

Dessalement en Méditerranée : Des mesures pour atténuer les risques et impacts environnementaux



Face à la pénurie croissante en eau et aux défis climatiques, le dessalement apparaît comme une solution essentielle pour la région méditerranéenne. Ce document explore les progrès des technologies de dessalement, leurs impacts sur l'environnement et l'équilibre entre la gestion durable des ressources en eau et la préservation de l'environnement. Il vise à fournir une vue d'ensemble de la situation actuelle, des défis et des perspectives du dessalement en Méditerranée, en soulignant son rôle essentiel pour assurer la sécurité de l'eau et soutenir le développement régional.

Depuis la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement qui s'est tenue à Rio en 1992, un appel a été lancé pour partager les nouvelles technologies et les techniques innovantes en vue d'un développement durable au XXI^e siècle. Les techniques et technologies de dessalement ont depuis lors évolué, s'intégrant dans les systèmes de ressources de nombreux pays. Toutefois, la mise en œuvre de la gestion intégrée des

ressources en eau (GIRE) a été progressive et incomplète. En 2023, environ 20 000 usines de dessalement opérationnelles dans le monde ont produit environ 115 millions de m³/jour d'eau dessalée¹ à usage humain, dont 7,37 % (environ 15,6 millions de m³/jour) en Méditerranée. L'expansion rapide des usines de dessalement est due à la pollution, la pression démographique et au réchauffement climatique.

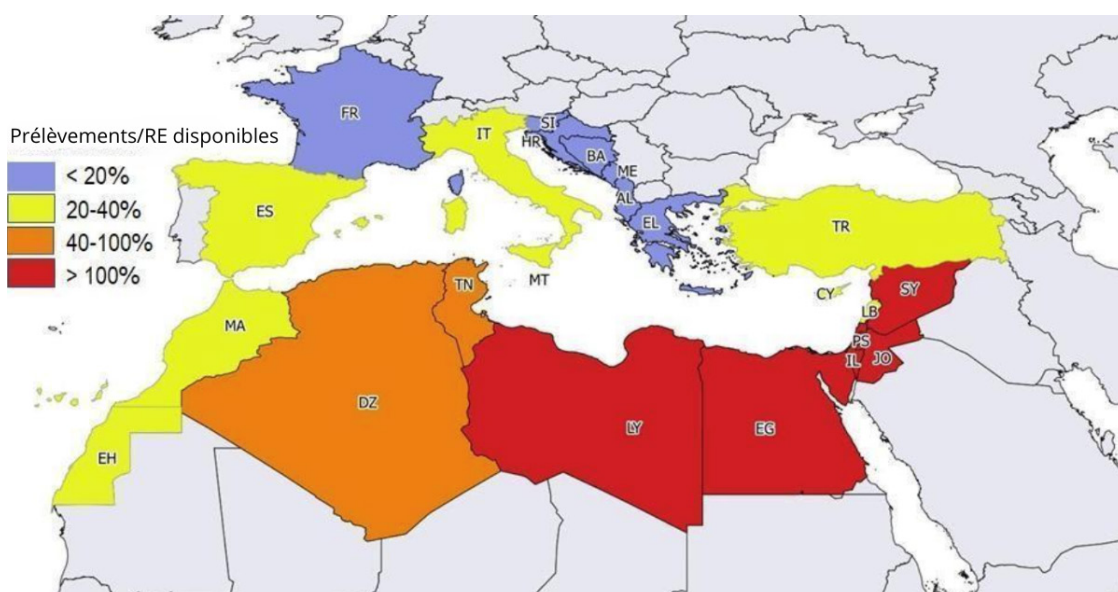


Figure 1-Carte des prélèvements d'eau par rapport aux ressources disponibles. De l'IME Masar-Agua AECID.

¹ DesalData, 2021. Global Water Intelligence, Desalination Plants (Usines de dessalement). Desaldata. <https://www.desaldata.com>.

Dans le sud de la Méditerranée, la croissance de la demande en eau excède les disponibilités, ce qui compromet temporairement et parfois même de manière permanente, sa gestion durable. Les ressources non conventionnelles occupent donc une place de plus en plus importantes. D'ici 2030, la capacité de dessalement de la Méditerranée pourrait atteindre 30 à 40 millions de m³/jour². Garantir le bien-être implique non seulement de répondre aux besoins immédiats en eau, mais également de préserver la qualité des écosystèmes, en particulier ceux de la mer Méditerranée. Il est crucial de combattre le changement climatique, conformément à l'objectif fixé par la COP21, qui vise à ne pas dépasser une hausse des températures de +2°C. Les activités à forte consommation d'énergie telles que le dessalement de l'eau de mer font l'objet d'un examen minutieux. Des initiatives récentes, intégrant les enjeux climatiques et de biodiversité dans les plans de relance post-COVID-19, s'inscrivent dans la démarche d'une relance verte. Des rapports tels que le rapport Dasgupta sur l'économie de la biodiversité et le rapport de synthèse de la CCNUCC sur la CDN soulignent l'urgence de mettre en œuvre des approches intégrées pour des transformations durables, inclusives et résilientes.

Dans ce document, le Plan Bleu étudie le contexte dans lequel le dessalement peut être une solution durable d'un point de vue technique, économique, environnemental et social. Il explore également les normes et les meilleures pratiques permettant d'atténuer ou de compenser les impacts négatifs sur le milieu marin. Cette note constitue une source d'information, compilant les expériences émergentes afin d'aider les praticiens et les bailleurs de fonds à évaluer les risques climatiques et environnementaux associés au dessalement.

Les technologies de dessalement et leur évolution

Aujourd'hui, deux principaux types de technologies de dessalement sont utilisés : le dessalement par membrane (osmose inverse — OI) et le dessalement thermique (MED, MVC et MSF). La technologie de l'osmose inverse, qui prédomine en raison de sa faible consommation d'énergie et de son efficacité supérieure à celle des autres technologies, utilise le principe de l'osmose pour éliminer le sel et les autres impuretés en transférant l'eau à travers des membranes semi-perméables. Le dessalement thermique utilise la chaleur, souvent la chaleur résiduelle des centrales électriques ou des raffineries, pour évaporer et condenser l'eau en vue de sa purification. Les systèmes hybrides, qui combinent deux ou plusieurs technologies de dessalement, visent à tirer parti de leurs avantages comparatifs. Ces systèmes peuvent inclure la distillation thermique et le dessalement par membrane produisant parfois de l'énergie électrique en même temps que de l'eau pure. D'après certaines études, les systèmes hybrides sont considérés comme économiquement avantageux. Ils peuvent, en effet, réduire les consommations d'énergies, les problèmes d'entartrages et d'encrassement, ainsi que le coût de l'eau dessalée. Ce tout en améliorant les taux de récupération (moins d'eau d'alimentation nécessaire) et la qualité globale de l'eau. Les innovations devraient améliorer la résilience

de l'environnement côtier en limitant les incidences sur l'environnement et en étant ainsi mieux adaptées aux écosystèmes concernés³. Actuellement, l'osmose inverse est considérée comme la technologie la plus économiquement viable. Elle a également amélioré son efficacité énergétique. Bien que de nouvelles améliorations soient attendues grâce à la récupération d'énergie, il est peu probable que ces progrès soient substantiels. Outre la consommation d'énergie, il est également important de considérer les impacts potentiels des techniques et infrastructures de captage d'eau de mer, des procédés d'évacuation de la saumure, et des conséquences sur la faune et la flore marines. L'utilisation de produits chimiques dans le prétraitement, le processus de dessalement et le nettoyage doit également être prise en compte.

Risques environnementaux liés au dessalement

a) Risques liés aux prises d'eau

L'eau d'alimentation des usines de dessalement d'eau de mer peut être prélevée de plusieurs manières : par des puits de captage côtiers, par infiltration sous les plages ou sous le fond marin, ou encore prélevée directement en mer ouverte, en surface ou au fond. L'emplacement, la conception, la construction et la capacité des installations de captage d'eau doivent employer les technologies les plus avancées disponibles. Ces éléments doivent être intégrés comme composantes essentielles de la séquence "éviter-réduire-compenser" ainsi que dans toute étude d'impact environnemental d'une potentielle usine de dessalement.

Lors de la phase initiale de construction des usines de dessalement, les milieux marins subissent de graves perturbations, incluant le déplacement de sédiments et de polluants, la détérioration des fonds marins et des écosystèmes aquatiques. Ces perturbations peuvent causer la destruction d'habitats, la mort de certaines espèces marines, l'augmentation de la turbidité de l'eau et la libération de polluants toxiques à partir des sédiments. Pendant les opérations, les prises d'eau de mer ouvertes affectent les œufs et les larves de poissons et d'invertébrés, les spores d'algues, les algues marines, le phytoplancton, le zooplancton, ainsi que les organismes aquatiques plus petits, en les entraînant dans l'usine avec l'eau d'alimentation. Les organismes aquatiques de plus grande taille risquent de suffoquer, de mourir de faim ou de s'épuiser lorsqu'ils sont aspirés contre les grilles. Les espèces marines menacées et protégées, telles que les tortues de mer et les serpents de mer, sont particulièrement menacées par ces impacts. Les effets négatifs du dessalement peuvent être minimisés grâce à des travaux maritimes non invasifs tels que le microtunnelage, et par l'éloignement des prises d'eau des zones écologiquement productives et des habitats d'espèces marines rares ou menacées.

Limiter la vitesse d'entrée de l'eau d'alimentation à 0,152 m/s, comme dans le cas des courants marins doux, peut aider les organismes non sédentaires à s'échapper de la zone de prise d'eau. En outre, les petites ouvertures de tamis (<22 cm) et les mailles fines (<9 mm) peuvent réduire les impacts sur les petits organismes, tels que le phytoplancton et les larves. Les prises d'eau ouvertes nécessitent généralement plus de prétraitement en raison

² Khordagui H. (2014). Perspectives en matière de dessalement dans la région méditerranéenne. Réunion d'un groupe d'experts sur les impacts environnementaux cumulés du dessalement en Méditerranée. Projet SWIM. Bruxelles.

³ Khaled Elsaid et al. (2020) « Environmental impact of desalination technologies: A review » (Impact environnemental des technologies de dessalement : Une revue) dans Science of Total environment ; 748:141528

de la qualité variable de l'eau, ce qui entraîne une augmentation de l'utilisation de produits chimiques et des rejets dans l'environnement marin.

Les prises d'eau sous la surface, utilisant les sédiments environnants pour la préfiltration, grâce à leur action de biofiltrage, produisent généralement une eau d'alimentation de meilleure qualité. Cela réduit le risque d'encrassement des membranes, ce qui diminue considérablement les besoins de prétraitement. Le fait de placer ces prises d'eau à une distance éloignée (où l'abondance des espèces est plus faible), par exemple à 300 mètres du littoral et à au moins 20 mètres sous la surface de l'eau, permet d'atténuer davantage les incidences sur la vie marine.

En outre, il faut tenir compte des effets potentiels tels que la prolifération d'algues, qui peut compromettre les installations de traitement de l'eau telles que les usines de dessalement d'eau de mer, en altérant la qualité de l'eau douce et le rendement des usines de dessalement⁴. Les stratégies de compensation efficaces pour les impacts de l'empiètement et de l'entraînement doivent être basées sur des études environnementales rigoureuses, des protocoles de collecte de données et des enquêtes sur les populations.

b) Risques climatiques : Empreinte carbone et efficacité énergétique du dessalement

La consommation énergétique reste une préoccupation majeure dans le domaine du dessalement et, bien qu'elle soit largement basée sur le carbone, son impact sur l'environnement est significatif. En 2021, l'ONU a indiqué que la production quotidienne de 95 millions de m³ d'eau dessalée entraînait des émissions de gaz à effet de serre équivalent à 100 millions de tonnes de CO₂, dont environ 20 % provenaient de la région méditerranéenne. Il s'agit des émissions de monoxyde de carbone (CO), d'oxyde nitrique (NO), de dioxyde d'azote (NO₂) et de dioxyde de soufre (SO₂). Bien que les procédés thermiques tels que la distillation flash à plusieurs étages (MSF), la distillation à effets multiples (ME) et la distillation par compression de vapeur (VC) aient joué un rôle important dans les évaluations énergétiques passées du dessalement, les technologies basées sur les membranes⁵ constituent désormais la référence en matière d'empreinte carbone, d'émissions et d'évaluation des coûts dans les projets à court terme. Cependant, la technologie de dessalement actuelle nécessite 8 à 20 fois plus d'énergie que le traitement conventionnel des eaux de surface, ce qui souligne la nécessité d'améliorer l'efficacité énergétique dans le dessalement durable de l'eau de mer à l'avenir⁶. Un objectif d'empreinte carbone de 900gCO₂e/m³ d'eau dessalée est réalisable au niveau de l'usine.

La qualité de l'eau d'alimentation, la conception de la prise d'eau et les processus de prétraitement influencent considérablement l'efficacité du dessalement et, par conséquent, la consommation d'énergie. En Méditerranée, le dessalement par osmose inverse est le plus rentable en raison de la faible salinité et du potentiel d'encrassement biologique, tandis que les procédés thermiques sont préférables dans les environnements à salinité plus élevée.

Le coût de l'énergie reste une dépense opérationnelle essentielle, qui varie en fonction des prix du marché ou des prix publics. Le marché et les taxes sur l'électricité peuvent fausser le coût de l'énergie utilisée dans les systèmes de dessalement et donc le coût de l'eau dessalée. Ce coût, pour les projets d'ingénierie, d'approvisionnement et de construction (EPC) qui ne prennent pas en compte le risque de l'entreprise elle-même, est inférieur à 0,60 €/m³ dans la plupart des cas récents⁷.

Les innovations en matière de récupération d'énergie et de performance des équipements ont permis d'atteindre des taux de consommation nette compris entre 1,5 kWh/m³ pour l'osmose inverse et 4 kWh/m³ pour la distillation flash à plusieurs étages⁸. Pour atteindre les objectifs de durabilité de 2030, les projets futurs de dessalement devraient viser une demande énergétique ne dépassant pas 3,5 kWh/m³ d'eau douce. Les nouvelles réglementations environnementales peuvent inciter à moderniser les installations et à améliorer les décisions de gestion, en fixant des objectifs ambitieux dès le stade de la conception du projet afin d'améliorer les performances de l'industrie en matière de développement durable.

Malgré les progrès significatifs réalisés dans les technologies membranaires depuis le début des années 90 et les innovations récentes (membranes efficaces de plus grand diamètre, périodes d'exploitation prolongées, maintenance améliorée et améliorations du processus RO telles que les cascades et les déviations partielles du flux), la consommation d'énergie pour le dessalement reste élevée. Les politiques parallèles de tarification du carbone n'ayant pas permis de réglementer les activités à forte intensité énergétique, des approches plus efficaces sont primordiales⁹.

Les projets futurs de dessalement en Méditerranée doivent améliorer la sécurité, la flexibilité et l'accessibilité financière du système d'approvisionnement en eau, ce qui nécessite une amélioration de l'approvisionnement en énergie. Il est recommandé d'adopter une approche globale de la gestion de l'énergie, qui englobe tous les aspects du processus, y compris l'intégration d'une alimentation électrique indépendante. Outre les solutions d'économie et de récupération d'énergie dans les usines, les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire photovoltaïque et le stockage des batteries, en raison de leur économie et de la disponibilité des ressources en Méditerranée, pourraient stabiliser les coûts énergétiques et réduire les impacts sur l'environnement. Ces solutions pourraient en effet contribuer à atténuer les augmentations futures des coûts liés à l'énergie en fournissant un moyen de stabiliser les coûts énergétiques des installations de dessalement tout en réduisant les impacts sur l'environnement de la production d'eau¹⁰. En outre, la prise en compte des paramètres hydrodynamiques (par exemple, une vitesse de courant plus élevée, des substrats durs et rocheux) dans la conception et la construction des usines de dessalement peut conduire à une utilisation plus efficace de l'énergie et à une réduction des impacts environnementaux¹¹.

⁴ Mohamed N. Gomaa et al. (2018) « A review of harmful algal blooms (HABs) and their potential impacts on desalination facilities » (Examen des efflorescences algales nuisibles [HABs] et de leurs impacts potentiels sur les installations de dessalement)

⁵ L'osmose inverse (RO) est considérée comme la référence actuelle, bien que l'électrodialyse soit abordée ultérieurement

⁶ Huyen Trang Do Thi et al. (2021) « Comparison of Desalination Technologies Using Renewable Energy Sources with Life Cycle, PESTLE, and Multi-Criteria Decision Analyses » (Comparaison des technologies de dessalement utilisant des sources d'énergie renouvelables à l'aide d'analyses du cycle de vie, de PESTLE et de décisions multicritères) Water

⁷ Le coût prévu de l'eau dessalée provenant du SWRO Soreq 2, en Israël, est d'environ 0,40 €/m³

⁸ À l'exclusion du pompage de l'eau produite vers les systèmes d'approvisionnement.

⁹ La banque de développement KfW ne finance pas le dessalement ni aucun projet d'efficacité énergétique basé sur des combustibles fossiles

¹⁰ Caldera, U. & Breyer, C. (2020), « Strengthening the global water supply through a decarbonized global desalination sector and improved irrigation systems » (Renforcer l'approvisionnement mondial en eau grâce à un secteur mondial de dessalement décarbonisé et à des systèmes d'irrigation améliorés) dans Energy, Elsevier, vol. 200(C)

¹¹ Silvia Bianchelli et al. (2022) « Impact of hypersaline brines on benthic meio- and macrofaunal assemblages : A comparison from two desalination plants of the Mediterranean Sea » (Impact des saumures hypersalines sur les assemblages de la méio- et macrofaune benthique : Une comparaison entre deux usines de dessalement de la mer Méditerranée) in Desalination, Vol. 352

c) Évaluation de l'impact du rejet de saumure sur la salinité du littoral méditerranéen`

Les Nations unies indiquent que les 95 millions de m³ d'eau dessalée chaque jour dans le monde rejettent 140 millions de m³/j de saumure¹². Il est essentiel de prendre en compte les propriétés physico-chimiques de la saumure, qui sont influencées par la qualité de l'eau d'alimentation, les processus de prétraitement, les techniques de dessalement et les taux de récupération de l'eau. Alors que les systèmes d'osmose inverse (RO) produisent une saumure dont la salinité est plus élevée, mais dont la température est identique à celle de l'eau ambiante, le dessalement à plusieurs étages (MSF) produit une saumure dont la température et la salinité sont plus élevées, mais dont la salinité est généralement plus faible que celle du RO. Les systèmes de dessalement hybrides, combinant l'osmose inverse et les technologies thermiques, offrent une approche plus durable en diluant la saumure à forte salinité du RO et en abaissant la température des saumures MSF ou de la distillation à effet multiples (MED)¹³. Si le rejet de saumure dans la mer est une préoccupation majeure pour les technologies de dessalement, il est important de noter que l'utilisation

l'influence de facteurs tels que les apports fluviaux et les masses d'eau adjacentes, comme la mer Noire et l'océan Atlantique. Cependant, les augmentations locales de la concentration en sel peuvent avoir un impact négatif sur la vie marine. Le problème réside dans la concentration des sels et la durée d'exposition à la saumure. Si l'effluent est plus dense que l'eau de mer environnante, le panache de saumure peut se déposer sur le fond de l'océan, affectant la vie marine vivant sur le fond plus que les espèces pélagiques¹⁴.

d) Risques écologiques des rejets de saumure dans les prairies océaniques et les écosystèmes marins

La qualité des eaux marines est compromise par l'élimination inadéquate des saumures issues des processus de dessalement¹⁵. En règle générale, pour chaque litre d'eau potable produit, environ 1,5 litre de liquide contaminé par le chlore et le cuivre est généré. Cette saumure toxique, lorsqu'elle est rejetée dans l'océan, peut perturber les chaînes alimentaires marines, entraver l'osmorégulation des organismes marins, épuiser l'oxygène (anoxie) au fond de la mer et entraver la photosynthèse des plantes marines en raison de la réduction de la lumière. La saumure est souvent

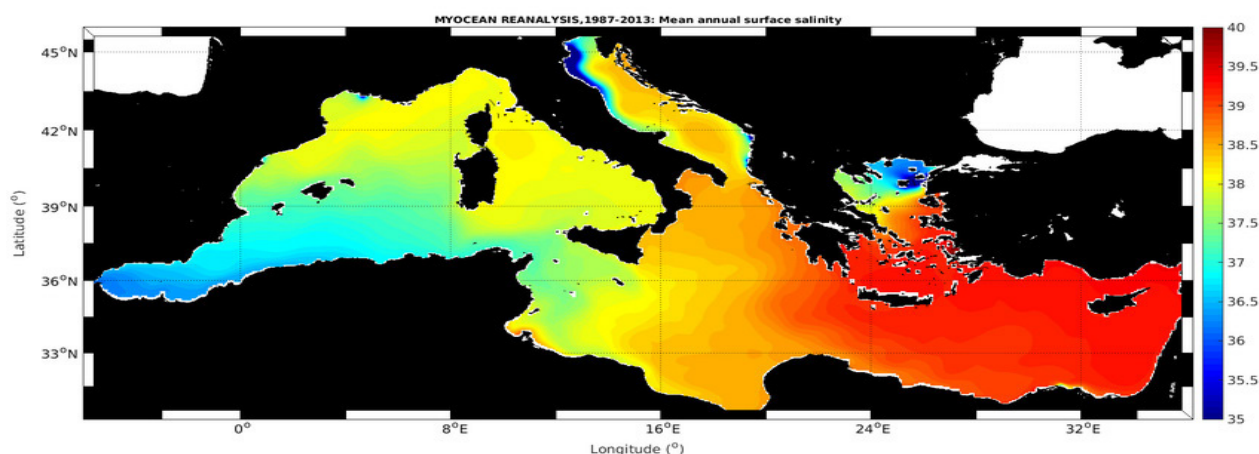


Figure 2-Salinité de surface annuelle moyenne en mer Méditerranée pour la période 1987-2013 (Source : Soukissian et al., 2017)

des ressources en eau continentales et le dessalement aboutissent tous deux à des bilans nets d'eau et de sel similaires. L'excédent d'eau prélevé pour le dessalement est restitué à la mer, ce qui permet de maintenir l'équilibre total entre l'eau et le sel. La mer Méditerranée présente naturellement un bilan hydrique négatif, l'évaporation compensant l'apport d'eaux moins salées, ce qui entraîne une salinisation progressive. En outre, les niveaux de salinité varient d'un bout à l'autre de la Méditerranée, selon la salinité varie d'un bout à l'autre de la Méditerranée, selon la profondeur et la saison, et le taux de renouvellement de l'eau de mer diffère également d'une zone à l'autre, sous

25% plus chaude que l'eau ambiante, ce qui diminue l'oxygène dissous car l'eau chaude retient moins de gaz¹⁶. Sur de longues périodes, cela peut entraîner un stress osmotique et la migration d'espèces marines. Les variations de salinité ont un impact différent sur les écosystèmes, en fonction des niveaux de tolérance des espèces et de leurs phases de développement. Par conséquent, l'évaluation de la vulnérabilité des écosystèmes aux anomalies de salinité élevées et persistantes est cruciale pour les inventaires préopérationnels de la biodiversité marine sur les sites des projets. Les rejets de saumure affectent un large éventail d'organismes marins, de la microbiologie aux macrofaunes.

¹² The State of Desalination and Brine Production: A Global Outlook (L'état du dessalement et de la production de saumure : une perspective mondiale), Science of the Total Environment, Volume 657, March 2019, p. 1343-1356

¹³ Omerspahic, M. et al. (2022) « Characteristics of Desalination Brine and Its Impacts on Marine chemistry and Health, With emphasis on the Persian/Arabian Gulf : A Review » (Caractéristiques de la saumure de dessalement et son impact sur la chimie et la santé marines, en particulier dans le golfe Persique/Arabe : Un bilan)

¹⁴ Yyoana Del-Pilar-Ruso et al. (2014) « Benthic community recovery from brine impact after the implementation of mitigation measures » (Rétablissement de la communauté benthique après l'impact de la saumure après la mise en œuvre de mesures d'atténuation) in Water Research 70(2015), pp325-336

¹⁵ Fernandez-Torquemada, et al., 2009 « Dispersion of brine discharge from seawater reverse osmosis desalination plants » (Dispersion de la saumure provenant des usines de dessalement par osmose inverse) — Perth Seawater Desalination Plant Water Quality Monitoring Programme. Rapport n° 445_001/3. Préparé par Oceanica Consulting Pty LTD pour la Water Corporation of Western Australia

¹⁶ Silvia Bianchelli et al. (2022) « Impact of hypersaline brines on benthic meio- and macrofaunal assemblages : A comparison from two desalination plants of the Mediterranean Sea » (Impact des saumures hypersalines sur les assemblages de la méio- et macrofaune benthique : Une comparaison entre deux usines de dessalement de la mer Méditerranée) dans Desalination, Vol. 352

Les communautés microbiennes, en particulier les protéobactéries, sont fortement affectées par ces variations soudaines et à court terme de la salinité. Une augmentation de la salinité >5 ‰ par rapport à l'eau ambiante, combinée à une température d'environ 22 °C, a entraîné la mort de 60 % des populations initiales. L'exposition chronique aux rejets de saumure modifie également le métabolisme bactérien et entraîne des changements de population¹⁷. Les niveaux trophiques supérieurs, y compris le méiofaune et la macrofaune benthiques, sont directement touchés par les rejets de saumure ou indirectement par l'altération des ressources environnantes nécessaires à un développement adéquat. Des études ont montré que les rejets de saumure peuvent mettre en danger ces grandes communautés et que les réponses biologiques de ces communautés sont fortement liées à leur profondeur de vie. Des variations dans les structures de population peuvent se produire, avec, par exemple, la disparition de bivalves, d'amphipodes ou de gastéropodes, pour les écosystèmes en aval. Ces rejets ont également entraîné une réduction drastique de la diversité et de l'abondance des habitats benthiques. Par exemple, l'abondance et la diversité du méiofaune ont diminué respectivement de 92 % et de 62 %, au profit d'espèces plus tolérantes comme les nématodes¹⁵. La faune benthique des substrats meubles subit également des perturbations importantes. Par exemple, les coraux, qui maintiennent l'intégrité de l'habitat, sont très sensibles aux variations importantes de la salinité (augmentation >40 g/L), ce qui peut entraîner la mort (par exemple, la famille Scléractiniaire) ou le blanchiment. Les producteurs primaires sont directement affectés par l'exposition à court terme à des niveaux de salinité élevés (>40 g/L), six espèces ayant disparu dans le golfe Persique à cause des usines de dessalement. L'exposition à la saumure a également un impact sur les taux de recrutement des espèces marines, telles que les poissons pleuronectes, en affectant l'éclosion des œufs¹⁸. Il est essentiel de considérer les rejets de saumure comme des eaux usées, nécessitant des méthodes d'élimination à impact minimal. Les projets de dessalement doivent faire l'objet d'études préliminaires approfondies, comprenant des évaluations océanographiques, une cartographie des habitats, des évaluations de la biodiversité et des données hydrodynamiques. La modélisation du panache (modèles 2D et 3D) est essentielle pour prédire le comportement des rejets de saumure, en tenant compte des caractéristiques de l'effluent, du mode de rejet, des conditions limites environnementales et des forces naturelles telles que les marées et les courants. Tous les projets futurs de dessalement de l'eau de mer en Méditerranée devraient faire l'objet d'une évaluation rigoureuse avant la conception de l'usine. Il s'agit notamment d'évaluer la typologie du milieu récepteur et la nature des habitats écologiques associés. Il est essentiel d'identifier et de quantifier l'intégrité des écosystèmes des fonds marins, y compris les interactions entre les espèces locales et les flux d'énergie

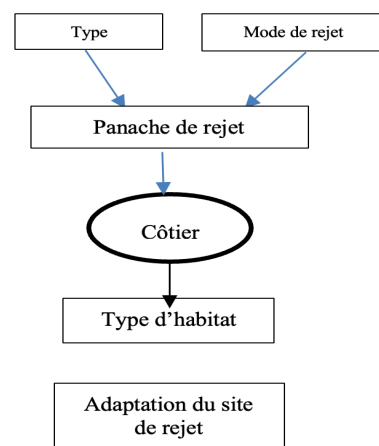


Figure 3- Facteurs jouant un rôle central dans le rejet/le panache de saumure

naturels. En effet, il doit servir d'état de référence, ce qui implique une description détaillée de la faune, de la flore et des caractéristiques du substrat, ainsi qu'une évaluation qualitative de l'eau¹⁹. Par exemple, les autorités environnementales espagnoles ont fixé un seuil critique de salinité de 38,5 PSU (Unité de Salinité Pratique) dans les Évaluations des Incidences sur l'Environnement (EIE) et les autorisations de rejet afin de protéger les écosystèmes et les herbiers de posidonies océaniques²⁰, un indicateur clé de la biodiversité dans les environnements côtiers méditerranéens. La salinité autour des diffuseurs de saumure ne doit pas dépasser 1 g/l à la limite d'une zone de mélange restreinte de 400 m ou plus. Pour ce faire, on utilise des moyens techniques (diffuseurs à orifices multiples, dérivation de l'eau de mer et co-implantation avec une centrale électrique ou une station d'épuration existante...) et des processus naturels tels que les courants forts. Après avoir cartographié les herbiers de posidonies océaniques et établi des seuils de salinité pour protéger les communautés clés (en théorie, les variations de salinité ne devraient pas dépasser 5 à 10 ‰ de la salinité ambiante), des programmes de surveillance complets devraient être mis en œuvre pour évaluer la distribution du panache de saumure dans le temps et pour détecter toute anomalie de salinité prévue. Ces programmes devraient couvrir différents paramètres, y compris les facteurs physiques (température, salinité, turbidité, pH, conductivité, MEST) et chimiques (minéraux, métaux, oxygène, carbone, azote, fluorures, chlorures, nitrates, sulfates, matières organiques, hydrocarbures), ainsi que des analyses microbiologiques. Ces programmes nécessitent une maintenance précise, avec des échantillonnages répétés à plusieurs endroits au fil du temps²¹. L'usine de Torrevieja²², par exemple, a revu son programme de vigilance environnementale dans les six mois qui ont suivi sa mise en service et fournit des rapports semestriels sur l'impact environnemental.

¹⁷ Hila Frank et al. (2017) « Short-term effects of SWRO desalination brine on benthic heterotrophic microbial communities » (Effets à court terme de la saumure de dessalement SWRO sur les communautés microbiennes hétérotrophes benthiques) dans *Desalination*, vol. 417, pp 52-59

¹⁸ Moslem Sharifinia et al. (2019) « Prevention is better than cure: Persian Gulf biodiversity vulnerability to the impacts of desalination plants » (Mieux vaut prévenir que guérir : Vulnérabilité de la biodiversité du golfe Persique aux impacts des usines de dessalement) dans *Global Change Biology*, Vol. 25, Issue 12

¹⁹ Rubén Navarro Barrio et al. (2021) « Application of salinity thresholds in Spanish brine discharge regulations: Energetic and environmental implications » (Application des seuils de salinité dans les réglementations espagnoles sur les rejets de saumure : Implications énergétiques et environnementales) dans *Desalination* 501

²⁰ Sola et al, 2019 « Evaluating environmental requirements for the management of brine discharges in Spain » (Évaluation des exigences environnementales pour la gestion des rejets de saumure en Espagne) - *Desalination* 471, 114 132 et Sola, et al, 2020 « Sustainable desalination : Long-term monitoring of brine discharge in the marine environment » (Dessalement durable : Surveillance à long terme des rejets de saumure dans l'environnement marin) - *Marine Pollution Bulletin*, Volume 161, Part B, 2020, 111813

²¹ Y. Y. Fernández-Torquemada et al, 2019 « Impact of brine on the marine environment and how it can be reduced » (Impact de la saumure sur l'environnement marin et moyens de le réduire) — *Desalination and Water Treatment* 167, 27-37, et Torquemada et al, 2008 « Salinity tolerance of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* : recommendations to minimize impact of brine discharges from desalination plants » (Tolérance à la salinité de l'herbier méditerranéen *Posidonia oceanica* : recommandations pour minimiser l'impact des rejets de saumure des usines de dessalement) — *Desalination* 221, 602-607

²² La plus grande des usines de dessalement prévues en Espagne et la deuxième plus grande usine au monde à utiliser la technologie de l'osmose inverse.

En Israël, les usines de dessalement effectuent une surveillance du milieu marin deux fois par an, tandis qu'à Perth, en Australie, l'usine de dessalement a mis en place un programme complet de surveillance des rejets de saumure. Au début de l'année 2008, l'usine a été arrêtée à deux reprises en raison de la réduction des niveaux d'oxygène dissous dans le détroit de Cockburn.

On ne saurait trop insister sur l'importance de la science, de la surveillance et de la recherche sur la sensibilité des herbiers océaniques aux fortes concentrations de sel et aux courants marins. La réutilisation et l'exploitation de la saumure offrent également des opportunités économiques, telles que la production commerciale de sel et l'utilisation de la saumure dans les systèmes de production piscicole.

e) Additifs chimiques pour le dessalement : Risques environnementaux potentiels²³

Une large gamme de produits chimiques ayant des effets néfastes sur l'environnement²⁴ est utilisée dans les processus de dessalement pour relever les défis techniques et opérationnels, tels que la prévention de l'encrassement et de l'entartrage, et pour améliorer les performances de l'usine. Ces produits chimiques sont généralement divisés en deux catégories. Les produits chimiques «en ligne» comprennent les coagulants, les floculants, les agents de chloration et de déchloration et les biocides. Les produits chimiques «hors ligne», souvent plus puissants, sont utilisés pour dissoudre les salissures sur les membranes de filtration. Les agents de nettoyage en ligne et hors ligne, lorsqu'ils sont utilisés, peuvent conduire à des concentrations élevées de produits chimiques dans le système, ce qui peut affecter la qualité de l'eau. Ces produits chimiques sont souvent mélangés à la saumure et déversés dans les rejets. Plus le taux d'utilisation est élevé pour minimiser le volume de saumure, plus la quantité de produits chimiques nécessaires est importante, ce qui augmente le risque. Ces rejets peuvent avoir des effets néfastes sur la vie marine, en particulier sur les organismes qui tolèrent mal une telle contamination de l'environnement. La combinaison d'une salinité élevée, d'additifs chimiques tels que les anti-tartres et les coagulants, et de composés toxiques formés à partir de sous-produits de désinfection, peut être préjudiciable aux écosystèmes marins (par exemple, en affectant les cycles de reproduction, en entravant la croissance et le développement, en réduisant la diversité des espèces benthiques). Ces facteurs peuvent entraîner la mort d'organismes marins sensibles. Le type de prétraitement influe sur la nécessité d'ajouter des produits chimiques; par exemple, les puits côtiers ont moins d'impact et les membranes de prétraitement nécessitent des nettoyages fréquents.

Pour l'évaluation de l'impact, la connaissance des charges chimiques et de la sensibilité des écosystèmes est cruciale, mais souvent indisponible en raison de la protection conférée par les brevets. Des données météorologiques marines précises (vents, courants, houle, évaporation, précipitations, etc.) sont essentielles pour prévoir la composition chimique des eaux d'alimentation et la dispersion des émissaires. Pour limiter les risques, il est essentiel d'établir des lignes directrices normatives pour les prestataires, afin de favoriser la pénétration du marché avec des technologies économes en eau. Il peut s'agir d'une

approche «des produits chimiques à la mer», visant un taux de survie de 99,9 %, de tests de toxicité de l'effluent entier (WET) avec des rejets de saumure au niveau de l'usine, ou de l'utilisation de produits chimiques verts (un défi pour les chercheurs). En outre, il est recommandé de traiter le chlore avant le rejet de la saumure, par exemple en ajoutant du dioxyde de soufre pour éliminer le chlore des effluents.

f) Risques liés à l'alcalinité totale

L'utilisation de détartrants dans les processus de dessalement peut modifier de manière significative l'alcalinité de la saumure. La gestion des niveaux de pH est essentielle pour éviter la précipitation sur les membranes et pour maintenir l'équilibre bicarbonate-carbonate. Les perturbations de cet équilibre pourraient entraîner des changements notables dans les niveaux d'alcalinité des eaux rejetées, ce qui pourrait avoir un impact sur les écosystèmes marins. Des études ont montré que des niveaux élevés d'alcalinité dans la saumure peuvent avoir divers effets sur la vie marine, notamment une altération des processus physiologiques et une perturbation de l'habitat. Ces effets sont particulièrement prononcés dans les écosystèmes sensibles tels que les récifs coralliens et les herbiers marins, où l'alcalinité élevée peut interférer avec les processus de calcification essentiels à leur croissance et à leur survie. Pour atténuer ces effets, la conception du processus doit inclure une sélection judicieuse d'additifs antisalissures. Dans certains cas, il est conseillé de prédiluer les saumures avant de les rejeter en mer afin de réduire leur impact sur l'alcalinité. Il est donc essentiel de gérer les additifs chimiques avec précautions dans les processus de dessalement afin de minimiser les risques écologiques.

g) Risques de pollution thermique

Tous les procédés de dessalement, à l'exception de la technologie de l'osmose inverse, impliquent des variations thermiques dans les transformations de l'eau d'alimentation. Cependant, les variations de température de l'eau de surface dues à la saumure rejetée sont communes à toutes les méthodes de dessalement. Des facteurs saisonniers et divers autres facteurs peuvent également entraîner une baisse de la température de l'eau d'alimentation. Par conséquent, l'encrassement des membranes de dessalement et d'autres dispositifs de l'usine peut augmenter en raison des ions plus élevés libérés par les arrivées d'eau, ce qui nécessite un traitement plus poussé, tel que l'élimination du bore. Ces traitements accrus peuvent entraîner une pollution des écosystèmes des eaux peu profondes aux points de rejet de la saumure en raison des concentrations élevées de composants antisalissures. En effet, les variations de la température de l'eau d'alimentation sont étroitement liées au fonctionnement des usines de dessalement, et ces deux paramètres peuvent s'influencer l'un l'autre, ce qui peut entraîner une augmentation de la pollution. Le déversement de saumure sur des rivages peu profonds peut entraîner des changements locaux de température à proximité de la sortie, ce qui peut avoir des effets néfastes sur les habitats marins. Ceci est particulièrement préoccupant en ce qui concerne l'impact de l'augmentation de la température de l'eau. Il est donc essentiel de comprendre la stratification saisonnière de la mer:

²³ Les impacts terrestres ne sont pas abordés dans la présente note.

²⁴ Frank et al, 2019 « Chronic effects of brine discharge 469 from large-scale seawater reverse osmosis desalination facilities on benthic bacteria » (Effets chroniques des rejets de saumure 469 provenant d'installations de dessalement d'eau de mer par osmose inverse à grande échelle sur les bactéries benthiques). Water 470 Res. 151, 478–487

Il est primordial de réaliser des études complètes sur les sites des rejets, y compris des évaluations de la vie marine, afin de minimiser les écarts de température importants entre les zones de prise d'eau et de rejets.

Cadres réglementaires et lignes directrices internationales

a) Aperçu des règlements et directives ayant une incidence sur le secteur du dessalement

Il n'existe actuellement aucun cadre juridique clair pour le dessalement au niveau mondial. L'Union européenne (UE) a adopté plusieurs règlements et directives qui ont un impact direct ou indirect sur le secteur du dessalement. Le tableau ci-dessous donne un aperçu du contenu des directives et de leurs applications spécifiques à l'industrie du dessalement. Elle englobe une série de sujets allant de la protection de l'environnement et de la conservation de la biodiversité aux normes de qualité de l'eau et aux contrôles des émissions. La réglementation du secteur du dessalement est liée à plusieurs politiques et stratégies européennes²⁵, ce qui fait du cadre réglementaire de chaque pays l'outil principal pour assurer la conservation des écosystèmes et la protection de la biodiversité. L'impact sur la mer Méditerranée devrait être une préoccupation pour tous les pays côtiers, soulignant la nécessité d'un accord qui intègre la protection de la mer dans la législation et les réglementations de ces nations.

La plupart des pays méditerranéens²⁶ se sont engagés à respecter le protocole PNUE/PAM sur la pollution d'origine tellurique (LBS), en vigueur depuis 2009, afin de prévenir, dans la mesure du possible, la pollution de la mer Méditerranée, en particulier par des substances toxiques, persistantes et susceptibles de se bioaccumuler. La mise en œuvre de cet engagement au niveau national peut servir de base au soutien des projets de dessalement.

Des organisations telles que le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et l'Organisation mondiale de la santé (OMS) proposent des lignes directrices qui, bien qu'elles ne soient pas juridiquement contraignantes, peuvent influencer les réglementations nationales et les pratiques de l'industrie. Les «Lignes directrices pour la gestion durable des eaux usées et de la saumure de dessalement» du PNUE permettent aux usines de dessalement de développer et de mettre en œuvre des pratiques de gestion durable de la saumure, essentielles pour minimiser l'impact écologique des activités de dessalement. Les installations de dessalement, en particulier celles qui fournissent de l'eau potable, doivent également s'aligner sur les «Directives santé (OMS) afin de s'assurer que la qualité de l'eau répond aux normes de santé et de sécurité requises. Les aires marines protégées (AMP), qui vont des réserves marines interdites avec une protection totale, aux zones avec une protection partielle, devraient également être considérées comme interdites pour les sites de projets de dessalement.

Directive/ Réglementation	Contenu	Application au dessalement
Directive-cadre sur l'eau (DCE) — 2000/60/EC	Protège et améliore les ressources en eau de l'UE, en fixant des normes pour la qualité des eaux souterraines et des eaux de surface.	Respect des normes de qualité de l'eau, en particulier pour les rejets de saumure et de sous-produits.
Directive Cadre Stratégie pour le milieu marin (DCSMM) — 2008/56/CE	L'objectif est de parvenir à un bon état écologique des eaux marines de l'UE, en mettant l'accent sur la protection de la biodiversité marine.	Concerne les usines situées à proximité des milieux marins ou effectuant des rejets dans ces milieux; stratégies requises pour protéger la biodiversité marine.
Directive sur les émissions industrielles (IED) — 2010/75/EU	Prévenir et réduire les émissions industrielles nocives, y compris la pollution de l'air, de l'eau et du sol.	Les grandes installations doivent utiliser les meilleures techniques disponibles (MTD) pour minimiser les émissions et l'impact sur l'environnement.
Directive Habitats — 92/43/CEE et directive Oiseaux — 2009/147/CE	Protège la biodiversité en préservant les habitats naturels ainsi que la faune et la flore sauvages dans l'UE.	Évaluation et atténuation des incidences sur les habitats et les espèces pour les projets réalisés dans des zones protégées ou à proximité de celles-ci.
Directive sur les énergies renouvelables — 2018/2001/EU	Fixe les règles permettant à l'UE d'atteindre son objectif de 32 % d'énergies renouvelables d'ici à 2030.	Encourage l'utilisation d'énergies renouvelables dans les processus de dessalement.
Directive relative au traitement des eaux urbaines résiduaires — 91/271/CEE	Se concentre sur la collecte, le traitement et le rejet des eaux usées urbaines et de certains secteurs industriels.	Les dispositions relatives à la qualité des eaux rejetées peuvent s'appliquer au traitement et à l'élimination des saumures.
Directive sur l'eau potable — 98/83/CE (révisée en 2020/2184)	Fixe des normes de qualité pour les eaux destinées à la consommation humaine.	L'eau potable produite doit répondre à des normes de qualité déterminées.

Tableau 1-Cadres réglementaires applicables aux activités de dessalement en Méditerranée.

²⁵ Le plan d'action de la Commission européenne pour une pollution zéro dans l'air, l'eau et les sols exige que le secteur du dessalement évalue l'utilisation de produits chimiques dans ses activités quotidiennes.

²⁶ Il ne reste plus que cinq pays à engager : Algérie, Bosnie-Herzégovine, Égypte, Liban et Libye.

Des études scientifiques²⁷ ont démontré que les AMP présentent des avantages importants, notamment une augmentation de la biomasse, de la taille et de la densité des espèces et de la biodiversité, et qu'elles doivent donc être préservées. Pour protéger efficacement la vie marine et tenir compte des effets cumulatifs, les politiques devraient englober le zonage de l'utilisation de la mer, les instruments économiques, le déploiement d'infrastructures stratégiques, la certification et les normes de durabilité. En outre, il convient d'assurer un suivi permanent des tendances et des évolutions émergentes en matière de politique et d'autres efforts mondiaux au niveau régional, afin de garantir une protection continue et durable.

b) Évaluation d'impact sur l'environnement (EIE) des projets de dessalement

La convention de Barcelone encourage les États membres à réaliser des évaluations d'impact sur l'environnement (EIE) pour les projets susceptibles d'avoir un impact sur le milieu marin. Ceci est particulièrement important pour les usines de dessalement en raison de leur impact potentiel sur les écosystèmes marins. Le processus d'EIE comporte généralement plusieurs étapes clés : la vérification préliminaire (déterminer si une EIE est nécessaire), la délimitation du champ d'application (identifier les questions clés à traiter), l'évaluation des impacts (étudier les incidences potentielles sur l'environnement) et l'atténuation (élaborer des stratégies pour éviter, réduire ou compenser les incidences négatives). Les résultats d'une EIE sont utilisés par les autorités gouvernementales pour prendre des décisions éclairées sur l'approbation, le rejet ou les modifications à apporter aux projets proposés.

L'obligation de produire une déclaration d'impact sur l'environnement (DIE)²⁸ dans le cadre du processus d'EIE, avant que le projet ne soit autorisé, est essentielle. Mettre l'accent sur l'évitement des impacts en tant que pierre angulaire de la hiérarchie des mesures d'atténuation pourrait réduire de manière significative les impacts sur la biodiversité des développements à grande échelle dans les secteurs de l'énergie, des infrastructures, de l'agriculture et d'autres secteurs. L'identification des incidences sur l'environnement devrait être un critère essentiel dans la sélection des sites, le choix des technologies et l'adoption de plans de gestion de l'environnement bien conçus. Ces plans évaluent l'efficacité des mesures visant à prévenir les incidences sur l'environnement. Une fois l'intégrité des écosystèmes marins et côtiers établie, les impacts environnementaux potentiels doivent être prévus sur la base d'observations documentaires, historiques et actuelles. L'objectif est de relier chaque habitat à sa fonction écologique au sein de l'écosystème côtier et de déterminer sa sensibilité aux usines de dessalement de l'eau de mer. La corrélation de ces analyses écologiques avec les caractéristiques des projets de dessalement de l'eau de mer (SWDP) — y compris les prises d'eau et les sorties, les techniques de dessalement et les variations d'activité — révélera les problèmes réels auxquels ces systèmes (côtiers, benthiques et pélagiques) peuvent être confrontés. Les autorités environnementales chargées de délivrer les déclarations et les autorisations doivent être indépendantes et dotées d'un personnel possédant des compétences

environnementales et technologiques adéquates, soutenues par une formation continue. Les organismes de réglementation environnementale devraient établir des normes qui contribuent à ces objectifs avant la conception de l'usine. Ce par le biais d'enquêtes environnementales et d'études d'impact rigoureuses. Des mécanismes et des programmes de surveillance primordiale des performances hydrauliques et environnementales devraient également être mis en œuvre.

Dans certains pays, les réglementations relatives aux ressources en eau classent les ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles comme des biens publics, soumis à des plans de gestion et à des autorisations ou des concessions. Cela inclut les eaux marines dans le cadre de la politique de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), comme en Espagne et dans d'autres pays européens. Les autorités responsables de l'eau, qu'il s'agisse d'initiatives et de projets financés par des fonds publics ou privés, sont les décideurs en matière de projets de dessalement.

Les réglementations relatives aux ressources en eau de certains pays définissent les ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles comme des biens publics. L'allocation et le prélèvement de ces ressources doivent être subordonnés à des plans de gestion et à une autorisation ou une concession. Cela signifie que les eaux souterraines saumâtres, ainsi que les eaux marines, doivent être incluses dans une politique de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), comme en Espagne et dans d'autres pays européens. Les autorités responsables de l'eau, qu'il s'agisse d'initiatives et de projets financés par des fonds publics ou privés, sont les décideurs en matière de projets de dessalement.

L'amélioration des processus d'évaluation et d'évitement des impacts, le renforcement des capacités et l'apport de connaissances techniques sont essentiels pour garantir une évaluation efficace des risques environnementaux des projets de dessalement. Les éléments et étapes essentiels de l'examen environnemental des nouveaux projets de dessalement sont les suivants :

- Sélection précoce du site sur la base d'études terrestres et marines approfondies.
- L'évaluation stratégique de l'impact sur le milieu marin et terrestre intégrée au projet.
- Une stratégie de compensation soigneusement conçue pour les impacts de l'empiètement et de l'entraînement.
- Mesures d'atténuation basées sur les seuils de salinité et de température pour des sites spécifiques de rejet de saumure.
- Les mesures d'atténuation peuvent impliquer des modifications de l'usine de dessalement elle-même (par exemple, un diffuseur au niveau du rejet de saumure) ou de la gestion de l'eau d'alimentation l 2.
- L'utilisation d'une approche de modélisation robuste pour identifier les effets cumulatifs.
- Une stratégie d'étude à long terme (au moins 15 ans), impliquant des conservatoires du littoral et associant des études socio-économiques et environnementales (par exemple, l'envasement, les modifications du littoral, les matières organiques en suspension, les interactions chimiques entre les systèmes de dessalement).

²⁷ Dasgupta, P. (2021), The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review « pour protéger 3 % des terres et des océans de la planète et gérer efficacement ces zones d'ici à 2030, il faudrait un investissement moyen de seulement 0,16 % du PIB mondial et moins d'un tiers des subventions publiques mondiales qui soutiennent actuellement des activités qui détruisent la nature »

²⁸ Voir le guide complet sur l'étude d'impact sur l'environnement, qui englobe l'environnement abiotique et biotique, ainsi que la santé publique et l'environnement socio-économique et culturel (PNUE 2008).

Après l'évaluation et la préparation du projet, les autorités environnementales doivent autoriser la mise en service et l'exploitation. La surveillance continue du projet est essentielle pour identifier les anomalies ou les imprévus par rapport aux impacts prévus et pour apporter les améliorations nécessaires afin d'atteindre les objectifs de protection de l'environnement énoncés dans la DIE.

Normes de santé et de sécurité dans la production d'eau dessalée

Les directives relatives à l'équilibre minéral de l'eau dessalée doivent spécifier des niveaux minimums de magnésium et de calcium pour prévenir la corrosion et la lixiviation des métaux, tout en fournissant des nutriments essentiels. Le contrôle de la qualité des additifs, les procédures relatives aux équipements de contrôle et les exigences en matière de surveillance nécessitent une conception et une supervision approfondies de la réglementation. Boire de l'eau contenant de faibles concentrations de certains minéraux, tels que le calcium, le magnésium, l'iode et le fluor, peut avoir des effets néfastes sur la santé. Par exemple, des études suggèrent un lien entre de faibles niveaux de magnésium dans l'eau potable et un risque accru de maladies cardiovasculaires. Il existe également un lien entre une faible teneur en calcium dans l'eau potable et un risque plus élevé de fractures osseuses chez les enfants, de certaines maladies neurologiques, de naissances prématurées, de faible poids à la naissance et de certains types de cancer²⁹. Les directives de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) relatives à la qualité de l'eau potable³⁰ peuvent ne pas être suffisantes pour prévenir les effets sur la santé des eaux dessalées. Les réglementations nationales relatives à l'eau potable, souvent basées sur les ressources conventionnelles en eau continentale, devraient être révisées pour inclure les ressources non conventionnelles telles que l'eau de mer dessalée. Par exemple, Israël a élaboré des lignes directrices spécifiques pour l'eau dessalée afin de compléter la réglementation générale sur l'eau potable. Les facteurs clés du processus de dessalement permettant d'atténuer les risques pour la santé sont les suivants :

- Élimination de la biomasse, du phytoplancton et du zooplancton
- Réduction de la concentration en bore en dessous des niveaux acceptables
- Élimination des contaminants, tels que les hydrocarbures solubles
- Prévention de la rétroaction des eaux usées urbaines voisines
- Utilisation d'additifs fonctionnels et nettoyage efficace des membranes
- Gestion des incidents opérationnels potentiels.

Un post-traitement est souvent nécessaire pour l'eau produite par les technologies d'osmose inverse en raison de l'absence de minéraux de base, qui sont ajoutés dans la phase finale. Une analyse complète des paramètres de qualité de l'eau potable doit être effectuée chaque année. Les pays qui utilisent le dessalement pour l'eau potable doivent introduire ou modifier des lignes directrices pour

répondre aux préoccupations sanitaires spécifiques de l'eau potable dessalée, applicables à toutes les échelles d'opérations.

Des lignes directrices spécifiques à chaque pays pourraient être basées sur les normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), avec des évaluations des risques pour identifier les paramètres de surveillance essentiels pour chaque usine, en tenant compte des caractéristiques locales et des risques (par exemple, déversement d'hydrocarbures, fréquence de la prolifération des algues, probabilité de contamination des sources d'eau par les eaux usées). La surveillance de certains paramètres, tels que la concentration résiduelle de désinfectant, la dureté de l'eau et les indicateurs de pathogènes (comme les entérocoques intestinaux), devrait être obligatoire, même pour les installations à petite échelle. Les procédures normalisées d'exploitation et de surveillance doivent inclure des paramètres d'essai et des valeurs de concentration issus d'une analyse fondée sur les risques. Dans la mer Rouge, par exemple, les scientifiques ont mis au point une surveillance par satellite couplée à une analyse physico-chimique de l'eau pour prévenir la prolifération des algues. En démontrant que l'augmentation de la température, de la salinité, du total des solides dissous et du pH due aux activités de dessalement peut favoriser la prolifération des algues³¹. Enfin, des risques sanitaires pourraient résulter de défaillances opérationnelles à court terme. Il est possible de garantir les niveaux de qualité d'eau les plus élevés grâce à de multiples barrières, à la surveillance et à la gestion des processus alignés dans le système et avec l'appui de surveillance de la qualité des sources d'eau, en particulier pour les eaux de mélange.

Stratégies pour un dessalement durable : Équilibrer les coûts, les performances et l'impact sur l'environnement

Le coût de l'eau dessalée dépend également des coûts d'investissement et d'exploitation. Chaque possibilité de réduire le CAPEX³² doit être identifiée. Aujourd'hui, pour les usines de taille moyenne, à l'exception de cas particuliers, l'investissement peut être aussi bas que 650 € par m³/j de capacités installées. La combinaison de la passation de marchés EPC (Engineer-Procure-Construct) et O&M (Opérations et Maintenance) devrait permettre de trouver la solution la plus compétitive et la plus avantageuse en ce qui concerne les interfaces, ainsi que le risque de lacunes, la formation et le transfert de connaissances sur les spécificités de l'usine. Le contrat avec les entrepreneurs EPC et O&M doit être basé sur les conditions de la FIDIC³³ pour les «projets de conception, de construction et d'exploitation». En cas de manque d'expérience locale en matière d'O&M pour les usines de dessalement, l'attribution d'un marché d'O&M externe peut garantir la disponibilité et l'implication immédiates d'un personnel expérimenté et faciliter la mise en œuvre du projet difficile. Le contrat de gestion peut également inclure une série complète de mesures de performance afin de garantir la disponibilité d'opérateurs qualifiés et de maintenir les compétences

²⁹ Organisation mondiale de la santé (2009). Calcium and magnesium in drinking water: Public health significance (Calcium et magnésium dans l'eau potable : Importance pour la santé publique.) http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/43836/1/9789241563550_eng.pdf (consulté en mai 2020).

³⁰ Directives de qualité pour l'eau potable (pour plus de détails sur les orientations de l'OMS en matière de surveillance, il convient de se reporter à la section 5 : Contrôle, surveillance et réglementation)

³¹ Mohamed N. Gomaa et al. (2018) « A review of harmful algal blooms (HABs) and their potential impacts on desalination facilities » (Examen des efflorescences algales nuisibles (HABs) et de leurs impacts potentiels sur les installations de dessalement)

³² Dépenses en capital : Fonds utilisés par une entreprise pour acquérir, mettre à niveau et entretenir des actifs physiques tels que des propriétés, des usines, des bâtiments, des technologies ou des équipements.

³³ Fédération internationale des Ingénieurs-Conseils (traduit en anglais par « International Federation of Consulting Engineers »). <https://www.fidic-for-practitioners.com/FIDIC-Conditions.html>

techniques du personnel d'exploitation tout au long de l'exploitation et de la maintenance. Il pourrait également s'agir d'un programme structuré de développement des compétences pour l'usine de dessalement. Les projets de dessalement réussis doivent se concentrer en permanence sur l'amélioration des compétences du personnel et l'adoption des meilleures technologies³⁴. La seule façon de réaliser des projets de dessalement durables est de mettre en place des plans de gestion des risques pour garantir l'approvisionnement en eau des générations actuelles et futures au coût financier, économique et environnemental le plus bas possible, afin d'assurer la création de valeur à long terme. Il faut donc appliquer des mesures d'adoption, de réduction et de compensation pendant les phases de conception, de construction et de production. Ces méthodes, intégrées tout au long des projets, peuvent prendre différentes formes, mais sont graduées. Elles vont de la protection des risques environnementaux pour les travailleurs à des plans adaptés pour la construction et l'exploitation d'usines (approvisionnement). Les méthodes de réduction permettent de recouper les points faibles et les points forts avec le plan de construction et l'activité végétale (par exemple, la transplantation et la réinstallation de la flore touchée, la gestion des matériaux d'excavation, etc.). Si ces mesures d'atténuation ne sont pas suffisantes, des mesures compensatoires sont recommandées, telles que la restauration des herbiers marins³⁵. En revanche, les seuils environnementaux doivent être mis en œuvre avec prudence. Il est inutile de fixer des seuils de prévention qui ne sont pas scientifiquement fondés. Ces restrictions inappropriées peuvent entraîner une augmentation des coûts énergétiques et économiques. L'obligation anciennement appliquée de diluer deux fois le volume rejeté en mer (même si les conditions environnementales ne permettent pas l'épandage du rejet) entraîne une surconsommation d'énergie qui peut être évitée¹⁷.

Priorité à la gestion durable de l'eau avant le recours au dessalement

Alors que la région méditerranéenne est confrontée à une augmentation de la demande en eau due à la croissance démographique, à l'élévation du niveau de vie et au changement climatique, les ressources en eau non conventionnelles telles que le dessalement deviennent des options viables. Toutefois, le dessalement ne doit être envisagé qu'après avoir épuisé les autres stratégies de gestion durable de l'eau. Le dessalement apparaît comme une option abordable, mais dans certains cas, les projets ont donné la priorité aux nouvelles demandes plutôt qu'à une approche intégrée et durable de la gestion générale des ressources. Pour éviter de tels scénarios³⁶, il est essentiel d'adopter une approche globale et durable de la planification et de l'évaluation des ressources en eau. Ce, en mettant l'accent sur l'anticipation des risques futurs, la compréhension des avantages et l'évaluation des incidences. Avant de procéder à des projets de dessalement, il est essentiel que tous les bassins démontrent qu'ils soient

prêts pour le dessalement³⁷. Cette préparation implique de disposer de données de qualité et d'analyses solides des besoins actuels et futurs du bassin bien avant le début du projet. Les évaluations préliminaires devraient porter sur la performance des réseaux de distribution, la croissance démographique et la pression exercée sur les ressources en eau continentales ayant un impact sur les écosystèmes aquatiques. Il est également important d'envisager d'autres méthodes de production d'eau potable, en prenant en compte les conséquences potentielles de l'absence de réponse au stress hydrique dans les communautés, ainsi que les aspects opérationnels à long terme tels que le transport de l'eau brute, le prétraitement, le post-traitement et le stockage des produits et des sous-produits. Si le dessalement peut fournir de l'eau propre, régénérer les aquifères côtiers et contribuer à la croissance économique, son intégration dans des plans plus larges de gestion des ressources en eau est essentielle. Cette intégration devrait se concentrer sur l'utilisation efficace de l'eau, la gestion de l'énergie et le maintien de l'intégrité du cycle de l'eau. Malgré les difficultés, telles que la longueur des procédures d'autorisation environnementale et les problèmes d'acceptation sociale, l'adaptation à des contextes socio-économiques et environnementaux spécifiques est essentielle pour développer des pratiques de dessalement durables à l'échelle mondiale.

Conclusion

Alors que la région méditerranéenne est confrontée aux défis croissants de la pénurie d'eau, le rôle du dessalement pour compléter l'approvisionnement en eau ne peut être surestimé. Cependant, comme le montre cette exploration du dessalement en Méditerranée, il est impératif d'aborder cette technologie dans une perspective équilibrée, en reconnaissant ses avantages potentiels tout en atténuant consciencieusement ses risques et ses impacts environnementaux. Si le dessalement peut constituer une solution viable pour répondre à l'augmentation de la demande en eau due à la croissance démographique, à l'élévation du niveau de vie et au changement climatique, il doit être considéré comme une mesure complémentaire plutôt que comme une solution autonome. Il faut continuer à donner la priorité aux pratiques de gestion durable de l'eau et n'envisager le dessalement qu'une fois que toutes les autres méthodes conventionnelles ont été étudiées et mises en œuvre de manière approfondie.

Les risques environnementaux associés au dessalement — de l'impact des rejets de saumure sur la salinité des côtes et les écosystèmes marins aux défis posés par les additifs chimiques et la pollution thermique — nécessitent des cadres réglementaires rigoureux, des évaluations complètes de l'impact sur l'environnement et l'adhésion aux lignes directrices internationales et aux bonnes pratiques. En outre, les normes de santé et de sécurité pour la production d'eau dessalée soulignent la nécessité d'un contrôle méticuleux et du respect de paramètres de qualité stricts pour préserver la santé publique.

³⁴ Chaque fois que des changements interviennent dans la gestion de l'eau, il convient d'accorder une attention particulière au renforcement des capacités et à la formation.

³⁵ Ivan Sola et al. (2021) "Evaluating environmental and socio-economic requirements for improving desalination development" in *Journal of Cleaner Production*, Vol. 324

³⁶ Dans lesquelles les collectivités n'ont pas encore maximisé leurs efforts pour réduire la consommation d'eau par habitant

³⁷ Voir le concept de « Desalination-readiness », selon lequel une ville ou un village élabore des plans pour construire une usine, mais ne les met en œuvre qu'en dernier recours en cas de grave sécheresse, voir N. Onishi, « Arid Australia Sips Seawater, but at a Cost », *The New York Times*, 10 juillet 2010

En outre, les aspects économiques et opérationnels du dessalement, notamment la rentabilité, l'efficacité des performances et la capacité technique, doivent faire l'objet d'une gestion stratégique. Ces efforts devraient être complétés par des plans de gestion des risques solides visant à garantir la création de valeur à long terme et la durabilité environnementale.

En conclusion, alors que les pays méditerranéens continuent d'explorer et d'investir dans le dessalement, il est crucial d'adopter une approche intégrée et holistique. Cette approche devrait s'aligner sur des objectifs plus larges de conservation de l'environnement, donner la priorité à l'intégrité du cycle de l'eau, et s'assurer de l'inclusion du dessalement dans les stratégies globales de gestion des ressources en eau. Ce n'est qu'en conciliant les besoins immédiats en eau douce et la durabilité à long terme des précieuses ressources en eau et des écosystèmes de la région que nous pourrions espérer parvenir à une coexistence harmonieuse entre le développement humain et la gestion de l'environnement.

Citation préférée : Plan Bleu (2023)
**"Dessalement en Méditerranée : Mise en place
de mesures visant à atténuer les risques et
impacts environnementaux"**

Note légale

Les désignations utilisées et la présentation du matériel dans ce document n'impliquent pas l'expression d'une quelconque opinion de la part du Plan Bleu ou du PNUE/PAM ou d'organisations, concernant le statut juridique de tout État, territoire, ville ou de ses autorités, ou concernant la délimitation de leurs frontières ou limites. Les opinions exprimées dans cette publication ne reflètent pas nécessairement les points de vue du Plan Bleu, du PNUE/PAM ou des organisations contributrices.

Copyright

Cette publication peut être reproduite en totalité ou en partie et sous quelque forme que ce soit à des fins éducatives et non lucratives, sans autorisation spéciale du détenteur des droits d'auteur, à condition de mentionner la source. Le Plan Bleu apprécierait de recevoir un exemplaire de toutes publications utilisant ce matériel comme source. Cette publication ne peut être utilisée à des fins de revente ou à toute autre fin commerciale sans l'autorisation écrite du Plan Bleu. © ANNEE 2024 Plan Bleu

BIBLIOGRAPHIE

- DesalData, 2021. Global Water Intelligence, Desalination Plants (Usines de dessalement). Desaldata. <https://www.desaldata.com>.
- Khordagui H. (2014). Perspectives en matière de dessalement dans la région méditerranéenne. Réunion d'un groupe d'experts sur les impacts environnementaux cumulés du dessalement en Méditerranée. Projet SWIM. Bruxelles.
- Khaled Elsaid et al. (2020) « Environmental impact of desalination technologies: A review » (Impact environnemental des technologies de dessalement : Une revue) dans Science of Total Environment ; 748:141528
- Mohamed N. Gomaa et al. (2018) « A review of harmful algal blooms (HABs) and their potential impacts on desalination facilities » (Examen des efflorescences algales nuisibles [HABs] et de leurs impacts potentiels sur les installations de dessalement)
- Huyen Trang Do Thi et al. (2021) « Comparison of Desalination Technologies Using Renewable Energy Sources with Life Cycle, PESTLE, and Multi-Criteria Decision Analyses » (Comparaison des technologies de dessalement utilisant des sources d'énergie renouvelables à l'aide d'analyses du cycle de vie, de PESTLE et de décisions multicritères) Water
- Caldera, U. & Breyer, C. (2020). « Strengthening the global water supply through a decarbonized global desalination sector and improved irrigation systems » (Renforcer l'approvisionnement mondial en eau grâce à un secteur mondial de dessalement décarbonisé et à des systèmes d'irrigation améliorés) dans Energy, Elsevier, vol. 200(C)
- Silvia Bianchelli et al. (2022) « Impact of hypersaline brines on benthic meio- and macrofaunal assemblages : A comparison from two desalination plants of the Mediterranean Sea » (Impact des saumures hypersalines sur les assemblages de la méio- et macrofaune benthique : Une comparaison entre deux usines de dessalement de la mer Méditerranée) in Desalination, Vol. 352
- The State of Desalination and Brine Production: A Global Outlook (L'état du dessalement et de la production de saumure : une perspective mondiale), Science of the Total Environment, Volume 657, March 2019, p. 1343-1356
- Omerspahic, M. et al. (2022) « Characteristics of Desalination Brine and Its Impacts on Marine Chemistry and Health, With emphasis on the Persian/Arabian Gulf : A Review » (Caractéristiques de la saumure de dessalement et son impact sur la chimie et la santé marines, en particulier dans le golfe Persique/Arabe : Un bilan)
- Yoana Del-Pilar-Ruso et al. (2014) « Benthic community recovery from brine impact after the implementation of mitigation measures » (Rétablissement de la communauté benthique après l'impact de la saumure après la mise en œuvre de mesures d'atténuation) in Water Research 70(2015), pp325-336
- Fernandez-Torquemada, et al., 2009 « Dispersion of brine discharge from seawater reverse osmosis desalination plants » (Dispersion de la saumure provenant des usines de dessalement par osmose inverse) — Perth Seawater Desalination Plant Water Quality Monitoring Programme, Rapport n° 445_001/3. Préparé par Oceanica Consulting Pty LTD pour la Water Corporation of Western Australia
- Silvia Bianchelli et al. (2022) « Impact of hypersaline brines on benthic meio- and macrofaunal assemblages : A comparison from two desalination plants of the Mediterranean Sea » (Impact des saumures hypersalines sur les assemblages de la méio- et macrofaune benthique : Une comparaison entre deux usines de dessalement de la mer Méditerranée) dans Desalination, Vol. 352
- Hila Frank et al. (2017) « Short-term effects of SWRO desalination brine on benthic heterotrophic microbial communities » (Effets à court terme de la saumure de dessalement SWRO sur les communautés microbiennes hétérotrophes benthiques) dans Desalination, vol. 417, pp 52-59
- Moslem Sharifinia et al. (2019) « Prevention is better than cure: Persian Gulf biodiversity vulnerability to the impacts of desalination plants » (Mieux vaut prévenir que guérir : Vulnérabilité de la biodiversité du golfe Persique aux impacts des usines de dessalement) dans Global Change Biology, Vol. 25, Issue 12
- Rubén Navarro Barrio et al. (2021) « Application of salinity thresholds in Spanish brine discharge regulations: energetic and environmental implications » (Application des seuils de salinité dans les réglementations espagnoles sur les rejets de saumure : Implications énergétiques et environnementales) dans Desalination 501
- S Sola et al, 2019 « Evaluating environmental requirements for the management of brine discharges in Spain » (Evaluation des exigences environnementales pour la gestion des rejets de saumure en Espagne) - Desalination 471, 114 132 et Sola, et al, 2020 « Sustainable desalination - Long-term monitoring of brine discharge in the marine environment » (Dessalement durable : Surveillance à long terme des rejets de saumure dans l'environnement marin) - Marine Pollution Bulletin, Volume 161, Part B, 2020, 111813
- Y. Y. Fernández-Torquemada et al, 2019 « Impact of brine on the marine environment and how it can be reduced » (Impact de la saumure sur l'environnement marin et moyens de le réduire) — Desalination and Water Treatment 167, 27-37, et Torquemada et al, 2008 « Salinity tolerance of the Mediterranean seagrass Posidonia oceanica : recommendations to minimize impact of brine discharges from desalination plants » (Tolérance à la salinité de l'herbier méditerranéen Posidonia oceanica : recommandations pour minimiser l'impact des rejets de saumure des usines de dessalement) — Desalination 221, 602-607
- Frank et al, 2019 « Chronic effects of brine discharge 469 from large-scale seawater reverse osmosis desalination facilities on benthic bacteria » (Effets chroniques des rejets de saumure 469 provenant d'installations de dessalement d'eau de mer par osmose inverse à grande échelle sur les bactéries benthiques). Water 470 Res. 151, 478-487
- Dasgupta, P. (2021), The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review « pour protéger 3 % des terres et des océans de la planète et gérer efficacement ces zones d'ici à 2030, il faudrait un investissement moyen de seulement 0,16 % du PIB mondial et moins d'un tiers des subventions publiques mondiales qui soutiennent actuellement des activités qui détruisent la nature »
- Organisation mondiale de la santé (2009). Calcium and magnesium in drinking water: Public health significance (Calcium et magnésium dans l'eau potable : Importance pour la santé publique.) http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/43836/1/9789241563550_eng.pdf (consulté en mai 2020).
- Mohamed N. Gomaa et al. (2018) « A review of harmful algal blooms (HABs) and their potential impacts on desalination facilities » (Examen des efflorescences algales nuisibles [HABs] et de leurs impacts potentiels sur les installations de dessalement)
- Fédération internationale des Ingénieurs-Conseils (traduit en anglais par « International Federation of Consulting Engineers »). <https://www.fidic-for-practitioners.com/FIDIC-Conditions.html>
- Ivan Sola et al. (2021) "Evaluating environmental and socio-economic requirements for improving desalination development" in Journal of Cleaner Production, Vol. 324