

Osmose inverse, de la fabrication des membranes à l'exploitation des méga-usines

D'après la conférence de Jean-Baptiste Thubert, directeur technique et innovation pour l'ensemble de Veolia Water Technologies¹, expert en osmose inverse² chez Veolia, notamment pour de grands projets sur le dessalement³, avec la conception et la fabrication de méga-usines, dites « usines XXL ».

Introduction

Veolia et la place de l'eau sur Terre

Veolia et l'eau, c'est une longue histoire. Actuellement, Veolia est le leader des services à l'environnement. Cela

représente environ 45 milliards d'euros de chiffre d'affaires et un peu plus de 200 000 employés dans le monde entier. Notre objectif est d'accompagner nos clients dans leur transition écologique, que ce soit au travers

1. Entreprise spécialisée dans les solutions de traitement d'eau, notamment le dessalement, pour des applications industrielles et municipales.

2. Technique de filtration utilisant une membrane semi-perméable pour extraire les solutés (comme le sel) de l'eau sous pression.

3. Processus d'élimination du sel et d'autres minéraux de l'eau de mer ou saumâtre pour produire de l'eau potable.

des métiers de l'eau, de l'énergie ou des déchets.

La **figure 1** représente l'eau disponible. Si on regarde la Terre, la grosse goutte d'eau, c'est l'eau salée ; la toute petite est l'eau douce dont on pourrait disposer. Cette eau douce est vraiment quelque chose de très réduit, et donc

à préserver et à chérir autant qu'on peut.

Dans le monde, on est globalement au-delà de 11 000 millions de mètres cubes consommés par jour (**Figure 2**), et seule une toute petite fraction de cette eau provient du dessalement, même si cela concerne plusieurs milliers de stations à travers le monde.

La tension sur l'eau est énorme, pour la France et pour le monde. Cela va conduire au décuplement de cette solution du dessalement dans les années à venir. On attend une croissance probablement supérieure à 10 % de la demande en eau dessalée par an. En France, on commence à en parler, car à certains endroits c'est une solution dont on pourrait bénéficier.

Dans le monde, plus de 300 millions de personnes vivent aujourd'hui grâce à cette eau dessalée. Sans cela, soit ces gens auraient dû émigrer vers d'autres régions, soit ils n'auraient tout simplement pas pu vivre dans ces régions.

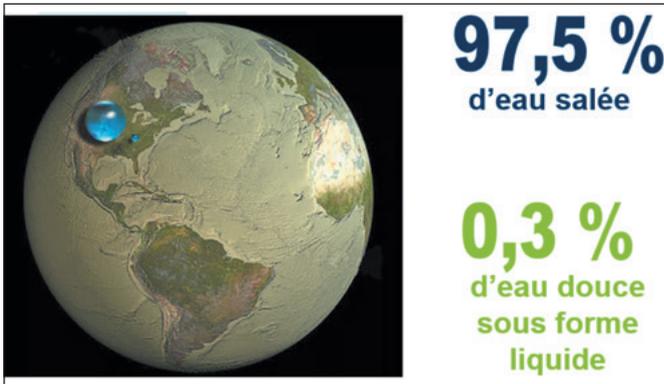


Figure 1

Quantité d'eau douce disponible sur Terre.

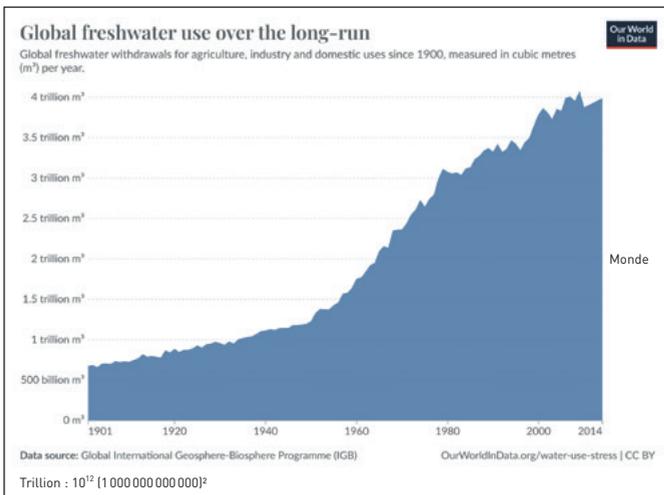


Figure 2

Évolution dans le temps de l'utilisation de l'eau douce dans le monde. Consommation d'eau douce dans le monde pour l'agriculture, l'industrie et l'usage domestique depuis 1900, mesurée en mètres cubes par an.

1 Le dessalement

Historiquement, le dessalement n'est pas nouveau. La Terre fait du dessalement depuis toujours. On parle du « cycle de l'eau », dont la base est le dessalement.

L'évaporation de l'eau est le processus par lequel on sépare l'eau douce d'une eau salée qui se condense ensuite au travers de la pluie. Ce phénomène naturel de dessalement a été reproduit depuis l'Antiquité, d'abord sur les bateaux avec du dessalement thermique

rudimentaire. Puis, progressivement, les méthodes se sont industrialisées, sont montées en capacité, essentiellement avec du dessalement thermique au début : on faisait bouillir de l'eau sous vide, puis on la condensait pour avoir de l'eau potable.

Mais, progressivement, d'autres technologies ont émergé, en particulier les technologies membranaires. La **figure 3** montre cette évolution. Les premières membranes ont été créées dès les années 1950, pourtant elles ont mis des années à être industrialisées. Il y a des sujets sociétaux d'acceptation de ces technologies, et des sujets de maturité technologique qui font que ce n'est pas simple de réussir à produire ce genre de solutions à l'échelle industrielle.

Les membranes industrielles sont arrivées dans les années 1980-1990. Aujourd'hui, le dessalement thermique existe encore, mais on en voit de moins en moins. Il persiste

pour des usages industriels, sur les bateaux, ou dans des raffineries. La technique qui domine actuellement pour les grosses stations de dessalement est le traitement membranaire.

La **figure 4** montre un panorama des technologies de dessalement. Nous avons évoqué le thermique et le membranaire. En réalité, ce ne sont que quelques solutions technologiques parmi toutes celles qui existent et qui vont être choisies par l'industriel en fonction de différentes contraintes : type d'eau à atteindre, type d'eau entrante, type de source d'énergie que l'on a à disposition. De nombreuses raisons peuvent pousser à parcourir l'arbre dans un sens ou dans l'autre.

Maintenant, dès qu'on parle de dessalement de grande taille, on parle en général de l'osmose inverse, qui est la solution la plus mature aujourd'hui et qui est vraiment le courant dominant.

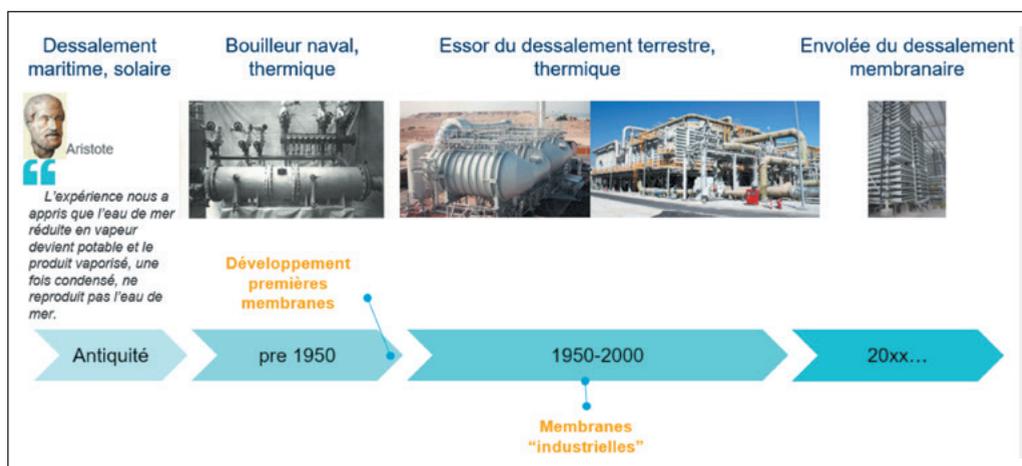


Figure 3

Évolution des techniques de dessalement depuis l'Antiquité.

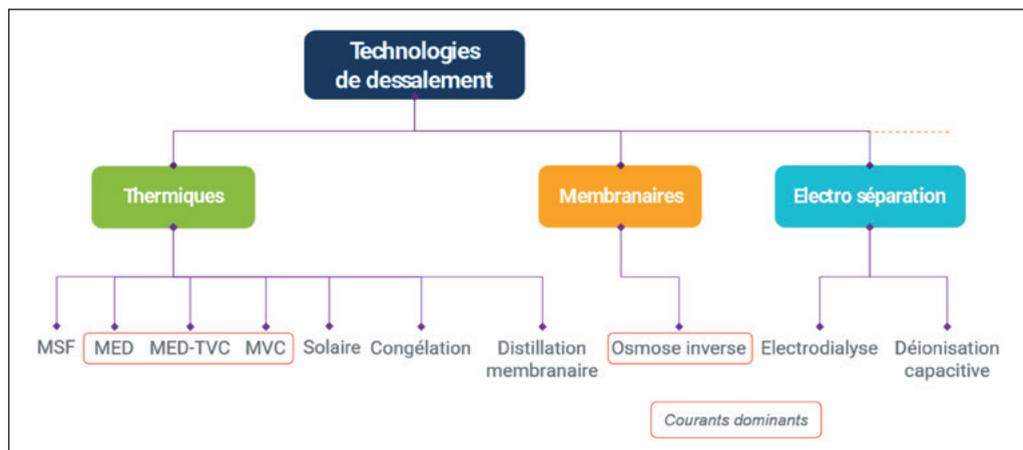


Figure 4

Les technologies de dessalement actuelles^{4, 5, 6}.

2 La membrane

Tout d'abord, il faut voir la membrane comme un filtre extrêmement efficace. C'est un matériau poreux. On peut

4. MSF, MED, MED-TVC, MVC : Multi-Stage Flash (technique de dessalement par évaporation et condensation rapides, en plusieurs étapes, sous vide partiel), Multi-Effect Distillation (dessalement utilisant plusieurs étapes d'évaporation à basse température pour économiser de l'énergie), MED-Thermal Vapor Compression (variante de MED intégrant un compresseur pour recycler la vapeur et réduire les besoins énergétiques), Mechanical Vapor Compression (dessalement où la vapeur est comprimée mécaniquement pour être réutilisée comme source de chaleur).

5. Électrodialyse : technique utilisant un champ électrique pour déplacer des ions à travers des membranes, séparant les sels de l'eau.

6. Déionisation capacitive : méthode de purification où des électrodes chargées électrostatiquement retiennent les ions dissous dans l'eau.

imaginer une feuille de plastique dans laquelle il y a plein de petits trous, qu'on appelle des « pores ». En fonction de la taille des pores, et de leur nombre, on va réussir à filtrer différents éléments. Les ordres de grandeur sont indiqués sur la **figure 5**.

La dimension des particules à éliminer sur une échelle en nanomètres⁷, en haut de la **figure 5**, montre à l'échelle moléculaire la typologie des particules que l'on peut éliminer. Cela va des macropollutions (telles que des particules, du sable, des choses en suspension) jusqu'à des particules biologiques (comme les virus, les microbes), pour lesquelles il faudra des pores beaucoup plus petits, et enfin des ions métalliques et des molécules chimiques.

7. Unité de longueur (1 nm = 10⁻⁹ m), utilisée pour décrire l'épaisseur des membranes ou la taille des particules.

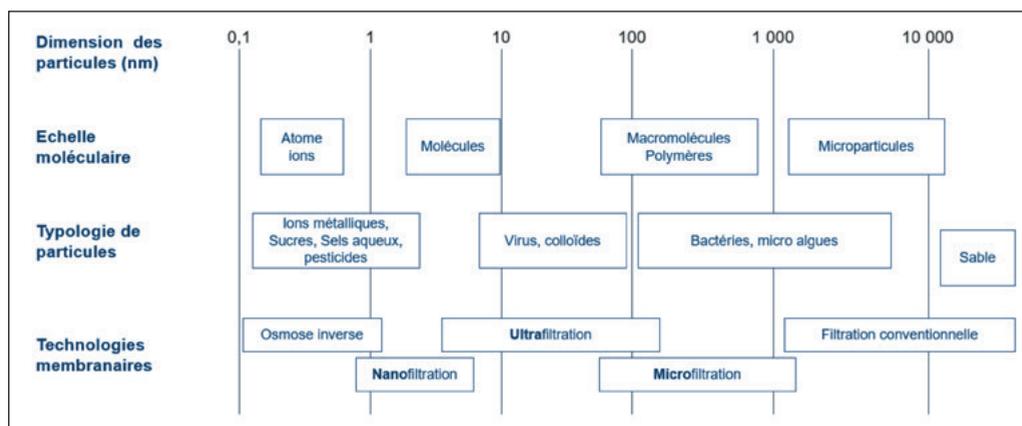


Figure 5

La membrane : un filtre très efficace pour de nombreuses applications.

On voit apparaître les premières membranes, avec des membranes de microfiltration⁸, puis viennent celles d'ultrafiltration⁹, puis celles encore plus fines, les membranes de nanofiltration¹⁰, quand on commence à vouloir éliminer des choses qui sont dissoutes comme des sels dissous, souvent polyvalents¹¹. Pour éliminer des polluants à l'échelle du nanomètre et en dessous, on va utiliser des membranes d'osmose inverse. Celles-ci éliminent quasiment tout, jusqu'à la plupart des micropolluants, qui ne sont

évidemment pas visibles à l'œil nu, et les ions dissous¹², qui font souvent la salinité de l'eau.

2.1. Les différentes technologies : les membranes sont efficaces et très compactes

On a deux courants technologiques avec différents arrangements en fibres creuses pour l'ultrafiltration, essentiellement. On peut imaginer cela comme des pailles dont la paroi est poreuse et dans lesquelles on injecte de l'eau, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur ; puis l'eau percole¹³ au travers de la membrane, et les déchets restent de l'autre côté. Les membranes spiralées utilisées pour l'osmose inverse et la nanofiltration permettent

8. Filtration pour éliminer les particules solides de taille supérieure à 0,1 micromètre, utilisée pour clarifier les liquides.

9. Procédé de filtration qui retient les macromolécules et les particules de taille supérieure à 0,01 micromètre.

10. Filtration retenant des particules ou ions spécifiques, comme les sels polyvalents, mais laissant passer l'eau et les petits ions.

11. Ions portant plusieurs charges électriques, comme Ca^{2+} ou Mg^{2+} , souvent retirés pour adoucir l'eau.

12. Particules ioniques en solution, comme les sels (Na^+ , Cl^-), qui influencent la conductivité et la qualité de l'eau.

13. Mouvement d'un liquide ou de solutés à travers une membrane sous l'effet d'une différence de pression.

de faire des choses beaucoup plus fines. Ce sont des membranes qu'on vient enrouler, comme on peut le voir sur la **figure 6** : on fait un sandwich entre des membranes qui filtrent et des membranes qui canalisent l'eau. On pousse l'eau d'un côté et elle est filtrée tangentielle-ment. Cette membrane peut retenir un sel dissous au travers de sa paroi. Ces systèmes spiralés, on peut les imaginer comme un gros rouleau de sopalin avec des feuilles qui sont enroulées

autour des autres, ce qui permet de densifier énormément les systèmes. Sur la **figure 6**, le système présenté mesure à peu près 1 m de long et 20 cm de diamètre, ce qui n'est pas très gros ; pourtant, il permet de compacter un peu plus de 40 m² de membrane.

Ce sont des systèmes utilisés en osmose traditionnelle qui peuvent produire à peu près 500 litres d'eau dessalée par heure, ce qui est plutôt important.

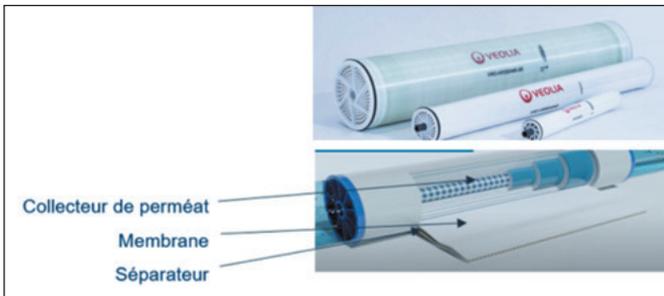


Figure 6

Membranes spiralées utilisées par Veolia.

2.2. Mécanisme de fonctionnement des membranes d'osmose inverse

Dans le cas du dessalement, la séparation membranaire va un peu contre les lois de la nature : selon le principe physique de pression osmotique¹⁴, si je mets une solution salée et une solution non salée de part et d'autre d'une membrane semi-perméable, je vais avoir une migration de l'eau douce vers l'eau salée, alors que, quand on veut dessaler, ce qu'on cherche à obtenir, c'est plus d'eau douce, donc l'inverse.

On utilise l'énergie électrique pour inverser le phénomène physique naturel d'osmose. C'est le phénomène qu'on voit sur la **figure 7**. La nature aurait tendance à venir diluer la partie salée (à gauche) mais, avec des pompes, on exerce une forte pression sur la partie

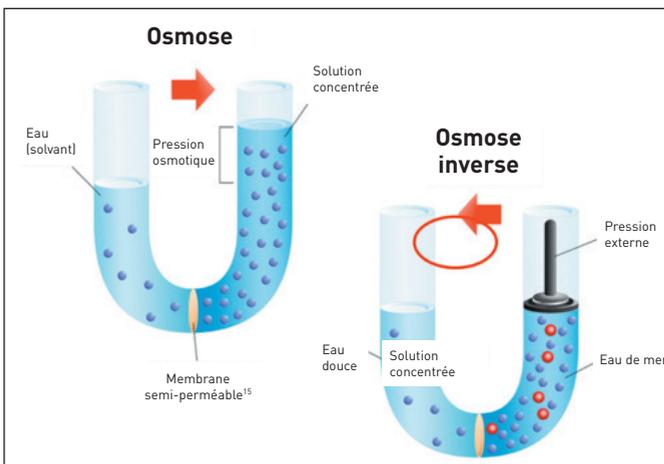


Figure 7

Principe de fonctionnement de l'osmose inverse.

14. Pression nécessaire pour arrêter l'osmose, proportionnelle à la concentration des solutés d'une solution.

15. Membrane perméable à l'eau et imperméable aux ions.

salée, ce qui va permettre de produire plus d'eau douce : **c'est le principe de l'osmose inverse**.

3 Mise en œuvre des membranes d'osmose inverse et applications

La membrane est le cœur du système, mais la membrane toute seule ne va pas faire grand-chose, pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, les trous sont extrêmement fins. Pour ne pas boucher la membrane en quelques minutes, il faut préalablement traiter l'eau, au besoin faire des filtrations pour éliminer le sable, les turbidités¹⁶, toutes les matières en suspension.

Ensuite, parce que cette membrane est très fine et donc

extrêmement efficace : elle élimine presque tout, ce qui veut dire que, du point de vue de la consommation humaine, et même des besoins industriels, on élimine un peu trop.

Souvent, on a besoin d'un post-traitement dans lequel on va venir reminéraliser¹⁷ selon les besoins de l'industriel ou de la municipalité. Cette eau est trop pure pour être propre à la consommation et au transport sur les réseaux.

La **figure 8** est un schéma d'une usine typique du Moyen-Orient, où vous voyez l'emplacement de l'osmose inverse (OI). Il y a toute une partie en amont où l'eau est nettoyée et une partie en aval où l'eau est

17. Ajouter des minéraux essentiels, comme le calcium et le magnésium, à de l'eau dessalée pour améliorer son goût et ses qualités.

16. Particules en suspension.

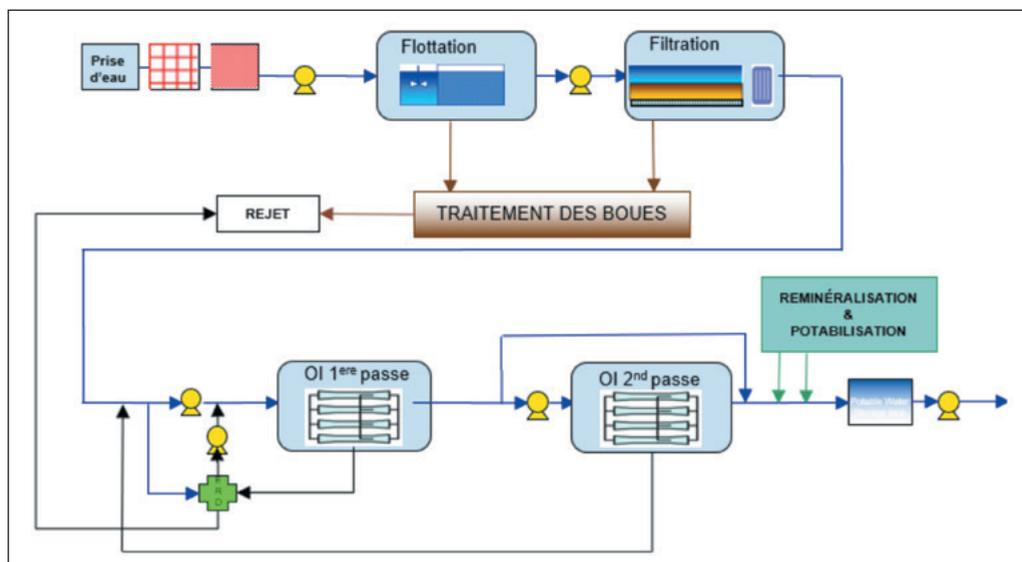


Figure 8

Étapes de traitement dans une usine d'osmose inverse.

reminéralisée pour la rendre consommable.

Cette osmose inverse, aujourd'hui, on en parle beaucoup pour le dessalement, mais on en parle un peu aussi pour la réutilisation des eaux usées.

Le dessalement des eaux salées nécessite des pressions assez élevées, de l'ordre de 60 à 80 bars¹⁸. Il y a d'autres applications qui nécessitent moins de pression, comme la réutilisation des eaux usées mais aussi des traitements de l'eau potable. C'est le cas pour éliminer les micropolluants¹⁹ qui ne sont pas toujours

18. Pression très élevée équivalente à celle régnant au fond d'un océan de 600 à 800 mètres de profondeur.

19. Contaminants présents en très faibles concentrations (nanogrammes à microgrammes par litre), comme les pesticides ou les résidus de médicaments.

éliminés avec les traitements conventionnels. C'est un sujet d'actualité. **Dans le cas des PFAS²⁰, la membrane d'osmose inverse peut être une solution.**

4 Exemples de réalisations

Les exemples concernent des réalisations à grande échelle dans des pays pour lesquels il est vital d'avoir cette eau dessalée. De très grandes quantités sont traitées sur la **figure 9** : c'est une usine thermique en Arabie saoudite, qui traite 800 000 m³ d'eau par jour.

20. Per- and Polyfluoroalkyl Substances : groupe de composés chimiques résistants utilisés dans l'industrie, persistants dans l'environnement et potentiellement nocifs.

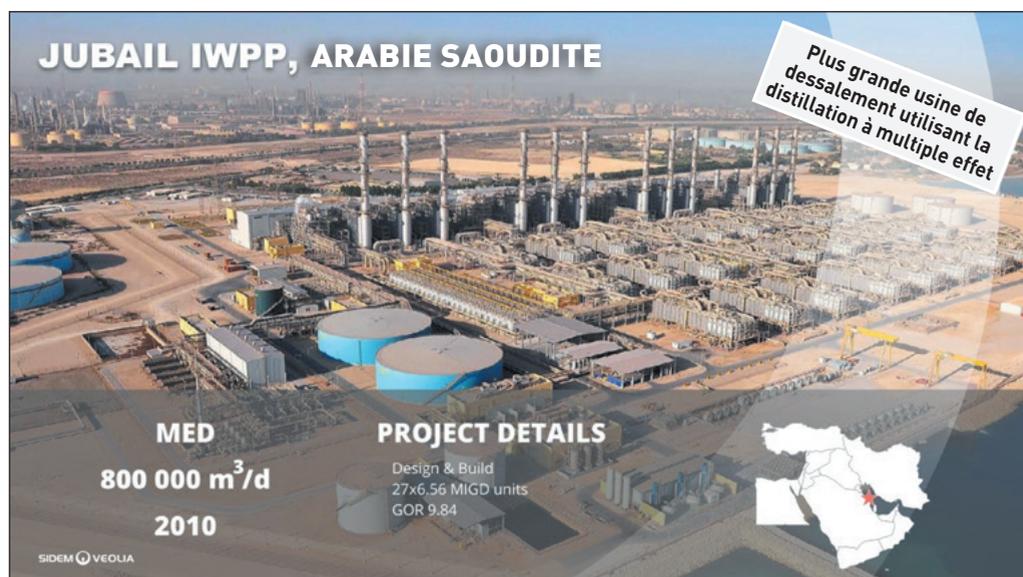


Figure 9

Usine de dessalement thermique en Arabie saoudite.

La **figure 10** présente une usine qu'on dit «hybride» : elle effectue à la fois du dessalement thermique et du membranaire. On est sur quasiment

600 000 m³/jour. C'est aux Émirats arabes unis.

L'usine plus récente, Al Dur, à Bahreïn (**Figure 11**), traite un



Figure 10

Usine de dessalement hybride aux Émirats arabes unis.



Figure 11

Usine de dessalement membranaire à Bahreïn.

peu plus de 200 000 m³/jour. Elle a été complétée il y a à peu près deux ans.

Celle de la **figure 12** a été, à un moment, la plus grande usine de dessalement membranaire au monde, avec presque 700 000 m³/jour. Elle est aux Émirats, à côté de Dubaï.

Ce sont des exemples réalisés par Veolia, qui a la chance d'avoir en son sein une entreprise qui est le leader mondial du dessalement : Sidem²¹.

21. Filiale de Veolia spécialisée dans la conception de systèmes de dessalement thermique.



Figure 12

Usine de dessalement membranaire aux Émirats arabes unis.

Conclusion

Les défis à surmonter

Les défis qui nous attendent sont nombreux. Ils sont technologiques, mais pas seulement.

Le premier défi est celui de l'énergie. Au début du dessalement thermique, on consommait presque 20 kWh/m³, ce qui était plutôt important. L'amélioration des technologies thermiques et le passage au membranaire ont réduit cette consommation à environ 3 kWh/m³.

On peut dire que c'est beaucoup, et c'est vrai que c'est beaucoup par rapport à un traitement d'eau potable conventionnel. Néanmoins, si l'on applique ce chiffre à la consommation en eau d'un foyer de quatre personnes, il n'est pas très différent de la consommation énergétique d'un frigo.

Parmi les autres défis figure en premier la sélectivité : l'osmose inverse enlève tout, et c'est trop. Beaucoup de recherches sont faites pour rendre ces membranes plus sélectives dans ce qu'on veut récupérer ou éliminer.

Les prétraitements ne sont pas parfaits, ils laissent passer des choses qui sont encrassantes²². C'est le cas des eaux usées des laiteries, toujours très grasses, et dans lesquelles pas mal de produits biologiques peuvent se développer.

Il faudrait **des membranes qui s'autonettoient** ; ce serait aussi de l'eau économisée parce qu'il y a moins à nettoyer et des matériaux économisés parce qu'il y a moins à changer les membranes.

Le dernier défi est **l'impact environnemental**. Les usines ne sont pas implantées n'importe comment. Vu de France, on peut dire qu'au Moyen-Orient, ils font n'importe quoi. En réalité, il y a quand même des études environnementales qui regardent l'impact des rejets et l'impact vis-à-vis de l'évolution de la salinité, bien que le golfe Persique s'évapore actuellement naturellement parce qu'il fait chaud.

Il va s'évaporer de plus en plus. L'évaporation, c'est quasiment 6 % d'élévation de la concen-

22. Accumulation de particules ou de biofilms sur une membrane, réduisant son efficacité et augmentant les coûts d'entretien.

tration en salinité du golfe *versus* 0,05 % qui est imputable à l'industrie du dessalement. C'est donc une fraction absolument minime (**Figure 13**).

Finalement, les défis ne sont pas tant techniques et technologiques, mais plutôt sociétaux. Là-dessus, ils nous concernent, nous, industriels, ceux qui prennent des décisions, de grandes orientations qui essaient d'influencer certaines choses, mais vous aussi.

Les lycéens, les plus jeunes, c'est par vos changements de culture, votre prise de conscience que toutes ces choses-là vont évoluer. Gardez en tête que l'eau est trop précieuse pour n'être utilisée qu'une fois.

D'abord, économisons, réutilisons, recyclons et, à la fin, peut-être dessalons.

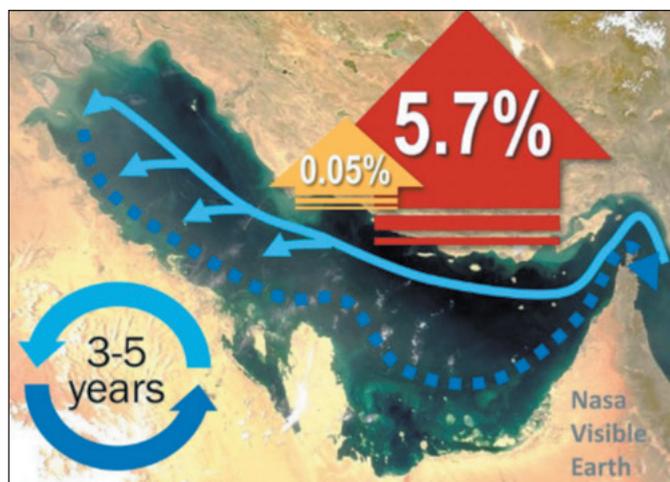


Figure 13

Hausse de la salinité due à l'évaporation (en rouge) et au dessalement (en jaune).