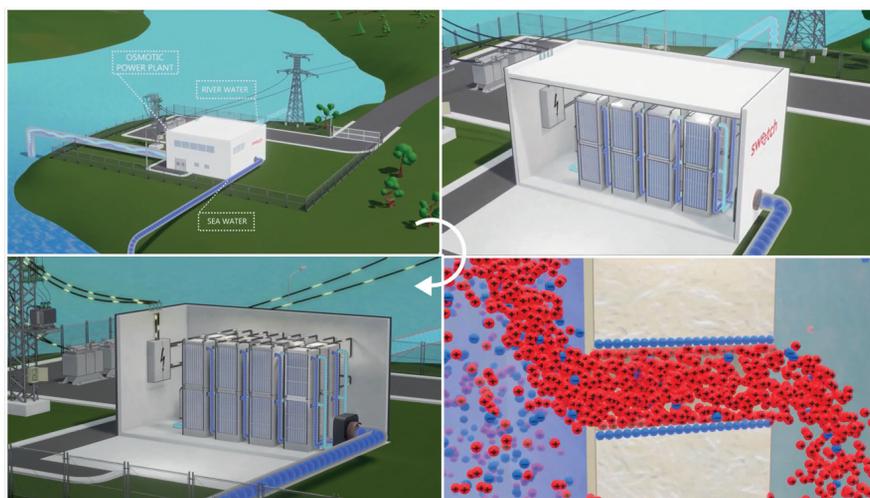


Schéma du processus allant des prises d'eau à la création d'énergie osmotique



Figure 3. Centrale REDstack, Afsluitdijk, Pays-Bas

en vigueur (loi Littoral, Natura 2000, etc.), un suivi environnemental continu sera réalisé tout au long du cycle de vie afin d'assurer un impact minimal sur le vivant et l'environnement de la production d'énergie osmotique.

Cette technologie brevetée sous le nom d'INOD® (*Ionic Nano Osmotic Diffusion*), est ainsi capable de produire une puissance supérieure à 20 W/m² de membrane en système capacitif en laboratoire et atteindra progressivement plus de 10 W/m² net, dans les systèmes industriels complets. Il s'agit d'une première mondiale qui fait de l'énergie osmotique une énergie renouvelable désormais industrialisable.

La viabilité économique est envisagée à l'horizon d'une dizaine d'années : une maturation technologique comparable aux évolutions des énergies photovoltaïque et éolienne offre à l'énergie osmotique des perspectives de LCOE (coût complet de l'énergie) cible à 10 ans inférieur à 100 €/MWh, tout en étant parfaitement pilotable. Cela signifie que les premières années, comme l'ont été les énergies photovoltaïque et éolienne, la production d'énergie osmotique devrait être subventionnée pour en faire une énergie compétitive sur le marché.

5. Et avant l'invention de cette technologie ?

Deux technologies de récupération de l'énergie osmotique existaient jusqu'alors :

- L'osmose à pression retardée, ou PRO, qui laisse circuler les molécules d'eau à travers les pores d'une membrane et empêche la circulation des ions. Afin d'atteindre l'équilibre des concentrations, l'eau douce est aspirée dans le compartiment de l'eau salée et augmente ainsi sa pression. La pression osmotique engendrée peut être exprimée par la loi de Van't Hoff : $\Delta\pi = RT\Delta C_{sel}$. Si l'on considère la différence de salinité entre océan et rivière, cette pression est de l'ordre de 30 atm, soit l'équivalent d'une chute d'eau de 300 m. L'énergie est alors récupérée par turbinage comme dans une centrale hydroélectrique.

L'entreprise norvégienne Statkraft a lancé en 2009 la première centrale osmotique utilisant la PRO, d'une capacité de 4 kW. La puissance, n'excédant pas 1 W/m² de membrane, était néanmoins trop faible pour en faire une technologie rentable commercialement. L'encrassement des membranes, leurs difficultés à supporter de fortes pressions tout en devant

Encadré 2. SWEETCH ENERGY

Fondée en 2015, à Rennes, Sweetch Energy emploie une quarantaine de personnes aux expertises variées : nanofluidique, biomatériaux, ingénierie des procédés, industrialisation, électrochimie, etc. Un premier site prototype de quelques dizaines de kilowatts est prévu début 2024, qui sera suivi d'un déploiement plus important à l'embouchure du Rhône, dans le cadre d'un partenariat avec la Compagnie Nationale du Rhône. D'ici 2030, près de 4 millions de mégawattheures par an pourraient être produits à un prix compétitif dans le delta du Rhône grâce à l'énergie osmotique [Sweetch Energy, CNR, 2022]. Un autre partenariat avec le groupe EDF, et plus particulièrement avec les équipes d'EDF Hydro, portera dans un premier temps sur la construction d'une centrale pilote de 1 MW à l'horizon 2025, s'inscrivant dans une stratégie commune de développement de projets industriels en France métropolitaine et d'outre-mer et dans le monde [Sweetch Energy, EDF Hydro, 2022].

Pour plus d'informations : <https://www.sweetch.energy/>.

être très fines, combinés au rendement des hydroturbines, ainsi qu'au coût élevé de l'ensemble, limitent fortement l'industrialisation de cette technologie.

- L'électrodialyse inverse, ou RED. Ici, l'eau ne circule plus à travers la membrane, mais ce sont les ions qui se déplacent. Les membranes sont sélectives vis-à-vis des ions et placées en série, alternant les membranes laissant passer les cations ou les anions. Aux bornes de la série de membranes, une solution redox connectée à une anode et une cathode fait passer le courant dans un circuit électrique.

Cette technologie a été développée par l'entreprise hollandaise REDstack avec la construction en 2014 d'une centrale pilote de quelques kilowatts (voir Figure 3). La puissance développée ne dépasse pas 1 W/m² de membrane, venant du commerce, ce qui est donc trop faible pour compenser les coûts de construction, maintenance et opération de la centrale.

Les faibles rendements des technologies pionnières PRO et RED sont principalement dus à la taille des pores de leurs membranes. Les sélectivités à l'eau ou aux ions sont en effet réalisées par tamisage essentiellement stérique et électrostatique : les porosités sont donc très petites, typiquement de quelques angströms, ce qui limite en fait le débit des flux. Mais les

pores nanométriques de la membrane biosourcée permettent de les augmenter considérablement (multiplication par 20 environ) grâce à une résistance très faible, et ce grâce à la découverte d'un nouveau principe physique.

Les membranes jusqu'alors utilisées dans les PRO ou RED étaient issues du commerce et n'avaient pas de formulation spécifique pour bien valoriser l'énergie osmotique. La conception et la production de membranes spécifiques biosourcées permettent dorénavant une flexibilité sur les paramètres, qui devrait faciliter l'optimisation de la production énergétique et une baisse significative des coûts de fabrication.

6. Les défis à relever

Plusieurs jalons doivent encore être franchis pour permettre un déploiement significatif de l'énergie osmotique.

Parmi ceux-ci, une première démonstration complète du système INOD[®] sous forme de module en conditions réelles, le développement de l'ensemble des processus techniques d'exploitation propres aux stations osmotiques (tels que les prises et restitutions des eaux ou la maintenance des équipements) et la conception de la première usine d'assemblage de générateurs osmotiques à grande échelle, prévue d'ici 2026.

La puissance osmotique ou la révolution française des énergies renouvelables ?

Parallèlement aux aspects techniques, un travail d'intégration de cette nouvelle source d'énergie renouvelable dans la réglementation a été fait puisque l'Union européenne finalise en ce moment la révision de la directive RED, qui inclura l'énergie osmotique dans la liste des énergies renouvelables. Le Parlement français l'a également intégrée dans la loi d'accélération des EnR récemment votée avec entrée en vigueur de l'article modifié du Code de l'énergie (article L211-2, modifié par la loi n° 2023-175 du 10 mars 2023 – art. 85) le 12 mars 2023.

Enfin, d'autres actions en cours visent à préparer l'intégration environnementale harmonieuse des stations osmotiques dans les sites où elles seront installées, à assurer le financement à grande échelle de ces installations et à structurer l'ensemble de cette filière industrielle française naissante.

Dans un contexte d'impérieuse nécessité de lutter contre le réchauffement climatique, alors que la France s'interroge sur la meilleure manière d'assurer sa souveraineté énergétique et que nos institutions ont mis en place un plan de réindustrialisation, le développement d'une filière industrielle d'énergie osmotique à l'échelle française et européenne apparaît ainsi comme une opportunité qui pourrait avoir un impact significatif dans le monde de l'énergie dès 2030.

NOTE

1. Josiah Willard Gibbs est un physico-chimiste américain. Son travail sur l'application à la chimie de la thermodynamique dans la seconde moitié du XIX^e siècle joue un grand rôle dans la transformation de la physique-chimie en science raisonnée et rigoureuse.

RÉFÉRENCES

Alvarez-Silva, O.A., 2022. Salinity Gradient Energy, Global potential estimation. Étude non publiée réalisée à la demande de Sweetch Energy.

Bocquet, L., 2013. "Giant osmotic energy conversion measured in a single transmembrane boron nitride nanotube", *Nature*, 494(7438), pp. 455-458.

Sweetch Energy, CNR, 2022. "CNR and Sweetch Energy to launch in 2023 the first pilot plant for large-scale production of osmotic electricity in the Rhone delta", Press Release, February 14, 2022.

Sweetch Energy, EDF Hydro, 2022. «EDF Hydro s'engage aux côtés de Sweetch Energy pour déployer à grande échelle l'énergie osmotique, en France et à l'international», communiqué de presse, 16 juin 2022.

Veerman, J., Saakes, M., Metz, S.J., Harmsen, G.J. 2009. "Reverse electrodialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water", *Journal of Membrane Science*, pp. 136-144.

BIOGRAPHIES

LYDÉRIC BOCQUET est directeur de recherche au CNRS et professeur attaché à l'École Normale Supérieure. Membre de l'Académie des Sciences, il dirige à l'ENS l'équipe Micromégas qui combine expériences, théorie et modélisation pour explorer la mécanique intime des fluides et de leurs interfaces, du niveau macroscopique jusqu'aux échelles moléculaires. Ses recherches fondamentales ont conduit à la création de quatre startup, dont Sweetch Energy sur le domaine de l'énergie osmotique. Il est professeur invité au Collège de France sur la chaire annuelle Innovation technologique Liliane Bettencourt.

BRUNO MOTTET est docteur-ingénieur en physique-chimie, passionné de sciences et cofondateur de Sweetch Energy. Il est à l'origine de l'adaptation du procédé INOD® à une membrane biosourcée.

JEAN-CHRISTOPHE RIGAUT est directeur Open-Innovation & Exploration du Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF, en charge notamment d'identifier de nouvelles énergies renouvelables. Passionné de technologies, dont la puissance osmotique qu'il suit depuis 15 ans, il est à l'origine du partenariat EDF-Sweetch Energy. Il a développé ou construit de nombreuses centrales électriques (toutes filières hors nucléaire) dans le monde.