

L'ESSOR DE L'INDUSTRIE DU DESSALEMENT D'EAU DE MER

Marc-Antoine EYL-MAZZEGA

Le stress hydrique atteint un niveau si critique que le déploiement d'infrastructures de dessalement des eaux devient un enjeu de sécurité nationale dans de nombreux pays. Ce véritable boom des industries de dessalement revêt des enjeux tant environnementaux qu'énergétiques et géo-économiques.

Les premières petites installations de dessalement de l'eau de mer ont été construites dans les années 1930 au Moyen-Orient, financées par les revenus du pétrole et alimentées par les hydrocarbures afin de produire la chaleur nécessaire pour faire bouillir l'eau de mer et la transformer en vapeur, avant de la condenser. L'industrie a ensuite connu un essor dans la région dans la seconde moitié du XX^e siècle. Si la majorité des usines de production à grande échelle sont installées au Moyen-Orient, ces solutions sont désormais appelées à être déployées dans le monde entier et vont connaître un très important essor dans un contexte d'accroissement des besoins en eau dessalée : augmentation de la population, changement climatique, agriculture intensive et recherche de l'autosuffisance alimentaire, besoins miniers (comme au Chili), besoins industriels pour l'électrolyse de l'eau et la production d'hydrogène, urbanisation et développement des classes moyennes et raréfaction des ressources locales en eau disponibles. Si, à l'échelle mondiale, 70 % de l'eau sont dédiés à l'agriculture, 20 % à l'industrie et 10 % aux ménages, la répartition varie selon les régions. La géographie de l'installation de ces usines

correspond désormais à l'extension rapide de la carte du stress hydrique dans le monde, qui gagne partout du terrain, en particulier des deux côtés de la mer Méditerranée.

Boom au Moyen-Orient et au-delà

En 2023, près de 23 000 stations de dessalement d'eau de mer sont opérationnelles dans le monde, soit deux fois plus qu'il y a dix ans. Le secteur connaît une croissance de capacité de l'ordre de 6 % à 12 %

« La majorité des pays du Golfe dépendent en grande partie de l'eau dessalée »

par an. Ces installations peuvent revêtir des volumes de production très variables (jusqu'à 900 000 mètres cubes d'eau par jour pour les giga-usines, de

500 000 à 600 000 m³/j pour les très grandes et de 200 000 à 300 000 m³/j pour les centrales importantes, sachant qu'il y a des dizaines de milliers d'unités de petite et moyenne taille) et elles s'appuient sur des technologies multiples.

La majorité des pays du Golfe dépendent en grande partie de l'eau dessalée : aux Émirats arabes unis (EAU), 42 % de l'eau potable provient d'usines de dessalement représentant plus de 7 millions de mètres cubes par jour, 90 % pour le Koweït, 86 % pour Oman, 70 % pour l'Arabie saoudite. En 2030, les capacités de dessalement des pays du Moyen-Orient devraient quasiment doubler, s'inscrivant dans le cadre de plans quinquennaux annoncés afin de préparer la transition de ces économies vers « l'après pétrole ». Les capacités de dessalement de l'Arabie saoudite passeront de 5,6 millions de mètres cubes par jour en 2022 à 8,5 en 2025, et devront couvrir plus de 90 % de la consommation en eau du pays. De même au Koweït, à Bahreïn ou en Israël, où la production d'eau dessalée va plus que doubler d'ici 2030. Les capacités de dessalement des EAU représentent actuellement 14 % du total mondial et 9 % rien que pour Abou Dabi. La capacité de production d'Abou Dabi devrait passer de 1,5 million de mètres cubes par jour en 2017 à plus de 3,3 en 2030. Au total, le pays devrait produire plus de 8,5 millions de mètres cubes par jour en 2030, si l'on inclut aussi l'eau saumâtre dessalée, ce qui est considérable.

Les usines de dessalement sont désormais demandées sur pratiquement tous les continents et le Moyen-Orient ne représente plus

que la moitié des capacités de transformation installées dans le monde. Des projets d'envergure ont été annoncés au Maroc et en Algérie, pays jusqu'alors dotés de ressources hydriques en quantité suffisantes, alors que l'Égypte, qui dispose déjà de capacités importantes, va encore les renforcer. Les solutions vont aussi se déployer partout, à moyenne ou grande échelle : Chine, Inde, Philippines, Taïwan, États-Unis, Australie, Pérou, Chili et Mexique notamment. Enfin, les zones insulaires ont des besoins élevés en eau dessalée, *via* des usines de taille plus modeste : Cebu (Philippines), Cap-Vert, Canaries et Maldives.

« **Les entreprises asiatiques rejoignent progressivement le marché du dessalement** »

Une industrie concurrentielle

Les acteurs industriels sont nombreux et de tailles diverses bien que certains s'imposent depuis plus de dix ans comme les *leaders* du marché : en France, Veolia et Engie ; en Europe, l'espagnol Acciona ; au-delà, citons IDE Technologies, champion israélien du dessalement, le coréen Doosan Heavy Industries & Construction ou encore le chinois Abengoa.

Une grande partie des pays qui se trouvent en situation de stress hydrique ont développé une réelle expertise locale sur le dessalement. C'est ainsi que des entreprises des pays émergents se sont récemment singularisées par l'obtention de contrats d'envergure. C'est notamment le cas des acteurs du Golfe, l'émirati Metito et le saoudien Advanced Water Technologies. L'Égypte dispose également d'industriels œuvrant dans ce domaine.

Les entreprises asiatiques rejoignent progressivement le marché du dessalement et font concurrence aux *leaders* traditionnels du secteur. En Corée du Sud, Doosan Heavy se démarque par une implantation internationale réussie avec plus de trente usines installées dans différents pays. Récemment, l'entreprise coréenne a notamment remporté la construction de la très grande usine Yanbu IV en Arabie saoudite.

En Chine, la Shandong Electrical Power Construction Corporation (Sepco), fondée en 1985 et filiale du groupe China Power Construction, compte aujourd'hui plus de 85 projets, notamment en

Arabie saoudite, en Jordanie, au Nigeria, à Oman, à Singapour et surtout en Inde, le plus gros marché du groupe. La Hewitt, une autre entreprise chinoise, a aussi assuré plusieurs projets importants de dessalement en Chine.

Il existe plusieurs procédés de dessalement. Il y a d'abord les procédés thermiques : le procédé de distillation à détente étagée (*multi-stage flash*) ; le procédé de distillation à multiples effets (*multi-effect distillation* ou MED). Ensuite, il y a les procédés utilisant des membranes : l'osmose inverse et l'électrodialyse. Initialement, la majorité des usines étaient construites sur un modèle thermique, et notamment dans les pays du Golfe, car le processus de MED est peu affecté par le degré de salinité de l'eau, qui peut détériorer les membranes.

L'osmose inverse est aujourd'hui utilisée dans plus de 70 % des usines. Elle est désormais majoritaire et largement maîtrisée. La différenciation des techniques se fait sur les capacités de traitement d'eau, les coûts opérationnels (liés aux cycles de maintenance et à l'optimisation des performances des équipements), la consommation d'électricité et la durée de vie des installations. D'une manière générale, plus l'usine est importante, moins le prix de l'électricité est élevé, moins le coût de production au mètre cube d'eau dessalée est élevé.

L'augmentation des capacités de dessalement dans le monde s'explique par la raréfaction de la ressource en eau, mais aussi par la rentabilité croissante de cette technologie.

Le montant du Capex (*capital expenditure*) d'une usine de dessalement est estimé entre 0,65 et 1,2 million de dollars américains par 100 m³/j d'eau dessalée et a largement diminué ces dernières années. Ensuite, on considère que l'énergie nécessaire au dessalement représente deux tiers du montant des Opex (*operating expense*) de celui-ci.

Selon que l'usine est de type thermique ou utilise l'osmose inverse, les coûts de production d'un mètre cube d'eau dessalée sont sensiblement différents. En effet, la technologie par osmose inverse consomme en moyenne deux fois moins d'énergie, ce qui réduit l'Opex. Cela n'est pas vrai pour une majorité de pays du Golfe pour lesquels, en raison de la salinité de leur eau, les procédés thermiques sont plus efficaces et dégradent moins les membranes. En règle générale, on considère que plus l'usine est importante, plus les coûts de dessalement diminuent : ainsi, le coût moyen de production d'un mètre cube d'eau dessalée varie entre 0,5 \$ pour des grandes usines à plus de 1,5 \$ pour les plus petites.

Dernièrement, l'eau dessalée atteint des coûts de production très compétitifs dans les giga-usines du Golfe (plus de 500 000 m³/j) où le prix du mètre cube réussit à passer sous la barre du 0,50 \$: il coûtait 0,47 \$ à Yanbu IV (Arabie saoudite) et 0,32 \$ à Soreq II (Israël). Il y a dix ans, ce coût était encore estimé à 1 \$/m³.

Un défi pour le climat

Dessaler l'eau de mer est un procédé énergivore et qui rejette des quantités importantes de gaz à effet de serre (GES) dans la plupart des pays dotés d'un *mix* (« bouquet ») électrique très producteur de CO₂. La consommation électrique des usines est élevée, variant selon les techniques mises en œuvre. Si les procédés de dessalement thermiques, de moins en moins utilisés, consomment plus de 5 kilowattheures (kWh) d'énergie par mètre cube d'eau dessalée, le procédé de dessalement par osmose inverse, aujourd'hui le plus répandu, permet de dessaler un mètre cube d'eau en utilisant entre 2,5 kWh et 3 kWh, en moyenne : le record a été établi par une usine saoudienne consommant 2,27 kWh/m³. Dans les pays du Moyen-Orient, les usines de dessalement ont largement bénéficié d'un *mix* énergétique fondé sur les énergies fossiles permettant un dessalement bon marché, de surcroît avec une électricité souvent subventionnée et ne reflétant pas les coûts liés aux émissions de GES. La consommation d'électricité du secteur du dessalement d'eau a été multipliée par trois en Arabie saoudite pendant la période 2005-2020, pour atteindre environ 6 % de la consommation totale d'électricité du royaume, soit environ 17 térawattheures (TWh) en 2020. C'est l'équivalent de la production annuelle d'une grosse centrale nucléaire. Cette consommation élevée s'explique notamment par le fait que plus de 60 % des usines utilisent la distillation thermique et mobilisent en quantité les énergies fossiles. Au total, l'approvisionnement en eau d'Israël consomme près de 10 % de la production nationale d'électricité, le dessalement représentant environ 4 % à 5 % de la demande énergétique du pays.

Des progrès ont été faits dans les technologies de dessalement. L'osmose inverse, qui est le procédé le plus utilisé, permet désormais

« **Dessaler l'eau de mer
est un procédé énergivore** »

de consommer moins d'énergie et donc de rejeter moins de CO₂ que les procédés thermiques. Ce constat est le résultat de plusieurs décennies d'amélioration de l'efficacité énergétique des technologies utilisées. Depuis 1970, la consommation énergétique des usines par osmose inverse a été divisée par dix.

Parmi les méthodes thermiques (représentant un quart des usines en service) qui sont les plus énergivores, la méthode MSF (*multi-stage flash*) consomme entre 19,6 et 27,3 kWh par mètre cube d'eau dessalée, la méthode MED (*multi-effect distillation*) consomme entre 14,5 et 21,4 kWh/m³ et la méthode MVC (*mechanical vapor compression*) consomme entre 7 et 12 kWh/m³. Les méthodes par membranes ont une consommation énergétique moins élevée : l'osmose inverse consomme entre 2,5 et 3 kWh/m³ et l'électrodialyse consomme entre 2,7 et 5,6 kWh/m³.

Malgré ces améliorations tangibles, le procédé de dessalement par osmose inverse n'en reste pas moins énergivore, ce qui explique le développement progressif du couplage aux sources d'énergie bas carbone, principalement les énergies renouvelables, dont les coûts de déploiement ont fortement baissé ces dernières années, ou le nucléaire. Les techniques par osmose inverse sont considérées comme étant les moins négatives pour le climat, puisqu'elles émettent entre 2,1 et 3,6 kilogrammes de CO₂ par mètre cube d'eau dessalée tandis que les technologies thermiques se situent plutôt entre 8 et 20 kg/m³.

Un doublement des capacités de dessalement fera donc bondir la demande d'électricité, ainsi que les émissions associées, si le *mix* électrique largement dominé par les hydrocarbures reste inchangé. La demande de gaz et de pétrole pour produire cette électricité en serait aussi augmentée. Plusieurs pays du Golfe commencent ainsi à mobiliser les énergies renouvelables, à l'image de la centrale par osmose inverse de Ras al-Khafji (Arabie saoudite), alimentée par des panneaux photovoltaïques, qui dessale chaque jour 60 000 m³. Enfin, on trouve également des centrales qui fonctionnent par énergie houli-motrice et géothermique.

Une étude publiée dans l'*International Journal of Economics and Management Sciences* souligne le potentiel du dessalement solaire en montrant qu'une usine à osmose inverse alimentée par énergie photovoltaïque peut produire de l'eau à 1,213 \$/m³ alors que, pour le moment, le coût de production d'une centrale alimentée au fuel

lourd oscille entre 1,118 et 1,555 \$/m³. Le coût de production record de 1,75 \$/m³ pour le projet de Sakaka (Arabie saoudite) démontre que les énergies renouvelables peuvent largement rivaliser financièrement avec les combustibles fossiles.

Un défi pour l'environnement

Un autre enjeu que pose le dessalement est la gestion des saumures, c'est-à-dire des particules de sel qui ont été séparées de l'eau de mer et qui sont souvent rejetées dans la mer, en causant une augmentation des niveaux de salinité de l'eau qui perturbent, voire détruisent, les écosystèmes.

Après le processus de dessalement, l'eau est séparée en deux parties : le perméat (eau dessalée) et le concentrat. Celui-ci contient une teneur en sel très élevée ainsi que les produits chimiques utilisés dans le prétraitement et l'entretien des installations. Impropre à tout usage agricole, industriel ou de consommation, cette eau

« **Chaque litre d'eau potable dessalée produit 1,5 litre de liquide pollué** »

concentrée est, la majorité du temps, rejetée en mer. Chaque litre d'eau potable dessalée produit 1,5 litre de liquide pollué avec du chlore et du cuivre et plus de 80 % des eaux usées générées par le dessalement finissent dans les mers, rivières, lacs et zones humides. Les effets du rejet sur le milieu dépendent des caractéristiques hydrologiques de celui-ci et des flux marins. En effet, le rejet de saumure n'aura pas les mêmes effets dans les récifs coralliens des Maldives que dans les océans.

Selon un rapport des Nations unies paru en 2019, le dessalement de l'eau de mer produirait plus de 150 millions de mètres cubes de saumure par jour, hautement chargée en polluants. En outre, 80 % de ces rejets sont réalisés à moins de dix kilomètres des côtes et se déposent dans les fonds marins.

Enfin, le dernier enjeu essentiel est d'améliorer les performances de l'ensemble de la chaîne, et pas seulement au niveau de la production. Les pertes d'eau au niveau des réseaux de transmission et de distribution, de la sortie des usines jusqu'aux consommateurs finaux, sont extrêmement élevées, atteignant plus de 50 % dans la plupart des pays du Golfe.

Réduire l'empreinte du dessalement

Dès lors, si le recours au dessalement semble inévitable et voué à connaître une expansion très forte, il est urgent de sortir de la dépendance de ces procédés aux énergies fossiles car le doublement des capacités installées au Moyen-Orient d'ici à 2030 devrait provoquer une hausse importante des émissions de GES, à moins que les *mix* électriques, à l'instar des EAU qui ont notamment déployé du nucléaire et entendent accélérer le déploiement à très grande échelle de capacités photovoltaïques, ne se décarbonisent.

Ces défis impliquent, d'une part, la mise en place d'usines de dessalement alimentées par des sources d'énergie bas carbone (champs de panneaux solaires, technologie solaire à concentration, éoliennes, énergie houlomotrice, voire nucléaire) et éventuellement des centrales à gaz (en cycle fermé, le cas échéant). Cette évolution suppose la décarbonation des *mix* électriques pour assurer une alimentation bas carbone de ces usines.

D'autre part, la construction d'infrastructures de la sorte ne doit pas se substituer à une politique d'efficacité énergétique, d'optimisation des parcs, de chasse aux pertes et gaspillages et de collecte et retraitement des eaux : il est indispensable d'améliorer la gouvernance de la ressource hydrique dans de nombreux pays, ainsi que de réduire les subventions à la consommation, pour réduire les pertes et inciter à mettre en œuvre des politiques durables d'utilisation de l'eau dans l'industrie, l'agriculture et le secteur résidentiel.

Les pays de Golfe sont ainsi devenus les plus gros consommateurs d'eau du monde : jusqu'à quinze fois plus que la France par habitant, ce qui laisse deviner l'ampleur des gabegies. Cette surconsommation résulte aussi de la gratuité de l'eau, longtemps accordée aux habitants dans de nombreux pays de la région, qui est la cause de la considérable augmentation de la demande, bien plus que la croissance de la population.

Il est aussi impératif de chercher à diminuer les pertes sur les réseaux de distribution d'eau douce. La perte totale d'eau est calculée en soustrayant la quantité d'eau facturée ou consommée de la quantité d'eau produite. Le Moyen-Orient se caractérise par des pertes au long du réseau d'approvisionnement particulièrement importantes, estimées entre 30 % à 50 % dans les zones urbaines. Cela signifie que, sur 1 000 m³ d'eau dessalée produite, seulement 500 m³ à 700 m³ arrivent

aux consommateurs. En Arabie saoudite, environ 40 % de la production totale des usines de dessalement a ainsi été perdue en 2018. Les pays d'Afrique du Nord sont aussi confrontés à ce problème. Le Qatar, Israël et les EAU se mobilisent autour de cet enjeu : Israël atteint désormais des niveaux de perte insignifiants, ce qui réduit d'autant le nombre de nouvelles usines à construire.

Les EAU ont aussi mis en place une stratégie claire. Le ministère de l'Énergie et des Infrastructures a dévoilé en 2017 sa stratégie de sécurité de l'eau pour 2036, l'*UAE Water Security Strategy 2036*, qui vise à garantir un accès durable à l'eau dans des conditions normales et d'urgence. Ce plan vise notamment à réduire de 50 % la consommation moyenne d'eau par habitant et de 21 % la demande publique d'eau. Ces défis sont majeurs car la consommation moyenne d'eau par jour y est de 550 litres, un des taux les plus élevés au monde.

« Le secteur agricole doit rationaliser sa consommation »

Pour rationaliser la demande en eau, il convient également de transformer les modèles agricoles des pays qui consomment de l'eau dessalée. En effet, au-delà des pertes en réseau, il est fréquent de constater que le secteur agricole consomme une quantité massive d'eau sans nécessairement mettre en place des politiques de préservation de la ressource. Au Moyen-Orient ou en Afrique, l'agriculture représente une part très importante de la quantité globale d'eau consommée, alors même que souvent les populations locales en sont dépourvues. Dans les pays du Moyen-Orient, plus de 85 % de l'eau douce est consommée par l'agriculture, contre 70 % dans le monde. Par exemple, en Arabie saoudite, on considère que les politiques agricoles et les méthodes d'irrigation utilisées depuis les années 1980 ont provoqué la perte des deux tiers de l'approvisionnement en eau souterraine du pays.

Dans un contexte de raréfaction de l'eau et de hausse de la demande, le secteur agricole doit rationaliser sa consommation. Israël est un exemple de réussite. En 1965, une entreprise du pays invente le goutte-à-goutte, une technologie qui depuis n'a cessé de se développer et bénéficie aujourd'hui à 75 % des plantations agricoles israéliennes contre 5 % en moyenne dans le monde. En plus de ce contrôle du volume d'eau irrigué, les agriculteurs ont recours à de l'eau usée recyclée pour alimenter les cultures ; dans le pays, le taux de recyclage atteint 87 %, contre 20 % ailleurs en moyenne. L'essor des relations

économiques entre Israël et les EAU, à la suite des accords d'Abraham (2020), est ainsi porté notamment par le secteur de l'agrotechnologie israélien. Ces solutions de « *smart irrigation* » permettent, grâce aux nouvelles technologies, un contrôle précis des quantités d'eau utilisées pour les cultures. Un projet mené à al-Hassa (Arabie saoudite) a obtenu une diminution de 44 % de la consommation d'eau et une augmentation de 21 % de la croissance des plantes. En plus d'une irrigation plus ciblée et efficace, les besoins en eau de l'agriculture peuvent être réduits en modifiant les usages traditionnels. Les cultures verticales sont un exemple d'agriculture à faible consommation d'eau.

Perspectives

Le déploiement à toujours plus grande échelle des énergies renouvelables laisse entrevoir une diminution des émissions de CO₂ des *mix* électriques dans les pays qui déploient des capacités de dessalement d'eau de mer. Néanmoins, la demande d'électricité sera, dans de nombreux cas, plus importante que la production grâce aux énergies renouvelables, et l'essor de cette production d'électricité renouvelable sera aussi contraint par les coûts du crédit, les approvisionnements en équipements et les réseaux souvent insuffisants. Un autre enjeu est l'accroissement des besoins en eau de différents secteurs. La hausse importante et rapide des besoins en dessalement peut donc ralentir la réduction des énergies fossiles dans les *mix* énergétiques.

L'année 2023 est marquée par la présidence émirienne de la COP 28 (Conference of the Parties 28) qui se tiendra au début de décembre à Dubaï, succédant à celle de l'Égypte, deux pays affichant de forts besoins. Le développement d'une industrie durable et efficace et la rationalisation du marché de l'eau dessalée doivent être une priorité. La Global Clean Water Alliance, qui a été fondée par l'International Desalination Association, s'est fixé pour objectif qu'entre 2020 et 2025, au moins 20 % des nouvelles centrales de dessalement soient alimentées par les énergies renouvelables, objectif qu'il faudrait non seulement atteindre, mais dépasser. Des développements très positifs existent en ce sens : en Australie, la totalité des nouvelles usines de dessalement doivent fonctionner avec des énergies renouvelables. Le Sommet sur les océans, qui sera présidé par la France à Nice en 2025, devra aussi prendre en compte la question du rejet des saumures, aux

côtés d'autres sujets clés comme la taxation du transport maritime, la prolifération des plastiques (notamment dans les produits de la pêche), la protection des aires marines, la production minière en eau profonde ou les solutions de géo-ingénierie.

Un autre enjeu majeur prend de l'importance : la coopération internationale en matière de gestion de l'eau. Les exemples de solidarité se multiplient, comme entre Israël et la Jordanie : cette dernière, dont la capitale est à 300 kilomètres d'un petit accès à la mer Rouge, a noué un partenariat stratégique, sous l'égide des EAU, avec son voisin. Amman va bénéficier de fournitures en eau provenant des usines de dessalement israéliennes et installe en retour d'immenses champs solaires qui vont alimenter Israël en électricité. Les territoires palestiniens devront aussi pouvoir bénéficier d'une fourniture suffisante et résiliente en eau. Il sera également impératif de garantir un cadre pacifique et mutuellement acceptable de la gestion du barrage éthiopien sur le Nil.

Enfin, le dernier enjeu est de construire et développer des unités de production de dessalement mobiles, transportables et pouvant être déployées partout dans le monde, afin de faire face à des situations de sécheresse exceptionnelles ou des incendies dans les zones côtières et, de surcroît, urbaines.

Marc-Antoine EYL-MAZZEGA



Retrouvez le dossier « Ressources naturelles »
sur www.revue-etudes.com