



NATIONS
UNIES

EP

UNEP/MED WG.540/5



**PROGRAMME DES NATIONS UNIES
POUR L'ENVIRONNEMENT
PLAN D'ACTION POUR LA MÉDITERRANÉE**

1^{er} novembre 2022
Original : anglais

Réunion régionale chargée d'examiner les lignes directrices sur les technologies disponibles de traitement des eaux usées urbaines et des boues, le prétraitement industriel, ainsi que sur les normes environnementales et les technologies disponibles de traitement du dessalement

Ankara, les 22 et 23 novembre 2022

Point 5 de l'ordre du jour : Normes régionales sur les technologies de dessalement

Lignes directrices sur les normes régionales de rejet des usines de dessalement et les systèmes d'aide à la décision pour les technologies de dessalement durable en Méditerranée

Pour des raisons environnementales et économiques, le tirage du présent document a été restreint. Les participants sont priés d'apporter leurs copies à la réunion et de ne pas demander de copies supplémentaires.

PNUE/PAM
Athènes, 2022

Note du Secrétariat

À la suite de l'adoption par la CdP 22 organisée à Antalya (Türkiye) du 7 au 10 décembre 2021 de la Décision IG.25/19 sur le Programme de travail et budget du PNUE/PAM, le Secrétariat/Programme MED POL a été prié, dans le cadre du produit 1.2, activité 1.2.3, de préparer des normes régionales sur les technologies de dessalement et les normes environnementales disponibles pour le rejet de saumure dans le milieu marin.

Auparavant, les Parties contractantes avaient adopté, dans la Décision IG.23/13 de la CdP 20, les « Lignes directrices actualisées sur la gestion des activités de dessalement ». Ces Lignes directrices ont permis de définir l'impact des activités de dessalement en mettant un accent particulier sur le milieu marin et de formuler des recommandations en vue d'atténuer ces impacts. Elles fournissaient des informations détaillées sur le processus d'évaluation de l'impact sur l'environnement ainsi que sur les exigences de surveillance à établir pendant la phase de construction et à long terme.

En comparaison, les Lignes directrices actuelles s'appuient sur la notion de dessalement durable en recommandant des technologies de dessalement éprouvées et en proposant des normes communes de rejet à établir, selon le besoin, au niveau régional. En outre, les présentes Lignes directrices fournissent un contexte plus large pour les trois aspects suivants :

- a. Les technologies de pointe disponibles pour le dessalement et leur mise en œuvre possible dans le contexte de solutions de dessalement durables.
- b. Les aspects réglementaires du dessalement de l'eau de mer, notamment la conformité avec les amendements aux annexes du Protocole « tellurique », les valeurs limites d'émission recommandées, ainsi que les conseils pour la mise en œuvre de programmes de surveillance régulière des rejets des usines de dessalement ; et
- c. Des recommandations sur les Systèmes d'aide à la décision (SAD) dans le but d'aider les décideurs ou les opérateurs d'installations à appliquer les meilleures technologies appropriées pour réaliser un dessalement durable en conformité avec les cadres juridiques et les réglementations tant au niveau national que régional.

Les aspects réglementaires du dessalement de l'eau de mer ainsi que les recommandations sur les SAD représentent de nouveaux aspects inclus pour la première fois dans les Lignes directrices pour la gestion des activités de dessalement et visent à renforcer le processus de prise de décision pour un dessalement durable à l'échelle régionale dans le cadre des normes adoptées.

Lors de la préparation des présentes Lignes directrices, la documentation scientifique sur le dessalement et le traitement des rejets des usines de dessalement a été examinée comme indiqué dans la section des références du présent rapport. Une attention particulière a été accordée à l'examen des rapports et des documents techniques actualisés préparés par des institutions scientifiques et des organisations internationales, notamment l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA) et l'Union européenne (UE), ainsi qu'à la prise en compte des initiatives mondiales et régionales récentes dans le domaine du dessalement.

Le présent document d'orientation est soumis à la Réunion régionale chargée d'examiner les lignes directrices sur les technologies disponibles de traitement des eaux usées urbaines et des boues, le prétraitement industriel, ainsi que sur les normes environnementales et les technologies disponibles de traitement du dessalement, afin de les soumettre à la Réunion des points focaux du MED POL prévue en mai 2023, pour approbation.

Table des matières

| | Pages |
|--|-------|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Dessalement de l'eau de mer : faits et chiffres..... | 1 |
| 3. Technologies de dessalement et leur mise en œuvre possible dans le contexte de solutions de dessalement durables..... | 3 |
| 3.1 Technologies courantes de dessalement..... | 3 |
| 3.2 Technologies nouvelles et émergentes de dessalement de l'eau de mer | 3 |
| 3.3 Facteurs contribuant au dessalement durable de l'eau de mer | 4 |
| 3.3.1 <i>Réduction des impacts environnementaux</i> | 4 |
| 3.3.2 <i>Gestion durable de la saumure : récupération de l'eau, de l'énergie et des minéraux</i> | 5 |
| 3.3.3 <i>Amélioration de l'efficacité énergétique</i> | 5 |
| 3.3.4 <i>Application des Meilleures technologies disponibles (MTD) et des Meilleures pratiques environnementales (MPE)</i> | 6 |
| 3.3.5 <i>Atteinte des Objectifs de développement durable</i> | 6 |
| 3.4 Piliers du dessalement durable de l'eau de mer | 7 |
| 3.4.1 <i>Viabilité environnementale</i> | 7 |
| 3.4.2 <i>Viabilité technico-économique du dessalement de l'eau de mer</i> | 7 |
| 3.4.3 <i>Viabilité sociale du dessalement de l'eau de mer</i> | 8 |
| 3.4.4 <i>Indicateurs de viabilité pour le dessalement de l'eau de mer</i> | 8 |
| 3.5 Outils technologiques pour le dessalement durable de l'eau de mer..... | 9 |
| 4. Aspects réglementaires du dessalement de l'eau de mer..... | 11 |
| 4.1 Valeurs limites d'émission (VLE) pour l'élimination de la saumure..... | 11 |
| 4.2 Surveillance de l'environnement..... | 12 |
| 5. Système d'aide à la décision pour la sélection de technologies pour les usines de dessalement .. | 12 |
| 5.1 Analyse multicritères (AMC) dans le dessalement de l'eau de mer | 13 |
| 5.1.1 <i>Analyse multicritères</i> | 13 |
| 5.1.2 <i>Méthodologie et procédure de l'AMC</i> | 13 |
| 5.1.3 <i>Modèles d'AMC</i> | 14 |
| 5.1.4 <i>Analyse de sensibilité</i> | 15 |
| 5.2 Analyse du cycle de vie du dessalement de l'eau de mer..... | 15 |
| 5.2.1 <i>Analyse du cycle de vie dans le contexte de prise de décision</i> | 14 |
| 5.2.1.1 <i>Définition et principes de l'ACV</i> | 16 |
| 5.2.1.2 <i>Limite du système de dessalement</i> | 16 |
| 5.2.1.3 <i>Évaluation de l'impact du dessalement</i> | 17 |
| 5.2.2 <i>Faisabilité de l'application de l'ACV au dessalement</i> | 18 |
| 5.2.3 <i>Fiabilité des résultats de l'ACV pour le dessalement</i> | 19 |
| 5.2.4 <i>Analyse de sensibilité et d'incertitude</i> | 19 |
| 5.2.5 <i>Défis et perspectives d'une ACV de la technologie de dessalement</i> | 20 |
| References | 21 |

Liste des abréviations et acronymes

| | |
|----------------|--|
| AD | Dessalement par adsorption |
| MTD | Meilleures techniques disponibles |
| MPE | Meilleures pratiques environnementales |
| BRO | Osmose inverse par lots |
| CDI | Désionisation capacitive |
| CHD | Dessalement par hydrate de clathrate |
| CdP | Conférence des Parties |
| SAD | Systèmes d'aide à la décision |
| ED | Électrodialyse |
| AEE | Agence européenne pour l'environnement |
| EIE | Évaluation de l'impact sur l'environnement |
| PSE | Plans de surveillance de l'environnement |
| UE | Union européenne |
| FD | Dessalement par congélation |
| FEI | Impact sur les écosystèmes d'eau douce |
| OD | Osmose directe |
| FWI | Impact du prélèvement d'eau douce |
| BEE | Bon état écologique |
| GES | Émission de gaz à effet de serre |
| GWI | Global Water Intelligence |
| HD | Humidification-déshumidification |
| IDA | Association internationale de dessalement |
| IMAP | Programme de surveillance et d'évaluation intégrées |
| LBS | Protocole relatif à la protection de la mer Méditerranée contre la pollution d'origine tellurique |
| ACV | Analyse du cycle de vie |
| ICV | Inventaire du cycle de vie |
| LCIA | Évaluation de l'impact du cycle de vie |
| LCSA | Évaluation du cycle de vie durable |
| CCV | Coût du cycle de vie |
| AMC | Analyse multicritères |
| MD | Distillation sur membrane |
| MED | Distillation à effets multiples |
| MSF | Distillation par détente à étages multiples |
| MED POL | Programme d'évaluation et de maîtrise de la pollution marine et côtière dans la région méditerranéenne |
| PRO | Osmose à pression retardée |
| OI | Osmose inverse |
| EI | Électrodialyse inverse |
| SCWD | Dessalement de l'eau supercritique |
| SED | Dessalement par extraction par solvant |
| ACVS | Analyse du cycle de vie sociale |
| STD | Dessalement solaire thermique |
| SW | Eau de mer |

PNUE/PAM

Programme des Nations Unies pour l'environnement / Plan d'action
pour la Méditerranée

DCE

Directive-cadre sur l'eau

ZRL

Zéro rejet liquide

1. Introduction

2. À leur 20^e Réunion ordinaire de la Convention pour la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée et ses Protocoles organisée à Tirana (Albanie) du 17 au 20 décembre 2017, les Parties contractantes ont adopté dans leur Décision IG.23/13 les « Lignes directrices actualisées sur la gestion des activités de dessalement ».

3. Les Lignes directrices actualisées de 2017 avaient pour objectif de mieux décrire les efforts autour de la Méditerranée en matière de dessalement et d'évaluer les impacts de celui-ci sur le milieu marin et côtier. Elles ont également servi à fournir des informations aux Parties contractantes sur la réalisation d'Évaluations de l'impact sur l'environnement (EIE) pour la mise en œuvre de projets de dessalement, en tenant compte des exigences en matière de surveillance environnementale.

4. Complétant les Lignes directrices de 2017, les présentes Lignes directrices fournissent les normes régaliennes pour les rejets des usines de dessalement et des systèmes d'aide à la décision pour les technologies de dessalement durables en Méditerranée. Les présentes Lignes directrices qui complètent les Lignes directrices de 2017 s'appuient sur les trois piliers suivants :

- a. Les technologies de pointe disponibles pour le dessalement et leur mise en œuvre possible dans le contexte de solutions de dessalement durables. Dans cette section, les concepteurs et les exploitants d'usines de dessalement reçoivent des informations sur les technologies émergentes en matière de dessalement de l'eau de mer, les facteurs qui contribuent au dessalement durable de l'eau de mer, les piliers du dessalement durable de l'eau de mer, ainsi que les outils technologiques pour le dessalement durable de l'eau de mer ;
- b. Les aspects réglementaires du dessalement de l'eau de mer, notamment la conformité avec les amendements aux annexes du Protocole « tellurique », les valeurs limites d'émission recommandées fondées sur les normes régionales en vigueur pour le dessalement de l'eau de mer, ainsi que des conseils pour la mise en œuvre de programmes de surveillance régulière des rejets des usines de dessalement ; et
- c. Des recommandations sur les Systèmes d'aide à la décision (SAD) fondées sur l'analyse multicritères (AMC) et l'analyse du cycle de vie (ACV) dans le but d'aider les décideurs ou les opérateurs d'installations à appliquer les meilleures technologies appropriées pour réaliser un dessalement durable en conformité avec les cadres juridiques et les réglementations tant au niveau national que régional.

2. Dessalement de l'eau de mer : faits et chiffres

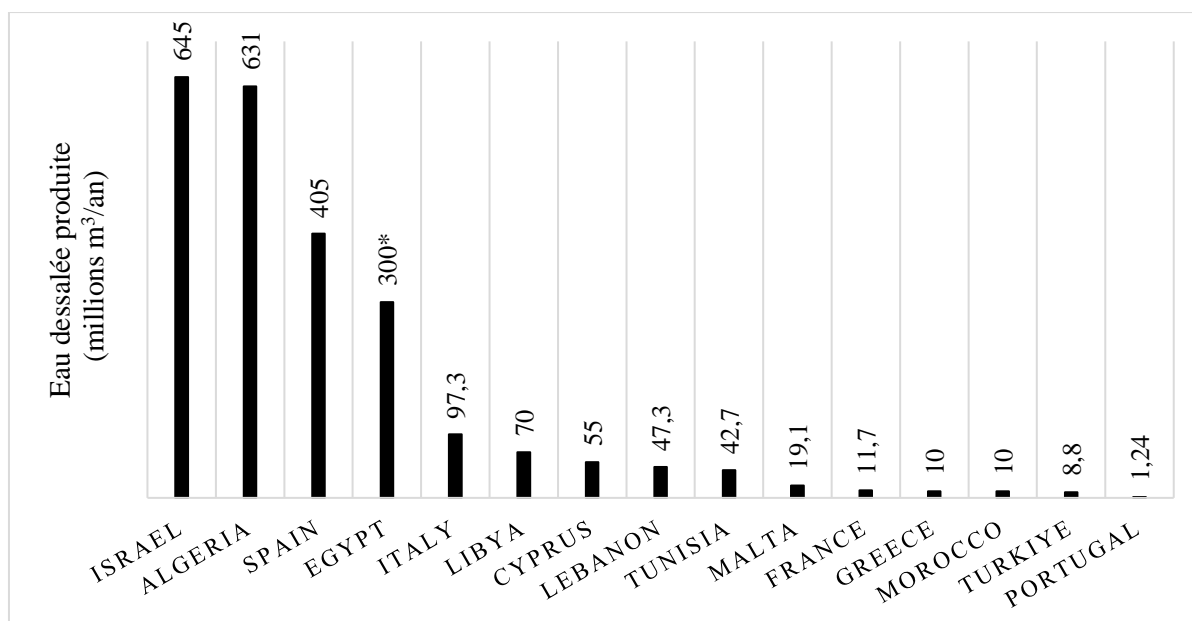
5. Le dessalement peut être divisé en deux catégories selon la source d'eau d'alimentation : le dessalement de l'eau de mer et le dessalement de l'eau saumâtre. Il existe 15 906 usines de dessalement en activité dans le monde, avec une capacité totale de dessalement d'environ 95,37 millions de m³/jour (34,81 milliards de m³/an), ce qui représente respectivement 81 % et 93 % du nombre total et de la capacité des usines de dessalement jamais construites (Jones et al., 2019). Le dessalement de l'eau de mer représente environ 61 % des 5 328 usines de dessalement en termes de capacité et de nombre d'usines. Les eaux saumâtres et dures des cours d'eau représentent 8 % des 1 825 usines, tandis que le dessalement de l'eau saumâtre représente 21 % des 5 960 usines (Elsaid, Kamil, et al., 2020). Le présent document est un guide complet sur le processus de dessalement de l'eau de mer.

6. Bien que le dessalement de l'eau saumâtre, de l'eau fluviale, des eaux usées et de l'eau salée ait produit respectivement plus de 15,4 millions, 6,5 millions, 4,4 millions et 110 501 m³/an d'eau douce, le dessalement de l'eau de mer reste la méthode la plus utilisée dans le monde et a produit plus de 43,2 millions de m³/an en 2018 (GWI, 2018). Depuis 2010, la capacité de dessalement installée dans le monde n'a cessé de croître à un rythme d'environ 7 % par an jusqu'à fin 2019, ce qui équivaut à un ajout annuel moyen d'environ 4,6 millions de m³/jour de capacité de production. Au total, 155 nouvelles usines de dessalement ont fait l'objet de contrats et ont été mises en service dans le

monde rien qu'entre janvier 2019 et février 2020, ajoutant 5,2 millions de m³/jour à la capacité installée (Eke et al., 2020).

7. Depuis juillet 2016, 18 983 usines et projets dans le monde ont une capacité cumulée de dessalement pour la production d'eau douce de 95,6 millions de m³/jour. Fin 2017, la capacité opérationnelle globale des usines installées était estimée à 93 % de la capacité installée, avec une capacité cumulée de dessalement de 99,8 millions de m³/jour (en prenant en compte les usines achevées depuis 1965). Les capacités mondiales de dessalement installées et cumulées pour la production d'eau douce à la mi-février 2020 étaient fournies par 20 971 projets, et elles étaient respectivement de 97,2 millions de m³/jour et de 114,9 millions de m³/jour. Parmi ces 20 971 projets, on comptait 16 876 usines installées (Eke et al., 2020).

8. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2019) fournit l'étude la plus récente et la plus complète sur la capacité de dessalement dans la région méditerranéenne, comme le montre la figure 1 (à l'exception de l'Égypte, où la quantité d'eau dessalée provient d'une étude d'Elsaie et al. 2022).



* Les données pour l'Égypte proviennent d'une étude réalisée par Elsaie et al. 2022

Figure 1. Production d'eau dessalée en Méditerranée (FAO, 2019)

9. Un coup d'œil rapide sur l'état du dessalement dans la région méditerranéenne montre qu'Israël, l'Algérie, l'Espagne et l'Égypte en sont les principaux producteurs d'eau dessalée. La capacité annuelle de dessalement d'Israël représente environ 80 % de la consommation totale d'eau en milieu urbain (Miller et al., 2015). En Algérie et au Maroc, respectivement 85 % et 60 % des usines de dessalement utilisent l'eau de mer comme source d'eau d'alimentation (Dhakal et al., 2022). L'Espagne possède les plus importantes usines de dessalement d'Europe, situées à Torrevieja dans la province d'Alicante, dans la région de Valence et à El Prat dans la zone métropolitaine de Barcelone, qui est l'une des zones les plus peuplées d'Espagne (Morote et al., 2017). En Libye, la technologie du dessalement est utilisée depuis le début des années 1960, même si peu d'usines de dessalement ont été créées depuis. Au total, la Libye compte actuellement environ 21 usines de dessalement opérationnelles dans lesquelles les procédés thermiques représentent environ 95 % de la capacité de production tandis que la technologie membranaire d'osmose inverse représente 5 % (Brika, 2018). En Égypte, plus de 90 usines de dessalement d'eau de mer sont opérationnelles (Elsaie et al., 2022). À Malte, l'eau dessalée constitue jusqu'à 60 % de l'approvisionnement en eau potable.

3. Technologies de dessalement et leur mise en œuvre possible dans le contexte de solutions de dessalement durables

10. Dans cette section, les technologies de pointe disponibles en matière de dessalement, en particulier les technologies nouvelles et émergentes de dessalement de l'eau de mer, sont présentées dans le but d'explorer leur mise en œuvre possible dans le contexte du dessalement durable. Dans cette optique, sont évoqués les facteurs qui contribuent au dessalement durable de l'eau de mer, les trois piliers du dessalement durable de l'eau de mer, les indicateurs de viabilité pour le dessalement de l'eau de mer, ainsi que les outils technologiques pour le dessalement durable de l'eau de mer.

3.1 Technologies courantes de dessalement

11. Les « Lignes directrices actualisées sur la gestion des activités de dessalement » (2017) donnent un aperçu des technologies de dessalement thermiques et membranaires les plus courantes, notamment la distillation par détente à étages multiples (MSF), la distillation à effets multiples (MED), ainsi que l'osmose inverse (OI) et l'électrodialyse (ED).

12. L'osmose inverse (OI) est de loin la technologie de dessalement la plus dominante. Au niveau mondial, elle représente 84 % du nombre total d'usines de dessalement opérationnelles et produit 69 % (65,5 millions de m³/jour) du total mondial d'eau dessalée. Malgré leur petit nombre, les deux principales technologies thermiques, à savoir la distillation par détente à étages multiples (MSF) et la distillation à effets multiples (MED), produisent la majorité de l'eau dessalée restante, avec respectivement des parts de marché de 18 % et 7 % (Jones et al., 2019).

13. Il convient de noter que des technologies hybrides telles que MSF-MED, MED-adsorption (MED-AD) et OI-MSF sont actuellement envisagées pour améliorer l'efficacité des usines de dessalement en combinant les avantages de chaque technologie en vue de compenser les faiblesses des autres.

3.2 Technologies nouvelles et émergentes de dessalement de l'eau de mer

14. L'intérêt pour les technologies émergentes s'est accru en raison de la demande croissante de dessalement et des problèmes de consommation d'énergie élevée, d'encrassement et de rejet de saumure que posent les technologies existantes. Afin de surmonter les difficultés actuelles des technologies OI, MED et MSF, l'accent a été mis sur l'élaboration de procédés à faible consommation d'énergie. Les technologies de dessalement émergentes peuvent concurrencer les technologies conventionnelles pour le dessalement de l'eau de mer et même les surpasser dans certains créneaux ; cependant, leur transition vers une utilisation à grande échelle dépend de nouvelles avancées scientifiques pour atteindre un seuil de performance et d'efficacité énergétique (Ahmed et al., 2021).

15. La distillation sur membrane (MD), l'osmose directe (OD), le dessalement par adsorption (AD), la désionisation capacitive (CDI), le dessalement par congélation (FD), l'humidification-déshumidification (HD), le dessalement par hydrate de clathrate (CHD) et l'osmose inverse par lots (BRO), le dessalement solaire thermique (STD), le dessalement par extraction par solvant (SED), ainsi que le dessalement de l'eau supercritique (SCWD) sont plusieurs technologies de dessalement émergentes qui en sont encore largement au stade de la recherche et du développement. Une description détaillée des technologies émergentes susmentionnées est présentée dans l'annexe I.

16. Les technologies de prétraitement, telles que l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF), la filtration ionique (IF) et le zéro rejet liquide (ZRL) ont également été explorées afin d'augmenter l'efficacité des usines de dessalement (Eke et al., 2020; Park et al., 2022).

17. En outre, les systèmes hybrides qui combinent diverses sources d'énergie et des technologies de dessalement semblent offrir les solutions les plus prometteuses. Les systèmes hybrides innovants fonctionnant à l'énergie solaire (ou éolienne), associés à des processus de dessalement très efficaces, sont prometteurs dans des endroits où la pénurie d'eau augmente et où le rayonnement solaire est élevé. Par ailleurs, des recherches sont menées dans le monde entier pour accroître l'efficacité des procédés de dessalement couramment utilisés (tels que l'osmose inverse) et pour trouver de nouvelles

solutions, telles que les batteries de dessalement métal-air et le dessalement par hydrate de gaz, ainsi que de nouveaux matériaux, parmi lesquels l'impression 3D pour la séparation des membranes, les nanotubes de carbone, la distillation par contact direct à l'aide de membranes composites à fibres creuses de type Janus, les membranes en graphène monocouche et les membranes nanofibreuses (Bundschuh et al., 2021).

18. L'élimination de la saumure dans le dessalement de l'eau de mer est une question très importante en raison de ses impacts environnementaux négatifs. Par conséquent, une approche alternative et plus durable pour atténuer les effets du rejet de la saumure a été étudiée. Cette méthode est appelée le zéro rejet liquide (ZRL). Des informations plus détaillées sur l'approche ZRL sont également fournies à l'annexe I.

3.3 Facteurs contribuant au dessalement durable de l'eau de mer

3.3.1 *Réduction des impacts environnementaux*

19. La majorité des impacts environnementaux du dessalement de l'eau de mer sont attribués aux rejets de saumure, qui peuvent dégrader la qualité des eaux côtières et nuire à la vie marine (Heck et al., 2018; Panagopoulos et al., 2019). Cependant, la collision et l'entraînement pendant la prise d'eau de mer, les effets des rejets de saumure et de produits chimiques, les changements de la qualité de l'eau de mer, les effets néfastes sur les ressources halieutiques, la dégradation des habitats marins en raison des concentrations de saumure toxique, les émissions de polluants atmosphériques attribuées à la demande énergétique des processus sont les principaux impacts environnementaux des processus de dessalement de l'eau de mer (Elsaid, Kamil, et al., 2020). En plus de susciter un certain nombre de préoccupations environnementales, l'industrie du dessalement de l'eau de mer offre un grand potentiel d'utilisation de la saumure pour produire certaines ressources précieuses en tant que sous-produit (Mavukkandy et al., 2019). À la lumière de la croissance rapide attendue de l'industrie du dessalement, la composition chimique de la saumure indique qu'elle pourrait présenter des avantages tant économiques qu'écologiques (Ayaz et al., 2022).

20. Les impacts environnementaux significatifs du dessalement de l'eau de mer sont associés à la prise d'eau de mer, au rejet de la saumure ainsi qu'aux contaminants émergents libérés pendant le processus de dessalement. Ces impacts sont abordés dans les « Lignes directrices actualisées sur la gestion des activités de dessalement » (2017). Dans les lignes directrices actuelles, des recommandations sont formulées pour réduire les impacts des aspects susmentionnés dans le but de parvenir à un dessalement durable de l'eau de mer :

21. En ce qui concerne la prise d'eau de mer (Kress 2019), et en tenant compte de la nature de l'environnement local au niveau de la zone de prise d'eau, de la capacité de prise d'eau, du type et de la structure de prise d'eau, les recommandations suivantes peuvent être prises compte :

- a. Installer la structure de prise d'eau dans des zones d'eaux profondes et de moindre productivité biologique ;
- b. Installer des mécanismes de dérivation pour permettre le retour des organismes qui ont été emportés dans la zone de prise d'eau ;
- c. Réduire la vitesse du débit de l'effluent ; on suggère 0,15 m/s pour que les poissons puissent résister à la collision ;
- d. Installer des barrières comportementales, comme des bouchons de vitesse horizontaux qui offrent moins de collision que les bouchons de vitesse verticaux, et des équipements sonores et générateurs de lumière pour maintenir les organismes à l'extérieur ;
- e. Positionner la prise d'eau dans une région active au niveau hydrologique où les courants et les vagues sont forts ;
- f. Réduire au minimum la surexploitation et le drainage de l'eau douce du réservoir souterrain ;
- g. Planifier et positionner de manière appropriée le bassin de prise d'eau et d'évacuation ;
- h. Utiliser des matériaux de haute qualité, résistants à la corrosion et à l'érosion ;

i. Appliquer une maintenance appropriée et périodique.

22. En ce qui concerne le rejet de la saumure (Elsaid, Sayed, et al., 2020), et compte tenu des divers produits chimiques et des différents coagulants utilisés, ainsi que des procédés de dessalement thermique, les recommandations suivantes peuvent être prises en compte :

- a. Utiliser des sels de fer plutôt que des sels d'aluminium, car ils sont moins toxiques ;
- b. Optimiser le dosage des coagulants et des flocculants ;
- c. Utiliser des produits chimiques verts biodégradables ;
- d. Appliquer la prédilution avec les eaux usées et l'eau de refroidissement pour la saumure à partir de processus de dessalement thermique ;
- e. Procéder à un traitement de la saumure pour éliminer les composants toxiques.

23. Il convient de noter qu'une conception adéquate de l'usine peut réduire de manière significative le piégeage des organismes marins au niveau de la prise d'eau et permettre une dilution rapide de la saumure rejetée à l'émissaire, réduisant ainsi les impacts environnementaux d'une seule usine de dessalement sur l'écosystème marin local. Cependant, plusieurs usines de dessalement qui procèdent à des rejets dans une seule masse d'eau à circulation limitée augmenteront la salinité de la masse d'eau en raison de l'effet cumulatif de ses usines ; ainsi, les mers semi-fermées, telles que la mer Méditerranée, seront plus sensibles à l'augmentation des niveaux de sel (Gies, 2019).

3.3.2 *Gestion durable de la saumure : récupération de l'eau, de l'énergie et des minéraux*

24. Il est actuellement essentiel d'utiliser une stratégie différente de gestion de la saumure, car les stratégies d'élimination de la saumure, qui étaient autrefois largement utilisées dans la gestion de la saumure, ont récemment été considérées comme non durables (Alvarado-Revilla, 2015). Il est notamment nécessaire d'élaborer une stratégie permettant de diminuer le volume de la saumure tout en récupérant des ressources précieuses, notamment l'eau, les minéraux, les sels, les métaux et même l'énergie.

25. Les méthodes de récupération des minéraux peuvent être classées en quatre groupes en fonction de la force motrice utilisée : 1) les procédés sous pression comme la NF et l'OI, 2) les procédés thermiques comme l'évaporation et la distillation sur membrane (MD), 3) les procédés à potentiel électrochimique et 4) les procédés physico-chimiques comme l'adsorption, l'échange d'ions, etc. Actuellement, l'extraction des quatre métaux ayant les concentrations les plus élevées (Na, Mg, Ca et K) dans la saumure prend la forme de Cl^- et de SO_4^{2-} . En outre, des éléments mineurs, notamment Li, U, Sr, Ru et Rb, ont été spécifiquement isolés du concentré de dessalement de l'eau de mer.

26. La récupération de l'énergie (également connue sous le nom d'« énergie bleue » et d'« énergie des gradients de salinité ») a également attiré l'attention récemment, en plus de la récupération de l'eau, des métaux et des minéraux à partir du flux de saumure provenant des processus de dessalement de l'eau de mer. L'intérêt pour les technologies de récupération de l'énergie basées sur le gradient de salinité à partir du concentré d'usines SWRO par un système de récupération de l'énergie n'a cessé de croître ces dernières années comme moyen de réduire au minimum la consommation d'énergie et de maximiser les avantages de la saumure du dessalement de l'eau de mer. On estime que la consommation totale d'énergie des quelque 308 millions de kWh/jour des usines de type SWRO, dont la technique est largement utilisée dans le monde, peut être récupérée à hauteur de 40,7 millions de kWh/jour (Wan & Chung, 2016).

3.3.3 *Amélioration de l'efficacité énergétique*

27. L'amélioration de l'efficacité énergétique des technologies actuelles de dessalement et l'élaboration de nouvelles approches pour le dessalement de l'eau de mer sont essentielles pour la viabilité du secteur du dessalement. L'une des stratégies les plus essentielles pour réduire la consommation d'énergie consiste à améliorer l'efficacité du processus lui-même. De plus, le dessalement de l'eau de mer a un potentiel important pour diminuer de manière significative sa

contribution à la pollution en réduisant au minimum sa dépendance aux combustibles fossiles conventionnels (Ayaz et al., 2022). On estime que l'utilisation de sources d'énergie renouvelables permettrait d'éviter jusqu'à 99 % du dioxyde de carbone produit par les procédures de dessalement (Elmaadawy et al., 2020). À l'échelle mondiale, de nombreuses usines de dessalement de petite ou moyenne taille ont été construites et sont entièrement alimentées par des sources d'énergie renouvelables. Toutefois, la capacité de ces usines de dessalement est insignifiante par rapport à la production mondiale totale. Bien que l'Alliance mondiale pour le dessalement propre (GCWDA) ait fixé à 20 % l'objectif du niveau d'alimentation par des sources renouvelables pour toutes les nouvelles usines de dessalement construites entre 2020 et 2025, la part globale actuelle des énergies renouvelables utilisées pour les opérations de dessalement est inférieure à 1 % (Ayaz et al., 2022). Actuellement, l'énergie solaire photovoltaïque représente 43 % des principales sources renouvelables utilisées pour le dessalement, suivie par l'énergie solaire thermique (27 %) et l'énergie éolienne avec 20 % (Khan et al., 2018).

3.3.4 *Application des Meilleures technologies disponibles (MTD) et des Meilleures pratiques environnementales (MPE)*

28. Les critères de définition des meilleures techniques disponibles (MTD) et des meilleures pratiques environnementales (MPE) sont spécifiés à l'annexe III du Protocole « tellurique » tel qu'amendé en 2021. La priorité des industries et des groupes de substances énumérés à l'annexe I pour les mesures préventives générales relatives à l'utilisation des MTD et à la mise en œuvre des MPE est également soulignée à l'annexe III du Protocole « tellurique » tel qu'amendé en 2021.

29. Le Protocole « tellurique » tel qu'amendé en 2021 met l'accent sur la prévention ou la réduction au minimum des impacts environnementaux à tous les stades du cycle de vie d'un produit, sur la maximisation de la valeur des produits, des matériaux et des ressources dans l'économie, et sur la réduction au minimum de la production de déchets. Cet aspect est également applicable aux usines de dessalement. En ce qui concerne la détermination des MTD, en général ou dans des cas particuliers, le Protocole « tellurique » amendé de 2021 prend note des considérations spéciales suivantes qui sont également applicables aux usines de dessalement. Ce sont :

- a. les dates de mise en service des installations nouvelles ou existantes ;
- b. la consommation et la nature des matières premières utilisées dans le procédé et son efficacité énergétique ;
- c. la nécessité de prévenir ou de réduire l'impact global des rejets dans l'environnement et les risques pour celui-ci ;
- d. la nécessité de prévenir les accidents et de minimiser leurs conséquences pour l'environnement ;
- e. la nécessité d'assurer la santé et la sécurité au travail sur les lieux de travail ;
- f. la nécessité d'utiliser des substances non toxiques en vue de faciliter les flux de déchets non toxiques afin de rendre la récupération et le recyclage plus faciles ; et
- g. la nécessité de conserver le matériel et les produits en service le plus longtemps possible.

30. En ce qui concerne la sélection des MPE pour les cas individuels, le Protocole « tellurique » amendé de 2021 encourage l'utilisation d'écolabels, de l'éco-conception et de l'éco-innovation pour identifier les produits respectueux de l'environnement et l'établissement d'une collaboration le long de la chaîne de valeur pour garantir que l'origine et la valeur des matières premières restent traçables lorsque la fermeture de la boucle est ajoutée comme aspect. La mise en œuvre des MPE susmentionnées est essentielle pour l'exploitation durable des usines de dessalement.

3.3.5 *Atteinte des Objectifs de développement durable*

31. Le dessalement contribue directement à l'atteinte de l'ODD 6 (accès à l'eau potable) ainsi qu'à l'adaptation au changement climatique (ODD 13). Le dessalement offre de l'eau potable dans les zones soumises à un stress hydrique, ce qui est une condition préalable au développement socioéconomique, à l'activité industrielle et à la production agricole. En outre, la construction de

nouvelles capacités de dessalement peut réduire la demande sur les sources d'eau conventionnelles telles que les aquifères souterrains, les lacs et les rivières. Par ailleurs, le dessalement peut également contribuer à l'adaptation au changement climatique pour les raisons mentionnées ci-dessus (NATIXIS, 2020).

32. De plus, le dessalement offre divers avantages connexes, contribuant indirectement à l'atteinte de plusieurs autres ODD. Les usines de dessalement peuvent être construites de manière à avoir un parc éolien ou une centrale solaire adjacents, ce qui contribuera à accroître l'utilisation d'énergies propres (ODD 7). Lorsqu'il est alimenté par une énergie propre, le dessalement peut conduire à des villes et communautés plus durables (ODD 11) dans les régions concernées en fournissant un approvisionnement fiable en eau potable. En outre, un soutien à long terme de politiques pour le dessalement peut également encourager l'innovation et aider à l'émergence d'acteurs industriels locaux, ce qui contribuera à la croissance économique (ODD 8), ainsi qu'au développement industriel, à l'innovation technologique et à la construction d'infrastructures (ODD 9) (NATIXIS, 2020).

3.4 Piliers du dessalement durable de l'eau de mer

33. Les trois piliers du développement durable sont abordés dans cette section dans le but de fournir des orientations sur la réalisation de solutions de dessalement durables. Il s'agit de : i) la viabilité environnementale ; ii) la viabilité technico-économique ; et iii) la viabilité sociale.

3.4.1 *Viabilité environnementale*

34. Ces dernières années, le dessalement de l'eau de mer a gagné en importance en raison de l'aggravation des problèmes environnementaux mondiaux tels que le changement climatique et la sécheresse. En revanche, les techniques traditionnelles de dessalement augmentent les émissions de gaz à effet de serre (GES), car elles dépendent fortement des combustibles fossiles (dans certains cas, du fioul lourd), qui libèrent du dioxyde de carbone. La quantité moyenne de combustible fossile nécessaire pour produire 1 000 m³ (ou 1 million de litres) d'eau par jour en utilisant le dessalement thermique est d'environ 10 000 tonnes par an (Tal, 2018). Même avec une osmose inverse économe en énergie, le dessalement de chaque 1 000 m³ d'eau salée entraîne le rejet potentiel de 0,4 à 6,7 tonnes de CO₂, en fonction de la taille de l'usine et d'autres processus opérationnels (Cornejo et al., 2014). En 2020, selon les estimations, les émissions mondiales de CO₂ des usines de dessalement alimentées par des combustibles fossiles devaient atteindre 76 millions de tonnes. En outre, en supposant que les opérations se poursuivent dans les conditions actuelles, la quantité de CO₂ pourrait atteindre 218 millions de tonnes d'ici 2040 (Ayaz et al., 2022). Les usines de dessalement de l'eau de mer doivent donc utiliser des sources d'énergie renouvelables pour réduire leur impact sur l'environnement.

35. Par conséquent, les principaux problèmes de viabilité du dessalement, tels que les émissions de GES et la consommation d'énergie, doivent être pris en compte dans des limites temporelles et spatiales appropriées. La planification, la conception, la construction, la mise en service, l'exploitation et le déclassement sont toutes des activités directement liées dont il faut tenir compte, de même que les activités indirectes telles que les effets des services publics et des systèmes de service utilisés, l'énergie intrinsèque des matériaux associés, les émissions et les impacts.

3.4.2 *Viabilité technico-économique du dessalement de l'eau de mer*

36. Les principales préoccupations concernant la viabilité technico-économique du dessalement de l'eau de mer sont le coût global non subventionné de l'eau dessalée, la couverture du coût croissant des autorisations (qui peuvent représenter 60 % d'un grand projet) et des produits chimiques autorisés (Lior, 2017). Une variété de facteurs contractuels, managériaux et technologiques affectent les coûts de production de l'eau par le dessalement de l'eau de mer. Outre les connaissances techniques, le succès des projets de dessalement nécessite une sélection optimale du financement, du partage des risques et des dispositions contractuelles pour la durée de vie opérationnelle du projet. En raison des besoins énergétiques élevés du dessalement et de la complexité de la conception, du financement, de la construction et de l'exploitation des infrastructures de dessalement, les coûts de l'eau dessalée restent plus élevés que ceux des sources d'eau potable conventionnelles. Toutefois, le dessalement doit être

utilisé de manière stratégique lorsque les solutions conventionnelles aux problèmes d'eau sont insuffisantes (NATIXIS, 2020).

3.4.3 Viabilité sociale du dessalement de l'eau de mer

37. Le pilier social du dessalement de l'eau de mer couvre principalement les impacts sur la santé, les développements, la croissance locale et l'agrément visuel (Lior, 2017). Pour être socialement viable, le dessalement doit être approuvé par la communauté, répondre à ses besoins en eau et être exploité et géré selon les capacités de la communauté (Werner & Schäfer, 2007). Cependant, les perceptions du public à l'égard des usines de dessalement ne sont pas figées, et les indicateurs statistiquement prouvés peuvent changer au fil du temps. En outre, le soutien du public peut changer entre les périodes d'approvisionnement adéquat en eau et les périodes de sécheresse. Le soutien du public peut diminuer après que la menace perçue pour l'approvisionnement local en eau commence à s'estomper, car elle semble être un indicateur important du soutien (Haddad et al., 2018).

3.4.4 Indicateurs de viabilité pour le dessalement de l'eau de mer

38. Pour une évaluation complète de la viabilité environnementale, techno-économique et sociale du dessalement de l'eau de mer, les indicateurs et aspects suivants, énumérés dans le tableau 1, sont recommandés.

Tableau 1 : Aspects et indicateurs de viabilité environnementale, techno-économique et sociale pour l'évaluation du dessalement de l'eau de mer (Lior 2017)

| Indicateurs de viabilité environnementale | Indicateurs de viabilité technico-économique | Indicateurs de viabilité sociale |
|--|--|--|
| a) Conservation de l'eau | a) Coût de l'eau | a) Santé et assainissement, p. ex., indices des populations susceptibles d'être affectées par le projet ; la qualité de l'eau du produit doit garantir que les niveaux d'ingrédients malsains sont réduits au minimum. |
| b) Planification et utilisation des ressources en eau, alternatives d'approvisionnement en eau | b) Accessibilité financière | b) Qualité de vie |
| c) Indices d'impact sur les ressources en eau : indice d'impact sur l'eau, indice d'Impact sur les écosystèmes d'eau douce (FEI), indice d'Impact du prélèvement d'eau douce (FWI), empreinte hydrique | c) Politique de tarification | c) Emploi effectif et équitable, local et régional |
| d) Empreinte carbone | d) Coût d'investissement (y compris les incitations financières éventuelles) | d) Impact sur l'alimentation (coût, disponibilité, qualité) |
| e) Impacts des déchets de construction et des excédents de terre | e) Coût d'exploitation (y compris les taxes, les assurances, les garanties) | e) Éducation et formation |
| f) Pollution des sols et des eaux souterraines (combustibles, hydrocarbures, etc.) | f) Impact sur l'économie ; croissance et développement économiques | f) Empreinte territoriale |
| g) Pollution atmosphérique (émission fugitive de poussière) | g) Conflits commerciaux (p. ex., utilisation et valeurs des terres immédiates et environnantes, navigation sur l'eau, accès aux ports, pêche commerciale, aquaculture) | g) Utilisation actuelle des terres et activités de développement prévues |
| h) Émission sonore | h) Exigences de prétraitement et de post-traitement | h) Agrément visuel |
| i) Dommages aux antiquités et au patrimoine | i) Fiabilité de la production | i) Sécurité de l'eau équitable pour tous |
| j) Altération des fonds marins | j) Distribution de l'eau | j) Pauvreté |
| k) Remise en suspension de sédiments (impacts sur la qualité des eaux marines et sur l'écologie) | k) Alternatives d'approvisionnement en eau | k) Relations transfrontalières |
| l) Pollution par les hydrocarbures | l) Conservation de l'eau | l) Effets de la distinction hommes-femmes |
| m) Altération de la zone côtière et obstruction du passage en bord de mer | m) Impact sur la consommation d'énergie et la sécurité | m) Évolution démographique |
| | n) Consommation de matériaux de construction | n) Structure communautaire |
| | o) Consommation de carburant, de produits chimiques | o) Loisirs |
| | p) Consommation de produits chimiques | p) Aspects culturels, y compris les populations tribales et autochtones |
| | q) Coût et prévention de la corrosion | q) Paysage caractéristique et paysage naturel |
| | r) Énergie intrinsèque | r) Sécurité nationale de l'eau |
| | s) Coût de recherche et développement (R&D) | |

3.5 Outils technologiques pour le dessalement durable de l'eau de mer

39. Le tableau 2 fournit une liste d'outils technologiques qui peuvent être utilisés pour atteindre des solutions durables pour le dessalement de l'eau de mer (Ayaz et al., 2022). Ces outils comprennent la technologie à utiliser, le processus auquel cette technologie peut être appliquée, ainsi que le but et les avantages recherchés.

Tableau 2 : Comparaison des outils technologiques pour la réalisation de solutions durables pour le dessalement de l'eau de mer (Ayaz et al., 2022)

| Technologie/ Technique | Processus cible | Objectif | Avantages |
|--|---|--|---|
| Capteurs | Dans tous les processus, y compris la prise d'eau et l'émissaire | Surveiller une gamme de paramètres (pH, conductivité, turbidité, etc.) | <ul style="list-style-type: none"> - Fournir une détection précoce de tout dysfonctionnement - Maintenir la production et l'efficacité au maximum - Prolonger le cycle de vie du système - Diminuer les risques de sécurité et le gaspillage des ressources |
| Véhicules sous-marins autonomes et planeurs | Prise d'eau et émissaire | <ul style="list-style-type: none"> - Assurer une qualité d'eau correcte pour la prise d'eau - Influences de la concentration des rejets et détection des panaches - Observer et cartographier les panaches | <ul style="list-style-type: none"> - Contribuer à la réduction des impacts chroniques sur les écosystèmes marins - Faciliter une navigation précise - Capable d'effectuer des tâches de surveillance de semaine en mois |
| Satellites | <ul style="list-style-type: none"> - Détermination du bon emplacement de l'usine - Qualité appropriée de l'eau d'admission | <ul style="list-style-type: none"> - Observer la présence d'algues nuisibles et d'autres facteurs d'encrassement biologique - Mesurer la couleur de l'océan - Suivre la dispersion des effluents - Analyser la salinité de l'océan | <ul style="list-style-type: none"> - Assurer une surveillance à long terme, avant et après l'installation - Fournir une résolution spectrale et spatiale |
| Modèles et cartographie | Effets du rejet de saumure, en particulier dans le champ lointain | <ul style="list-style-type: none"> - Analyser l'impact de la saumure à grande échelle - Étudier l'impact du mélange des vents et des courants de marée - Étudier l'impact de l'oscillation des courants de marée dans le champ proche et lointain | <ul style="list-style-type: none"> - Réduire le coût global de la conception des émissaires - Éliminer de manière sûre les rejets de saumure - Offrir des prévisions de la région associée aux panaches de décharge |
| Observation statistique | <ul style="list-style-type: none"> - Généralement utilisée pour les émissaires - Performance de la conception et de l'exploitation des membranes de dessalement | <ul style="list-style-type: none"> - Caractériser l'environnement dans lequel se produisent les rejets - Conserver la trace des mesures dans le temps - Fournir une caractérisation précise entre les données et les modèles | <ul style="list-style-type: none"> - Analyser la présence de rejets ainsi que les impacts du panache des rejets - Faciliter l'analyse des différents facteurs lors de la conception des performances opérationnelles d'une membrane de dessalement composite à film mince |

4. Aspects réglementaires du dessalement de l'eau de mer

40. À la CdP 22 organisée à Antalya (Türkiye) du 7 au 10 décembre 2022, les Parties contractantes à la Convention de Barcelone ont adopté la Décision IG.25/5 « Amendements aux annexes I, II et IV au Protocole relatif à la protection de la mer Méditerranée contre la pollution provenant de sources et activités situées à terre ».

41. Le secteur du « dessalement de l'eau de mer » a été ajouté aux « secteurs d'activité » de l'annexe I du Protocole « tellurique ». Avec l'amendement actualisé, le dessalement de l'eau de mer est principalement pris en compte lors de l'établissement des priorités pour la préparation de plans d'action, de programmes et de mesures pour l'élimination de la pollution provenant de sources et activités situées à terre.

42. En outre, la « saumure » a été ajoutée en tant que nouvelle substance aux « Caractéristiques des substances dans l'environnement » de l'annexe I du Protocole « tellurique ». Avec cet amendement actualisé, les Parties sont invitées à prendre en compte les caractéristiques de la « saumure » lors de la préparation de plans d'action, de programmes et de mesures.

43. Dans ce contexte, et conformément aux exigences des amendements de l'annexe I du Protocole « tellurique », il est recommandé aux responsables de politiques qui réglementent le secteur du dessalement d'envisager la mise en œuvre des mesures suivantes :

- a. Fixer pour la saumure des valeurs limites d'émission (VLE), également appelées « normes relatives aux effluents » ou « normes relatives à la qualité des rejets », qui renvoient à des valeurs numériques pour les constituants des effluents sur le site de rejet dans le but de les administrer, de les surveiller et de les faire respecter.
- b. Adopter des mesures réglementaires visant à éviter les conflits spatiaux entre les usines de dessalement et d'autres activités et l'environnement. À cette fin, la réglementation doit également mettre en œuvre des procédures de sélection du site des activités sur la base de l'approche écosystémique, ainsi que, le cas échéant, de la Planification spatiale marine (PSM).
- c. Établir des exigences d'autorisation pour les usines de dessalement qui définissent les conditions essentielles pour l'installation et la gestion d'activités qui garantissent une bonne protection de l'environnement. Cela comprend la surveillance environnementale obligatoire de la biodiversité et des espèces non indigènes, de la pollution et des déchets marins, de la côte et de l'hydrographie, qui doit être basée sur les objectifs et indicateurs écologiques de l'IMAP.

4.1 Valeurs limites d'émission (VLE) pour l'élimination de la saumure

44. Les réglementations environnementales relatives à l'élimination de la saumure varient fortement d'une région à l'autre. Dans la majorité des pays qui exploitent des usines de dessalement d'eau de mer, le concept de zone de mélange est utilisé pour l'élimination de la saumure. La taille de la zone de mélange autorisée varie de 0 à 500 mètres. La capacité des zones de mélange à réguler le rejet de la saumure est limitée, en particulier dans les zones écologiquement sensibles. Récemment, une méthode de Dilution du point de rendement minimal, simple à mettre en œuvre et à surveiller, a été proposée pour réguler le rejet de saumure dans des zones sensibles (Ahmad & Baddour, 2014).

45. À travers le monde, les rejets de saumure manquent de réglementations, de normes et de lignes directrices réelles. Bien que les réglementations soient très différentes dans leurs spécificités, elles comprennent toutes une limite de salinité et un point de conformité exprimé en distance par rapport au rejet. Une augmentation de la salinité de 1 à 4 parties par mille au-dessus du niveau ambiant est généralement indiquée comme limite supérieure. Cependant, la salinité absolue ou un niveau de dilution minimum sont aussi généralement utilisés pour définir les limites. Le point de conformité de la salinité est généralement spécifié à une distance fixe du rejet, quelque part entre 50 et 300 mètres, et cette limite est la zone de mélange.

46. Conformément aux normes en vigueur dans la région, les VLE suivantes sont recommandées pour les limites de salinité, les limites de température et le point de conformité pour la température énumérés dans le tableau 3.

Tableau 3 : VLE recommandées pour les limites de salinité, les limites de température et le point de conformité pour la température de la saumure (Jenkins et al., 2012)

| Paramètre | VLE recommandées |
|--|---------------------------|
| Limite de salinité | Augmentation ≤ 4 ppm |
| Augmentation en % de la limite de salinité par rapport à la température ambiante | Incrément ≤ 5 % |
| Point de conformité pour la salinité (par rapport au rejet) | 50 à 300 m |
| Limite de température (°C), au-dessus de la température ambiante | < 3 à 10 |
| Point de conformité pour la température (par rapport au rejet) | 300 m |

4.2 Surveillance de l'environnement

47. Les programmes de surveillance environnementale dans le cas du dessalement sont principalement axés sur la détermination des impacts négatifs potentiels associés aux rejets de saumure sur le milieu marin, mais également sur la mise en œuvre de mesures d'atténuation appropriées lorsque de tels impacts sont identifiés. Les mesures de surveillance et de contrôle à utiliser dépendent de divers facteurs, notamment de la taille de l'usine de dessalement et de la qualité de l'eau de source, mais aussi des objectifs et des cibles du bon état écologique (BEE) de la surveillance du milieu marin. Dans les cas de ressources financières limitées, les paramètres opérationnels et les fréquences de surveillance doivent être dérivés d'une évaluation des risques, les paramètres potentiellement dangereux étant classés par ordre de priorité en fonction de leur niveau de risque.

48. Un programme de surveillance régulière de l'environnement doit être mis en œuvre après le début de l'exploitation de l'usine, conformément à toute exigence législative applicable (par exemple, le permis de rejet en mer du concentré). Le programme de surveillance comprend à la fois la surveillance de l'environnement maritime, qui est le Programme de surveillance et d'évaluation intégrées (IMAP) dans le cadre de la Convention de Barcelone, et la surveillance de la pollution à l'intérieur de l'usine concernant les flux d'eau d'admission et de concentré (eau de mer, sédiments et biote).

49. Les principaux outils de surveillance des processus de dessalement de l'eau de mer, y compris la surveillance de la conformité et des tendances, ainsi que les plans de surveillance sont présentés à l'annexe II.

5. Système d'aide à la décision pour la sélection de technologies pour les usines de dessalement

50. La présente section a pour objectif de proposer des recommandations sur les Systèmes d'aide à la décision (SAD) en vue d'aider les décideurs ou les opérateurs d'installations à appliquer les meilleures technologies appropriées pour réaliser un dessalement durable en conformité avec les cadres juridiques et les réglementations tant au niveau national que régional.

51. Le point de départ de la sélection des technologies de dessalement appropriées est l'Évaluation de l'impact sur l'environnement (EIE). Il est de la plus haute importance de mener une EIE avant le lancement de tout projet de dessalement afin d'évaluer les impacts environnementaux potentiels du dessalement et de plaider pour l'adoption de contre-mesures appropriées pour prévenir ou atténuer ces impacts (Ihsanullah et al., 2021). Un processus d'EIE recommandé est présenté à l'annexe III. En principe, il est nécessaire de collecter et d'analyser des données sur les écosystèmes terrestres et marins à l'emplacement proposé pour l'usine de dessalement, y compris les zones de prise et de rejet.

Une fois les opérations officiellement lancées, les données collectées et/ou nouvelles serviront également de référence majeure (valeurs de référence) pour la surveillance environnementale.

52. L'EIE est une méthode qui permet d'évaluer et d'analyser les impacts environnementaux des projets de dessalement d'eau de mer, de proposer des mesures d'atténuation ou de prévention, et de surveiller les sites après leur construction et leur exploitation. Elle aboutit fréquemment à des quantités massives d'informations complexes, qui dépassent souvent les capacités des décideurs à les traiter et à les intégrer. Le processus de prise de décision d'une EIE peut être caractérisé comme une analyse de conflit entre divers jugements de valeur, car les différents décideurs et parties prenantes ont souvent des préférences divergentes concernant un projet. Un outil formel d'aide à la décision qui permet l'intégration de nombreux critères quantitatifs et qualitatifs ainsi que de divers jugements de valeur, comme l'analyse multicritères (AMC) et l'analyse du cycle de vie (ACV), peut faciliter ce processus. L'utilisation de l'AMC et de l'ACV dans le dessalement de l'eau de mer est présentée ci-dessous.

Aspects et questions à aborder dans le rapport d'EIE

- a) But et nécessité du projet
- b) Viabilité sociale
- c) Description du projet
- d) Description de la technologie
- e) Description de la référence environnementale
- f) Modélisation
- g) Dépistage de la toxicité dans les rejets
- h) Évaluation des impacts possibles
- i) Décision entre les options
- j) Mesures à prendre pour minimiser ou réduire les effets néfastes pendant la phase de construction et tout au long de la phase opérationnelle
- k) Meilleures techniques disponibles (MTD)
- l) Meilleures pratiques environnementales (MPE)
- m) Application du principe de précaution

5.1 Analyse multicritères (AMC) dans le dessalement de l'eau de mer

5.1.1 *Analyse multicritères*

53. Il existe généralement un certain nombre de technologies ou de procédés disponibles pour le dessalement, notamment les technologies thermiques, les procédés à membrane et les technologies alternatives (Subramani & Jacangelo, 2015). Face à ces nombreuses options, il peut être difficile pour les décideurs de choisir la meilleure technologie de dessalement. En effet, les décideurs doivent tenir compte d'une variété de facteurs dans le processus de sélection des technologies de dessalement, tels que le coût de production, les impacts environnementaux, la qualité de l'eau, la consommation d'énergie et la fiabilité de la technologie, entre autres. La sélection des technologies de dessalement est donc une décision compliquée à prendre (Wang et al., 2019). L'AMC est un outil efficace dans le domaine de la prise de décision complexe qui offre des solutions aux problèmes impliquant un large éventail d'indicateurs et évalue soigneusement plusieurs critères (Yazdani et al., 2017). De plus, l'AMC est une méthodologie qui peut aider l'EIE de différentes manières et à différentes étapes (Linkov et al., 2006). Quelques études significatives d'AMC appliquées au dessalement, tirées de la documentation scientifique, sont présentées dans l'annexe IV.

5.1.2 *Méthodologie et procédure de l'AMC*

54. La méthodologie de l'AMC se compose principalement de trois étapes, comme le montre la figure 2. Le problème de décision est identifié, les données d'entrée sont obtenues et les alternatives peuvent être classées sur la base des données d'entrée en utilisant une évaluation graphique dans la première étape. Les données d'entrée d'une AMC comprennent des informations sur tous les critères et toutes les alternatives, ainsi que des détails sur les préférences individuelles des groupes de parties prenantes spécifiés. Les alternatives sont classées à l'aide de l'AMC dans la deuxième étape, qui comprend la sélection d'un modèle d'AMC et la normalisation des fonctions, la pondération des critères qui représentent des jugements de valeur et l'exécution d'une analyse de sensibilité pour déterminer la solidité du classement. La pondération est une technique importante de l'AMC et des poids numériques peuvent être attribués en utilisant des modèles d'AMC pour chaque critère afin de définir les valeurs relatives d'un déplacement entre le haut et le bas de l'échelle choisie. Après avoir

analysé les résultats de manière critique et évalué la force des preuves, une alternative doit être sélectionnée lors de l'étape finale (Latteman, 2010).

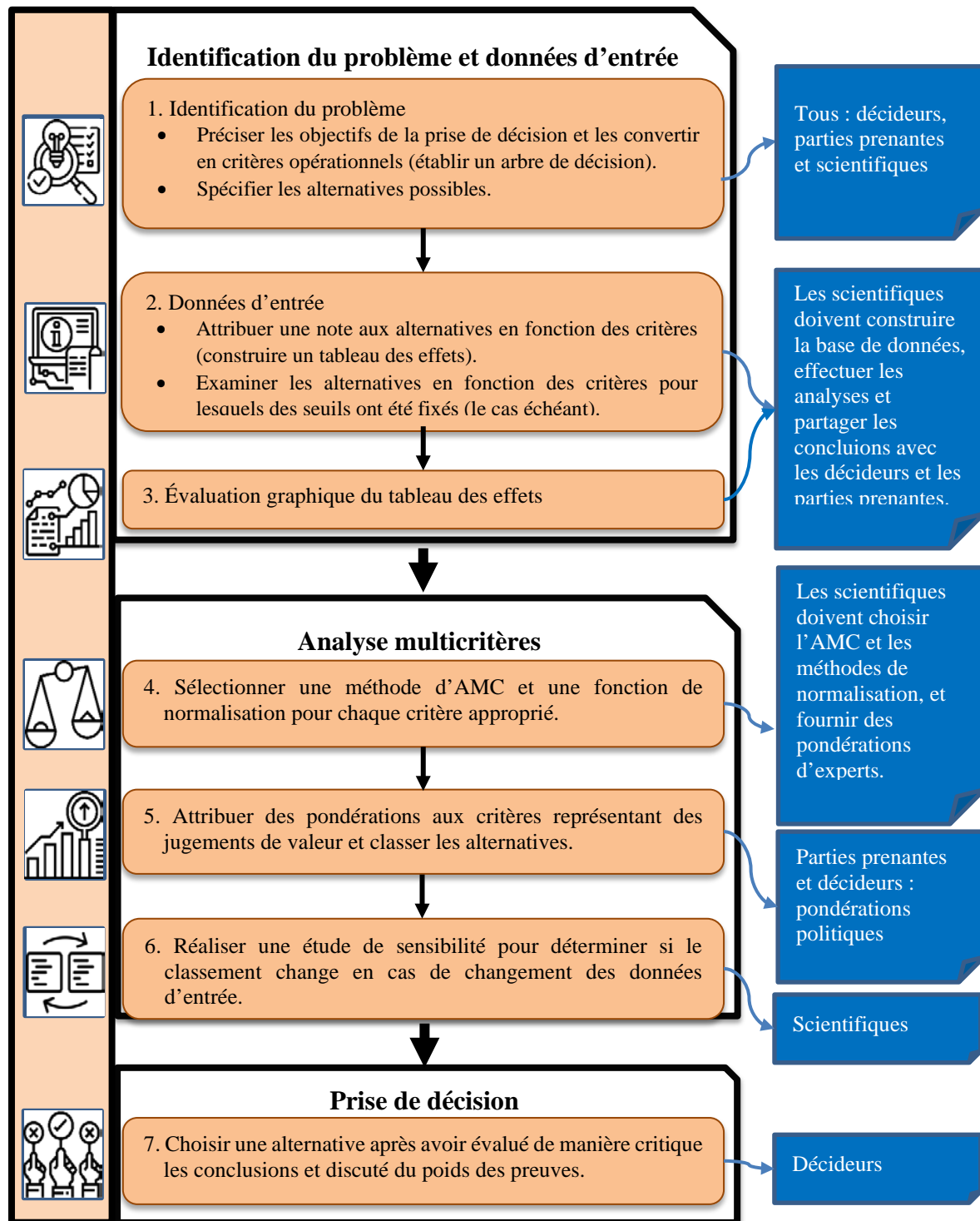


Figure 2. Méthodologie de l'AMC pour la prise de décision (adapté de Wang et al., 2019))

5.1.3 Modèles d'AMC

55. Divers modèles d'AMC ont été élaborés pour synthétiser les données d'entrée et classer les alternatives à l'aide de divers paramètres, chacun présentant un ensemble différent d'avantages et d'inconvénients (Linkov et al., 2006). Le Procédure d'analyse hiérarchique (AHP), le Processus de réseau analytique (ANP), la Théorie de l'utilité multi-attributs (MAUT), les méthodes UTA,

MACBETH, PROMETHEE, ELECTRE, TOPSIS et VIKOR sont les modèles d'ACM les plus utilisés pour les problèmes de décision. Les modèles d'ACM sont classés en deux groupes : les méthodes basées sur la valeur ou la fonction d'utilité et les méthodes de surclassement (Linkov et al., 2006). Il est également possible d'appliquer des modèles hybrides en combinant deux ou plusieurs modèles d'ACM en fonction des types de problèmes que pose la décision (Communities, 2009).

5.1.4 Analyse de sensibilité

56. L'analyse de sensibilité est une méthodologie qui permet de déterminer dans quelle mesure l'imprécision des données ou les désaccords entre des individus affectent les résultats globaux finaux. La sélection des pondérations peut être sensible, en particulier pour l'évaluation de plans ou de projets qui suscitent l'intérêt du public. L'analyse de sensibilité peut être appliquée aux pondérations attribuées aux branches du scénario pour évaluer comment les scénarios affectent l'ordre général des alternatives. L'analyse de sensibilité peut également s'avérer utile pour résoudre les désaccords entre les groupes d'intérêt (Communities, 2009).

5.2 Analyse du cycle de vie du dessalement de l'eau de mer

57. L'importance de la technologie de dessalement augmente rapidement, ce qui soulève des inquiétudes quant à l'approvisionnement durable en eau douce. La modification de l'utilisation des terres, les effets sur le milieu marin, la consommation d'énergie et la pollution sonore ne sont que quelques-uns des effets environnementaux potentiels de la technologie de dessalement. Il est donc nécessaire d'intégrer des mesures d'impact sur l'environnement dans le processus de dessalement en utilisant une solution praticable et une méthodologie raisonnable. Afin d'évaluer la performance environnementale des produits et des systèmes, y compris la technologie de dessalement, la méthodologie d'ACV a été largement utilisée et a acquis de l'importance à ce jour. Bien que la technologie de dessalement soit devenue l'une des sources d'eau les plus importantes, elle présente également un certain nombre d'inconvénients environnementaux qui empêchent sa mise en œuvre à grande échelle. Par conséquent, l'approche d'ACV peut être utilisée pour proposer des stratégies de prévention de la pollution environnementale et améliorer les performances environnementales de la technologie (Aziz & Hanafiah, 2021).

5.2.1 *Analyse du cycle de vie dans le contexte de prise de décision*

58. L'ACV permet d'inclure et de comparer de manière exhaustive les impacts environnementaux potentiels tout au long du cycle de vie d'un produit ou d'un système. En conséquence, l'ACV permet aux décideurs de minimiser ou de sélectionner différents types de résultats provenant de produits ou de services susceptibles d'avoir un impact sur l'environnement ou les humains. Le contexte décisionnel de l'ACV doit être clarifié pour éviter d'utiliser les résultats hors contexte (Pryshlakivsky & Searcy, 2021).

59. Selon certaines définitions, l'ACV est un outil d'aide à la décision plutôt qu'un dispositif qui permet d'effectuer des mesures scientifiques. La personne qui prend une décision en choisissant parmi une série de possibilités reçoit des informations du système d'aide à la décision. Dans l'analyse du cycle de vie, les décisions sont généralement présentées comme des choix entre l'un et l'autre ou comme des choix lorsque l'on tient compte des résultats. Les études comparatives en ACV tirent des conclusions basées sur les différences mesurées dans la même unité fonctionnelle. L'unité fonctionnelle est une unité standardisée, qu'il s'agisse d'un produit ou d'un service, qui est explicitée dans le champ d'application de l'étude et qui définit ce qui est étudié dans l'ACV. La précision de l'ACV est déterminée par la fourniture de points de référence exacts pour les entrées et les sorties de l'unité fonctionnelle. En dépit du fait que l'unité fonctionnelle fournisse une unité normalisée, les assertions comparatives dans l'ACV sont difficiles à résoudre pour les décisions de base. Les décisions, par exemple, ne peuvent pas toujours être réduites à une seule variable, comme le fait de savoir si le système A consomme moins d'énergie que le système B. Au contraire, les utilisateurs des résultats de l'ACV doivent choisir entre des options qui sont incompatibles, par exemple décider si la réduction des déchets est préférable à la qualité de l'air pour les utilisateurs des résultats. Des biais et des préférences sont donc naturellement introduits dans le processus de prise de décision (Pryshlakivsky & Searcy, 2021).

60. La recherche d'ACV utilise des scénarios en plus des études prospectives et rétrospectives. La création de scénarios tente de créer des situations ou solutions futures. Il existe plusieurs approches pour élaborer des scénarios en ACV, mais les deux les plus courantes sont a) les scénarios de simulation et b) les scénarios de base (qui utilisent moins de ressources). En raison des progrès considérables réalisés dans le domaine concerné, de l'utilisation de plans de recherche normalisés et du délai limité dans lequel les implications sont prises en compte, les scénarios de simulation ont tendance à être plus simples que les scénarios de base. Par ailleurs, les scénarios de base, le manque de développement et de connaissances dans le domaine sont complexes et visent à élargir la profondeur des connaissances du domaine. En outre, les scénarios de base impliquent une planification stratégique, ce qui a des implications en termes d'obtention des résultats souhaités (Pryshlakivsky & Searcy, 2021). L'ACV a des implications pour la prise de décision, mais la prise de décision a également des conséquences pour l'ACV ; c'est-à-dire que la façon dont les systèmes sont modélisés dans l'ACV dépend de l'objectif de l'étude. Dans les systèmes de dessalement, l'ACV est très importante dans la prise de décision et surtout dans l'évaluation et la comparaison de ces systèmes.

5.2.1.1 Définition et principes de l'ACV

61. La méthode d'ACV est un cadre standardisé qui peut améliorer notre compréhension des effets d'un système ou d'un produit tout au long des étapes de sa fabrication, de son utilisation et de son élimination. L'ACV est une technique utilisée pour évaluer comment les procédures de dessalement modifient ou affectent les paramètres environnementaux. L'ACV est un outil qui permet de déterminer les aspects environnementaux et les effets potentiels tout au long du cycle de vie d'un produit ou d'un système, depuis ses matières premières jusqu'à son élimination. Grâce à la méthode d'ACV, les décideurs peuvent identifier les points chauds de l'environnement et élaborer des stratégies en vue de réduire les effets néfastes sur l'environnement (Lee & Jepson, 2021).

62. Les quatre phases de l'ACV, qui est une méthode normalisée guidée par les normes ISO 14040 et ISO 14044, sont la définition des objectifs et de la portée, l'inventaire du cycle de vie (ICV), l'évaluation de l'impact du cycle de vie (LCIA) et l'interprétation. Le contexte de la recherche d'ACV est établi en termes de définition de l'unité fonctionnelle et des limites du système au cours de l'étape de définition de l'objectif et de la portée. L'unité fonctionnelle explique l'objectif principal d'un système et permet de traiter différents systèmes comme équivalents du point de vue fonctionnel. Dans les études d'ACV sur le dessalement, l'unité fonctionnelle est souvent définie comme 1 m³ d'eau produite. L'objectif de l'étude, la zone géographique concernée, l'horizon temporel pertinent, etc. ont tous un impact sur la manière dont les limites du système sont déterminées. L'ICV comprend la compilation des entrées, des sorties et des activités pertinentes dans le système analysé. Dans l'étape d'interprétation, les résultats de l'ICV et de la LCIA sont évalués en fonction de la manière dont la LCIA indique les impacts des charges environnementales quantifiées dans l'ICV (Lee & Jepson, 2021; Zhou et al., 2014).

5.2.1.2 Limite du système de dessalement

63. Dans les ACV, quatre types de limites de système sont pris en compte : du « berceau au berceau », du « berceau à la porte », de la « porte à la porte » et du « berceau à la tombe ». Seul le processus d'extraction des matières premières est couvert par la méthode du berceau au berceau. La méthode du berceau à la porte décrit la procédure depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la phase d'exploitation de l'usine. En revanche, la méthode de la porte à la porte ne concerne que l'activité d'exploitation de l'usine. L'ensemble du cycle de vie du système de dessalement est couvert par l'évaluation du berceau à la tombe, qui englobe l'extraction et le traitement de l'eau de mer, le traitement, l'infrastructure de l'usine, le transport, l'exploitation de l'usine, la distribution et l'utilisation, le démantèlement et l'élimination finale des déchets. La figure 3 illustre les limites du système du principe de dessalement du « berceau à la tombe » de l'ACV. Les matériaux de construction, les matériaux d'équipement et le transport des matériaux de construction jusqu'au site de l'usine sont tous inclus dans la phase de construction. Au stade de l'exploitation de l'usine, le processus comprend la production d'électricité, les intrants chimiques, la production de membranes et

le transport. La démolition de la structure du bâtiment, les déchets (saumure, etc.) et l'élimination des membranes sont tous inclus dans le processus de démantèlement.

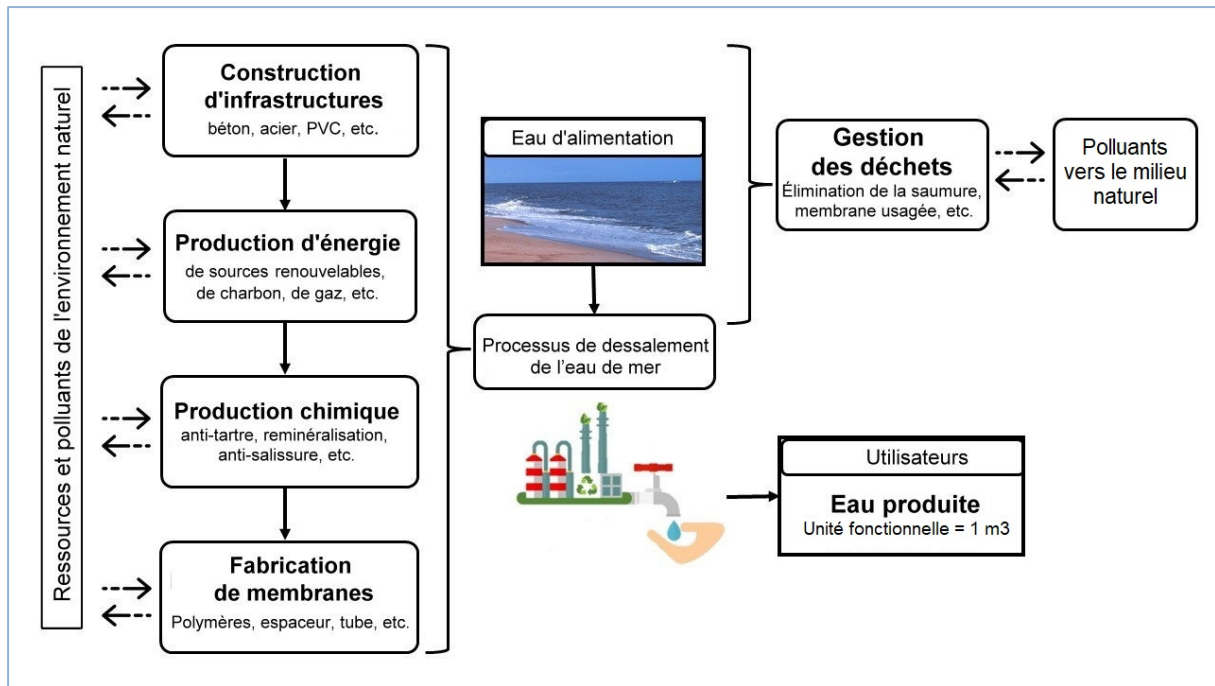


Figure 3. Limite du système du principe de dessalement du « berceau à la tombe » de l'ACV (Adapté de Zhou et al., 2014)

64. Les charges environnementales potentielles du dessalement sont attribuées à la production d'eau potable ou non potable, qui entraîne la consommation de ressources naturelles et le rejet d'émissions polluantes par la construction d'infrastructures, la production d'énergie, la production de produits chimiques, la fabrication de membranes et la gestion des déchets (Aziz & Hanafiah, 2021; Zhou et al., 2014).

5.2.1.3 Évaluation de l'impact du dessalement

65. L'ACV peut être réalisée sur la base de deux approches, à savoir le point médian (axé sur les problèmes) et le point final (axé sur les dommages). Les indicateurs de point médian sont situés quelque part le long de la voie d'impact entre les émissions et les points finaux. Un certain nombre d'indicateurs de catégories d'impact ont été combinés en une catégorie de dommages, également appelée zone de protection, au niveau du point final. Ces indicateurs comprennent la santé humaine, la qualité des écosystèmes et la disponibilité des ressources (Aziz & Hanafiah, 2021).

66. La croissance de la technologie de dessalement a démontré qu'elle s'est transformée en un approvisionnement important en eau douce. Cela signifie que le dessalement doit respecter les principes du développement durable. Une évaluation du cycle de vie durable (LCSA) de manière holistique, comme le montre la figure 4, peut être réalisée en combinant l'analyse environnementale du cycle de vie bien établie avec le coût du cycle de vie (CCV) et l'analyse du cycle de vie social (ACVS). L'ACV environnementale est réalisée en utilisant une unité fonctionnelle qui définit le produit ou le processus. La méthode de CCV est utilisée pour calculer tous les coûts associés au cycle de vie du produit ou du processus en matière de flux monétaires réels. Dans le cas de l'ACVS, les impacts ou bénéfices sociaux relatifs sont évalués à l'aide de critères et d'indicateurs sociaux. Les trois piliers (environnement, économie et social) se complètent pour atteindre l'objectif de viabilité. Par conséquent, le dessalement a dû être conçu et exploité conformément aux piliers de la viabilité en ce qui concerne les perspectives environnementales, économiques et sociales (Aziz & Hanafiah, 2021).

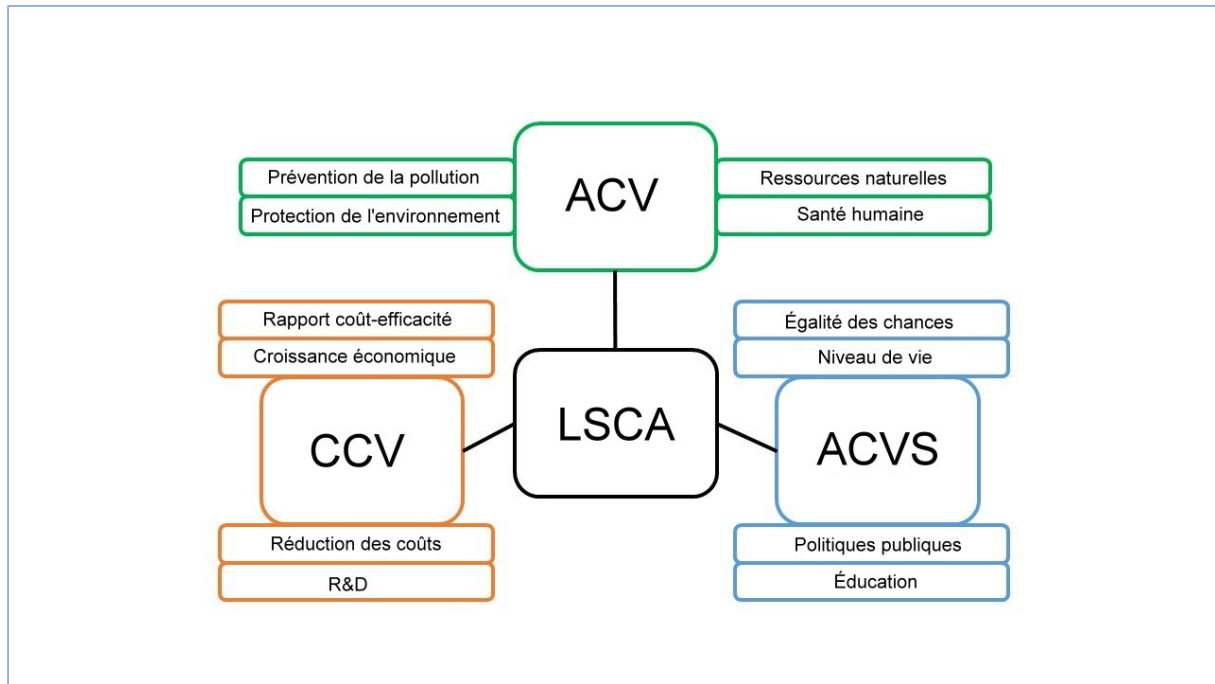


Figure 4. Les trois piliers de l'évaluation du cycle de vie durable

(Adapté de Aziz & Hanafiah, 2021)

5.2.2 Faisabilité de l'application de l'ACV au dessalement

67. L'approche utilisée pour rendre toutes les connaissances acquises en matière d'ACV facilement accessibles et utilisables pour les études de dessalement est appelée faisabilité. La faisabilité fait référence à trois composantes : les méthodes comptables, les bases de données de soutien et les approches de LCIA. L'approche utilisée pour rendre toutes les connaissances acquises en matière d'ACV facilement accessibles et utilisables pour les études de dessalement est appelée faisabilité. La faisabilité fait référence à trois composantes : les méthodes comptables, les bases de données de soutien et les approches d'évaluation de l'impact du cycle de vie. Les considérations importantes pour l'application de la faisabilité au dessalement sont énumérées ci-dessous (Zhou et al., 2014)

- Le modèle de processus est une meilleure méthode comptable pour le dessalement, tandis que le modèle d'ACV de sortie d'intrants économiques peut être utilisé comme un complément en fonction de la disponibilité de la base de données de sortie d'intrants économiques et de la portée de la recherche des praticiens.
- Les études d'ACV sur le dessalement, comme les autres ACV, sont généralement gourmandes en données. Pour soutenir les processus de base tels que la construction d'infrastructures, la production d'énergie, la production chimique, la fabrication de membranes et la gestion des déchets, les praticiens de l'ACV peuvent utiliser les bases de données disponibles. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte la représentativité de la base de données choisie.
- L'élaboration de nouvelles connaissances peut contribuer à améliorer l'évaluation de l'impact du cycle de vie. Tout système de dessalement compte deux caractéristiques importantes : l'élimination de la saumure et les économies d'eau douce. Malheureusement, les modèles d'évaluation actuels utilisés pour traduire ces caractéristiques en impacts correspondants sont encore en cours de développement, ce qui peut conduire à une sous-estimation significative des impacts environnementaux.

5.2.3 *Fiabilité des résultats de l'ACV pour le dessalement*

68. Un autre facteur important à prendre en compte dans l'ACV du dessalement est la fiabilité. Les préoccupations dans ce domaine portent principalement sur le caractère incomplet des limites du système, la non-représentativité de la base de données et l'omission de l'analyse d'incertitude. Les considérations importantes pour la fiabilité du dessalement sont énumérées ci-dessous (Zhou et al., 2014).

- a. Il est parfois nécessaire de réduire les limites du système en ignorant un certain nombre de flux de référence de l'arrière-plan au premier plan. Du point de vue des praticiens, cette approche est séduisante, car elle permet de réduire la charge de la collecte de données primaires. Toutefois, l'exclusion de certains produits chimiques, matériaux de construction et de certaines membranes doit se faire avec prudence, car elle dépend fortement de l'objectif de l'étude et des catégories d'impact visées.
- b. La représentativité temporelle et spatiale d'une base de données engagée dans l'ACV du dessalement est importante, comme elle l'est pour d'autres efforts d'ACV. La plupart des bases de données actuelles s'appuient sur des données européennes de la fin des années 1990 ou du début des années 2000. Pour quantifier les impacts environnementaux des usines de dessalement nouvellement construites dans divers lieux géographiques, des données régionales et actualisées peuvent être nécessaires pour tenir compte des progrès technologiques et du contexte local.
- c. L'estimation de l'incertitude peut être améliorée en fournissant et en suivant des mesures de la qualité des données, comme la façon dont les données sont acquises, la mesure dans laquelle les données sont validées et la mesure dans laquelle les données saisissent les variations technologiques, spatiales et temporelles. Des efforts supplémentaires sont nécessaires pour fournir des conseils et les « meilleures pratiques » en matière d'analyse d'incertitude.

5.2.4 *Analyse de sensibilité et d'incertitude*

69. L'approche de l'ACV est utilisée pour évaluer les impacts environnementaux et la consommation de ressources associés aux cycles de vie des produits et services. L'ACV vise à soutenir l'élaboration de systèmes de production à faible impact et à informer les décideurs sur les impacts environnementaux de diverses options. Les résultats d'une ACV peuvent être influencés par diverses sources d'incertitude, principalement celles liées aux décisions méthodologiques, aux hypothèses initiales faites sur les règles d'attribution et la définition des limites du système, ainsi qu'à la qualité des données disponibles. Par conséquent, les décisions soutenues par l'ACV peuvent être trompeuses. L'incertitude résulte essentiellement d'un manque de connaissances concernant la valeur précise d'une quantité. Dans le détail, les études distinguent les types d'incertitude suivants.

- a. L'incertitude d'un paramètre causée par des valeurs inexactes, incomplètes, périmées ou manquantes des données requises pour une analyse d'impact ou une analyse d'inventaire.
- b. L'incertitude dans les modèles qui est fréquemment causée par l'utilisation de modèles linéaires pour décrire les liens entre les événements environnementaux et par des données agrégées sur des aspects spatiaux et temporels.
- c. L'incertitude résultant des décisions méthodologiques incontournables prises dans l'ACV, telles que les techniques de collecte de données, les limites des unités fonctionnelles et les règles de coupure.

70. Dans les métriques de l'inventaire du cycle de vie (ICV) et de l'évaluation de l'impact du cycle de vie (LCIA), il existe une variabilité spatiale entre les lieux et une variabilité temporelle sur des échelles de temps courtes et longues.

71. Les deux principales procédures d'analyse permettant d'estimer l'incertitude des résultats d'une ACV sont l'analyse de sensibilité, qui évalue l'influence d'un paramètre (la variable indépendante) sur la valeur d'un autre (la variable dépendante), et l'analyse d'incertitude, qui détermine la gamme des résultats possibles en fonction de l'incertitude des données (Cellura et al., 2011).

72. L'analyse de sensibilité évalue la robustesse des résultats en réponse à des changements éventuels des hypothèses sous-jacentes de chaque recherche. Des paramètres sélectionnés ont été utilisés dans l'ACV du dessalement pour les tests de sensibilité : la source d'électricité et le mix énergétique, la consommation d'énergie, l'utilisation de produits chimiques, la durée de vie des matériaux, les distances telles que la distance de transport, la distance de distribution, la distance de transport de l'électricité, la distance de transport des matériaux, d'autres variables telles que la dureté de l'eau, les exigences environnementales en matière d'eau, la salinité de l'eau d'alimentation et la technologie, notamment la perméance de la membrane, le flux d'eau, le processus de post-traitement, le système de prétraitement et l'option de prise d'eau (Lee & Jepson, 2021).

73. L'analyse d'incertitude dans l'ACV nous permet de calculer l'incertitude globale des résultats de l'étude et d'estimer les intervalles de confiance pour les résultats, sur la base des incertitudes de tous les paramètres et de la sélection du modèle du produit ou du système modélisé (Bamber et al., 2020).

74. Compte tenu des incertitudes qui existent durant les phases d'ICV et d'ACV, l'analyse de sensibilité et d'incertitude devrait être utilisée pour évaluer les résultats finaux d'une ACV afin d'accroître leur transparence et leur robustesse (Bamber et al., 2020).

5.2.5 Défis et perspectives d'une ACV de la technologie de dessalement

75. Bien que l'ACV soit une méthode scientifique permettant d'évaluer les effets potentiels d'un produit ou d'un service sur l'environnement, elle présente des limites et des incertitudes de modélisation. Une ACV exige une grande quantité de données et de renseignements détaillés, et il s'agit d'un processus long. En outre, une référence de normalisation, qui représente l'impact total d'une région de référence pour une catégorie particulière d'impact, oriente l'analyse environnementale de l'ACV. Les défis et certaines recommandations concernant l'application de l'ACV au dessalement sont présentés ci-dessous (Aziz & Hanafiah, 2021):

- a. Une référence de normalisation, qui représente l'impact total d'une région de référence pour une catégorie particulière d'impact, oriente l'analyse environnementale de l'ACV. Afin de s'assurer que les résultats des ACV sont précis et pratiques, il est conseillé d'utiliser des bases de données locales.
- b. Parmi les défis à relever pour la mise en œuvre de l'ACV figure la prise en compte globale des parties prenantes, du temps et du lieu. Il est urgent de développer davantage de bases de données d'ICV et de modèles de systèmes paramétriques d'inventaires de processus et de cycles de vie des produits afin de surmonter ces obstacles.
- c. Les résultats de l'ACV doivent inclure une analyse d'incertitude, et les praticiens de l'ACV doivent être ouverts et transparents quant à leurs limites. Par conséquent, pour mettre en œuvre cette stratégie complexe et globale, des connaissances spécialisées sont nécessaires.

76. Il existe encore plusieurs obstacles au développement durable de l'industrie du dessalement. Par conséquent, les efforts nécessaires doivent être fournis par les concepteurs, les praticiens, les gestionnaires et exploitants de services publics, les parties prenantes du secteur de l'eau et les responsables de politiques ou les décideurs. En outre, l'éducation et la sensibilisation sont cruciales pour la mise en œuvre de pratiques durables et pour l'inclusion de mesures de performance environnementale dans la prise de décision (Aziz & Hanafiah, 2021).

References

- Abdelkareem, M. A., Assad, M. E. H., Sayed, E. T., & Soudan, B. (2018). Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants. *Desalination*, 435, 97-113.
- Ahmad, N., & Baddour, R. E. (2014). A review of sources, effects, disposal methods, and regulations of brine into marine environments. *Ocean & Coastal Management*, 87, 1-7.
- Ahmed, F. E., Khalil, A., & Hilal, N. (2021). Emerging desalination technologies: Current status, challenges and future trends. *Desalination*, 517, 115183.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115183>
- Al-Kaabi, A. H., & Mackey, H. R. (2019). Environmental assessment of intake alternatives for seawater reverse osmosis in the Arabian Gulf. *Journal of Environmental Management*, 242, 22-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.051>
- Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 343-356.
- Al Washahi, M., & Gopinath, A. S. (2017). Techno economical feasibility analysis of solar powered ro desalination in Sultanate of Oman. 2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition, GCCCE 2017,
- Alvarado-Revilla, F. (2015). *Desalination markets 2016: Global perspective and opportunities for growth*. Media Analytics Limited.
- Amy, G., Ghaffour, N., Li, Z., Francis, L., Linares, R. V., Missimer, T., & Lattemann, S. (2017). Membrane-based seawater desalination: Present and future prospects. *Desalination*, 401, 16-21.
- Ang, W. L., Mohammad, A. W., Johnson, D., & Hilal, N. (2020). Unlocking the application potential of forward osmosis through integrated/hybrid process. *Science of the Total Environment*, 706, 136047.
- Ayaz, M., Namazi, M. A., Din, M. A. u., Ershath, M. I. M., Mansour, A., & Aggoune, e.-H. M. (2022). Sustainable seawater desalination: Current status, environmental implications and future expectations. *Desalination*, 540, 116022.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116022>
- Aziz, N. I. H. A., & Hanafiah, M. M. (2021). Application of life cycle assessment for desalination: Progress, challenges and future directions. *Environmental Pollution*, 268, 115948.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115948>
- Bamber, N., Turner, I., Arulnathan, V., Li, Y., Zargar Ershadi, S., Smart, A., & Pelletier, N. (2020). Comparing sources and analysis of uncertainty in consequential and attributional life cycle assessment: review of current practice and recommendations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(1), 168-180. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01663-1>
- Beaumont, N. J., Austen, M. C., Atkins, J. P., Burdon, D., Degraer, S., Dentinho, T. P., Derous, S., Holm, P., Horton, T., van Ierland, E., Marboe, A. H., Starkey, D. J., Townsend, M., & Zarzycki, T. (2007). Identification, definition and quantification of goods and services provided by marine biodiversity: Implications for the ecosystem approach. *Marine Pollution Bulletin*, 54(3), 253-265. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.12.003>
- Brika, B. (2018). Water Resources and Desalination in Libya: A Review. *Proceedings*, 2(11), 586.
<https://www.mdpi.com/2504-3900/2/11/586>
- Bundschuh, J., Kaczmarczyk, M., Ghaffour, N., & Tomaszewska, B. (2021). State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects. *Desalination*, 508, 115035. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115035>

- Cellura, M., Longo, S., & Mistretta, M. (2011). Sensitivity analysis to quantify uncertainty in Life Cycle Assessment: The case study of an Italian tile. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4697-4705. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.082>
- Cherif, H., & Belhadj, J. (2018). Environmental life cycle analysis of water desalination processes. In *Sustainable desalination handbook* (pp. 527-559). Elsevier.
- Communities. (2009). *Multi-criteria analysis: a manual*. Retrieved 06 October 2022 from https://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria_Analysis.pdf
- Cordoba, S., Das, A., Leon, J., Garcia, J. M., & Warsinger, D. M. (2021). Double-acting batch reverse osmosis configuration for best-in-class efficiency and low downtime. *Desalination*, 506, 114959. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114959>
- Cornejo, P. K., Santana, M. V., Hokanson, D. R., Mihelcic, J. R., & Zhang, Q. (2014). Carbon footprint of water reuse and desalination: a review of greenhouse gas emissions and estimation tools. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 4(4), 238-252.
- Dhakal, N., Salinas-Rodriguez, S. G., Hamdani, J., Abushaban, A., Sawalha, H., Schippers, J. C., & Kennedy, M. D. (2022). Is Desalination a Solution to Freshwater Scarcity in Developing Countries? *Membranes*, 12(4), 381. <https://www.mdpi.com/2077-0375/12/4/381>
- Do Thi, H. T., Pasztor, T., Fozer, D., Manenti, F., & Toth, A. J. (2021). Comparison of desalination technologies using renewable energy sources with life cycle, PESTLE, and multi-criteria decision analyses. *Water*, 13(21), 3023.
- Drami, D., Yacobi, Y. Z., Stambler, N., & Kress, N. (2011). Seawater quality and microbial communities at a desalination plant marine outfall. A field study at the Israeli Mediterranean coast. *Water Research*, 45(17), 5449-5462.
- Dweiri, F., Khan, S. A., & Almulla, A. (2018). A multi-criteria decision support system to rank sustainable desalination plant location criteria. *Desalination*, 444, 26-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.007>
- EEA-UNEP/MAP. (2020). *Joint Work Plan 2022-2030*. Retrieved 14 October 2022 from <https://www.eea.europa.eu/about-us/documents/unep-map-eea-joint-work-plan>
- Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., & Sodiq, A. (2020). The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination*, 495, 114633. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>
- Elmaadawy, K., Kotb, K. M., Elkadeem, M. R., Sharshir, S. W., Dán, A., Moawad, A., & Liu, B. (2020). Optimal sizing and techno-enviro-economic feasibility assessment of large-scale reverse osmosis desalination powered with hybrid renewable energy sources. *Energy Conversion and Management*, 224, 113377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113377>
- Elsaid, K., Batchelor, B., & Abdel-Wahab, A. (2019). Kinetics of halogenated disinfection by-products formation in chlorinated seawater. In *Encyclopedia of Water: Science, Technology, and Society*. John Wiley & Sons, Inc.
- Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., & Olabi, A. (2020). Environmental impact of desalination technologies: A review. *Science of the Total Environment*, 748, 141528. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>
- Elsaid, K., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Baroutaji, A., & Olabi, y. A. (2020). Environmental impact of desalination processes: Mitigation and control strategies. *Science of the Total Environment*, 740, 140125.

- Elsaie, Y., Soussa, H., Gado, M., & Balah, A. (2022). Water desalination in Egypt; literature review and assessment. *Ain Shams Engineering Journal*, 101998. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101998>
- FAO. (2019). Food and Agriculture Organization of the United Nations: AQUASTAT. https://tableau.apps.fao.org/views/ReviewDashboard-v1/country_dashboard?%3Aembed=y&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y
- EU. (2017). *The EU Marine Strategy Framework Directive* Retrieved 06 October 2022 from https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/environment/oceans-and-seas/eu-marine-strategy-framework-directive_en
- EU. (2020). *Biodiversity strategy for 2030*. Retrieved 06 October 2022 from https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030_en#:~:text=The%20EU's%20biodiversity%20strategy%20for,contains%20specific%20actions%20and%20commitments.
- García-Bartolomei, E., Vásquez, V., Rebolledo, G., Vivallo, A., Acuña-Ruz, T., Rebolledo, J., Orrego, R., & Barra, R. O. (2022). Defining Priority Areas for the Sustainable Development of the Desalination Industry in Chile: A GIS Multi-Criteria Analysis Approach. *Sustainability*, 14(13), 7772.
- Garmendia, M., Borja, Á., Breton, F., Butenschön, M., Marín, A., Miller, P. I., Morisseau, F., & Xu, W. (2015). Challenges and difficulties in assessing the environmental status under the requirements of the Ecosystem Approach in North African countries, illustrated by eutrophication assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(5), 289. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4316-x>
- Gies, E. (2019). Desalination Breakthrough: Saving the Sea from Salt. *Scientific American*, June. Unpaginated. Online. www.scientificamerican.com/article/desalination-breakthrough.
- Gude, G. G. (2018). Emerging technologies for sustainable desalination handbook.
- GWI. (2018). *Global Water Intelligence Desalination plants*. Retrieved 14 October 2022 from <https://www.desaldata.com/>
- Haddad, B., Heck, N., Paytan, A., & Potts, D. (2018). Chapter 14 - Social Issues and Public Acceptance of Seawater Desalination Plants. In V. G. Gude (Ed.), *Sustainable Desalination Handbook* (pp. 505-525). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809240-8.00014-9>
- Heck, N., Petersen, K. L., Potts, D. C., Haddad, B., & Paytan, A. (2018). Predictors of coastal stakeholders' knowledge about seawater desalination impacts on marine ecosystems. *Science of the Total Environment*, 639, 785-792.
- Ihsanullah, I., Atieh, M. A., Sajid, M., & Nazal, M. K. (2021). Desalination and environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies. *Science of the Total Environment*, 780, 146585. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146585>
- IISD. (2016). *Environmental Impact Assessment Training Manual*. International Institute for Sustainable Development Retrieved 06 October 2022 from <https://www.iisd.org/publications>
- Jenkins, S., Paduan, J., Roberts, P., Schlenk, D., & Weis, J. (2012). Management of brine discharges to coastal waters recommendations of a science advisory panel. *Southern California coastal water research project*. Costa Mesa, CA.
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., & Kang, S.-m. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>

- Kalista, B., Shin, H., Cho, J., & Jang, A. (2018). Current development and future prospect review of freeze desalination. *Desalination*, 447, 167-181.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.09.009>
- Kasaeian, A., Babaei, S., Jahanpanah, M., Sarrafha, H., Sulaiman Alsagri, A., Ghaffarian, S., & Yan, W.-M. (2019). Solar humidification-dehumidification desalination systems: A critical review. *Energy Conversion and Management*, 201, 112129.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112129>
- Khan, M. A., Rehman, S., & Al-Sulaiman, F. A. (2018). A hybrid renewable energy system as a potential energy source for water desalination using reverse osmosis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 456-477.
- Khordagui, H. (2013). *Assessment of Potential Cumulative Environmental Impacts of Desalination Plants Around The Mediterranean Sea* <https://www.swim-sm.eu>
- Kress, N. (2019). *Marine impacts of seawater desalination: science, management, and policy*. Elsevier.
- Latteman, S. (2010). *Development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants*. CRC press.
- Lattemann, S., & El-Habr, H. N. (2009). UNEP resource and guidance manual for environmental impact assessment of desalination projects. *Desalination and Water Treatment*, 3(1-3), 217-228.
- Lattemann, S., & Hopner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1-3), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009>
- Lee, K., & Jepson, W. (2021). Environmental impact of desalination: A systematic review of Life Cycle Assessment. *Desalination*, 509, 115066.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115066>
- Linkov, I., Satterstrom, F. K., Kiker, G., Batchelor, C., Bridges, T., & Ferguson, E. (2006). From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications. *Environment international*, 32(8), 1072-1093.
- Lior, N. (2017). Sustainability as the quantitative norm for water desalination impacts. *Desalination*, 401, 99-111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.08.008>
- Mavukkandy, M. O., Chabib, C. M., Mustafa, I., Al Ghaferi, A., & AlMarzooqi, F. (2019). Brine management in desalination industry: From waste to resources generation. *Desalination*, 472, 114187.
- Miller, S., Shemer, H., & Semiat, R. (2015). Energy and environmental issues in desalination. *Desalination*, 366, 2-8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.034>
- Morote, Á. F., Rico, A. M., & Moltó, E. (2017). Critical review of desalination in Spain: A resource for the future? *Geographical Research*, 55(4), 412-423.
- Nasdaq. (2021). *Climate's lessons for the water crisis*. Retrieved 06 October 2022 from <https://www.nasdaq.com/articles/guest-view%3A-climates-lessons-for-the-water-crisis-2021-08-27>
- NATIXIS. (2020). *Desalination: Balancing the Socioeconomic Benefits and Environmental Costs*. Retrieved 06 October 2022 from <https://gsh.cib.natixis.com/api-website-feature/files/download/11695/DESALINATION.pdf>
- Ng, K. C., Thu, K., Kim, Y., Chakraborty, A., & Amy, G. (2013). Adsorption desalination: An emerging low-cost thermal desalination method. *Desalination*, 308, 161-179.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.030>

- Ogunbiyi, O., Saththasivam, J., Al-Masri, D., Manawi, Y., Lawler, J., Zhang, X., & Liu, Z. (2021). Sustainable brine management from the perspectives of water, energy and mineral recovery: A comprehensive review. *Desalination*, 513, 115055.
- Panagopoulos, A., Haralambous, K.-J., & Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies-A review. *Science of the Total Environment*, 693, 133545.
- Park, K., Albaik, I., Davies, P. A., Al-Dadah, R., Mahmoud, S., Ismail, M. A., & Almesfer, M. K. (2022). Batch reverse osmosis (BRO)-adsorption desalination (AD) hybrid system for multipurpose desalination and minimal liquid discharge. *Desalination*, 539, 115945. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115945>
- Pryshlakivsky, J., & Searcy, C. (2021). Life Cycle Assessment as a decision-making tool: Practitioner and managerial considerations. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127344>
- Shah, K. M., Billinge, I. H., Chen, X., Fan, H., Huang, Y., Winton, R. K., & Yip, N. Y. (2022). Drivers, challenges, and emerging technologies for desalination of high-salinity brines: A critical review. *Desalination*, 538, 115827. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115827>
- Skuse, C., Gallego-Schmid, A., Azapagic, A., & Gorgojo, P. (2021). Can emerging membrane-based desalination technologies replace reverse osmosis? *Desalination*, 500, 114844. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114844>
- SOED. (2020). *State of the Environment and Development in the Mediterranean*. Retrieved 14 October 2022 from <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/38057>
- Soliman, M. N., Guen, F. Z., Ahmed, S. A., Saleem, H., Khalil, M. J., & Zaidi, S. J. (2021). Energy consumption and environmental impact assessment of desalination plants and brine disposal strategies. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 589-608. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.038>
- Srithar, K., & Rajaseenivasan, T. (2018). Recent freshwater augmentation techniques in solar still and HDH desalination – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 629-644. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.056>
- Subramani, A., & Jacangelo, J. G. (2015). Emerging desalination technologies for water treatment: a critical review. *Water Research*, 75, 164-187.
- Tal, A. (2018). Addressing desalination's carbon footprint: the Israeli experience. *Water*, 10(2), 197.
- Talaiekhosani, A., Talaei, M. R., & Rezaei, S. (2017). An overview on production and application of ferrate (VI) for chemical oxidation, coagulation and disinfection of water and wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1828-1842.
- UN. (2018). *United nations secretary-general's plan: water action decade 2018–2028*. Retrieved 14 October 2022 from <https://sdgs.un.org/documents/united-nations-secretary-generals-plan-water-action-decade-2018-2028-33215>
- UNEP. (2008). *The Ecosystem Approach roadmap to achieve and maintain Good Environmental Status (GES) of the Mediterranean Sea and coasts*. Retrieved 06 October 2022 from <https://www.unep.org/unepmap/what-we-do/ecosystem-approach>
- UNEP, M. (2017). Integrated Monitoring and Assessment Programme Of The Mediterranean Sea And Coast And Related Assessment Criteria. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822.17012>.

- UNEP(DEPI)/MED. (2016). *Integrated Monitoring and Assessment Programme of the Mediterranean Sea and Coast and related Assessment Criteria*.
<https://www.unep.org/unepmap/resources/publications>
- UNEP/MAP. (2014). *Toward shared environmental information systems*. Retrieved 06 October 2022 from <https://www.unep.org/unepmap/>
- UNEP/MAP. (2020). *Plan Bleu-State of the Environment and Development in the Mediterranean*. Retrieved 14 October 2022 from <https://www.unep.org/resources/report/state-environment-and-development-mediterranean>
- UNEP/MAP. (2021). *Protocol for the Protection of the Mediterranean Sea against Pollution from Land-Based Sources and Activities*. <https://www.unep.org/unepmap/who-we-are/contracting-parties/lbs-protocol-and-amendments>
- Wan, C. F., & Chung, T.-S. (2016). Energy recovery by pressure retarded osmosis (PRO) in SWRO–PRO integrated processes. *Applied Energy*, 162, 687-698.
- Wang, Z., Wang, Y., Xu, G., & Ren, J. (2019). Sustainable desalination process selection: Decision support framework under hybrid information. *Desalination*, 465, 44-57.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.04.022>
- WaterReuseAssociation. (2011). Overview of desalination plant intake alternatives. *White Paper, June*.
- Wei, Q. J., Tucker, C. I., Wu, P. J., Trueworthy, A. M., Tow, E. W., & Lienhard, J. H. (2020). Impact of salt retention on true batch reverse osmosis energy consumption: Experiments and model validation. *Desalination*, 479, 114177.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114177>
- Werner, M., & Schäfer, A. (2007). Social aspects of a solar-powered desalination unit for remote Australian communities. *Desalination*, 203(1-3), 375-393.
- WWAP. (2019). *The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind*. (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France). Retrieved 14 October 2022 from <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2019>
- Yazdani, M., Chatterjee, P., Zavadskas, E. K., & Zolfani, S. H. (2017). Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3728-3740.
- Zhou, J., Chang, V. W. C., & Fane, A. G. (2014). Life Cycle Assessment for desalination: A review on methodology feasibility and reliability. *Water Research*, 61, 210-223.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.017>

Annexe I
Description of Emerging and Pre-treatment Technologies

1. **Membrane distillation (MD):** MD is driven by an induced temperature difference between the hot seawater and the cold permeate water. As a result, seawater is heated to between 30–80°C before being transferred to the MD module, and the permeate is then cooled using the cool incoming seawater (< 20°C). An antiscalant is added to the stream prior to heating since the higher operating temperatures encourage scaling on the membrane surface. MD systems have advantages such as low temperature requirement, no pressure required, no limited feed water salinity, and high separation efficiency.

2. MD is now being researched as an alternative to RO and thermal-based desalination processes or as a supplementary technology at lab and pilot scales. Despite its advantages, MD is still not a widely used commercial technique. Pore wetting and low thermal efficiency are regarded as the two main problems for industrial-scale MD systems. The performance of the MD is also significantly impacted by fouling and low water flux (Ahmed et al., 2021; Skuse et al., 2021).

3. **Forward Osmosis (FO):** The natural osmosis phenomenon, by which a solvent moves from a low solute concentration to a high solute concentration, is the basis of osmotically driven processes. In FO, water is drawn into a concentrated draw solution on the permeate side of the membrane from the feed side. FO uses less energy than pressure-driven processes since it is a naturally occurring occurrence, and FO membranes also have a lower tendency to foul. However, FO desalination is a two-step process in which, the osmosis step must be followed by recovery of the draw solution. Desalination by FO depends on both the eventual recovery of the DS as well as the osmotic transport of water molecules through a FO membrane utilizing a concentrated draw solution. Despite being usually overlooked, the recovery step can have a substantial impact on overall energy usage, depending on the procedure used, the choice of draw solution, etc.

4. One of the most substantial FO barriers is the energy consumed during the recovery of the draw solution. Using a solution that does not require recovery, which essentially eliminates the recovery process, is a strategy to reduce the energy consumption of draw solution regeneration. However, this would lead to generation of additional waste through discarded draw solution. Investigating novel materials like ionic liquids (ILs) and magnetic nanoparticles (MNPs) are another strategy. MNPs have demonstrated important advantages over earlier DSs: they are capable of producing extremely high osmotic pressures and can be recovered using low energy magnetic separators. MNPs cannot operate under high enough flux to be commercially feasible, according to earlier studies. Recent studies show that this is being resolved, although long-term stability is still a problem. Since ILs may be recovered using solar energy or waste heat, they are also being looked into as a draw solution for FO desalination. Recent studies investigating ILs have shown improvements in flux and osmotic pressure, but incomplete recovery of the draw solution means that further separation (RO, MD) is needed. (Ahmed et al., 2021; Skuse et al., 2021)

5. **Adsorption Desalination (AD):** As an alternative to desalination methods, a low-temperature and yet low-cost thermal desalination method known as AD has emerged. The adsorption desalination cycle is a novel method that can produce water while using low-temperature waste heat. The two main processes that make up the AD cycle are adsorption-evaporation and desorption-condensation.

6. AD process can be used as hybrids by incorporating them into conventional systems such as MED or MSF, where the water production efficiency of the hybrids can be maximized. In laboratory-scale pilot trials, superior synergistic effects have been confirmed in the MED-AD hybrid system, increasing production up to two to three times over conventional MED (Gude, 2018; Ng et al., 2013).

7. **Freeze Desalination (FD):** The FD process represents a desalination technique involving a phase change from liquid to solid. Liquid, in this case, refers to seawater or saline water (i.e. brine) while solid refers to ice. Theoretically, a major part of ice crystals comprises pure water. Fresh water will be extracted in the form of ice during the freezing process, making the liquid that is left more concentrated. As a result, the FD process has a high separation factor. As it requires lower temperatures to operate, the FD process strongly depends on the use of refrigerants.

8. FD is an emerging technology to overcome limitations of membrane- and thermal-energy-based desalination processes. In contrast to the RO process, the FD method does not necessitate extensive pretreatment or chemical requirements. Additionally, the environment is harmed by the

concentrated brine that is produced by RO. Contrarily, FD has the ability to process concentrated brine produced by the RO process with almost zero liquid discharge. When compared to the thermal desalination process, the FD process has minimum scaling and corrosion issues because of lower operating temperatures. Latent heat of ice fusion has a thermodynamically determined energy need of 333 kJ/kg, whereas water evaporation has a requirement of 2500 kJ/kg. As a result, the energy used for the FD process is approximately one-seventh of what is needed for thermal desalination.

9. In the FD process, large amounts of high-quality energy consumption are required to produce low temperature with the refrigeration cycle. Combining FD with liquefied natural gas regasification plant can solve the problem of energy consumption, thus reducing operating cost and making FD more attractive. Centrifugation, washing, and perspiration are the processes that are suggested to be used following crystallization to improve product quality (Kalista et al., 2018).

10. **Humidification Dehumidification (HDD):** In humidification dehumidification desalination (HDD) method, the saline water is heated, directly or indirectly, turning into water vapor and humidifying the ambient air. After that, it goes through a dehumidifier, producing freshwater condensate. During the humidification process, water diffuses into the air after coming into touch with unsaturated air. The driving force for this diffusion process is the concentration difference between the water–air interface and the water vapour in air.

11. Humidification-dehumidification is one of the most effective desalination procedures to consider for remote regions with a moderate freshwater demand. This is mostly due to the fact that it just needs minor operational and maintenance considerations. Since the heating process, which is an important step in this process, is an energy-intensive process, using sustainable energy sources is a necessity for today's world. The key advantages of HDD, such as its capacity to provide water to remote places, its small-scale rate, and its simplicity in integrating solar energy, make it a potential substitute for conventional desalination systems. When large-scale thermal desalination systems, such as MSF and MED desalination, are unsuitable options because of their cost and size, or when there is insufficient electric power supply to operate RO, HDD technology can be seen as a potential alternative. One of the major disadvantages of HDD systems is the high investment cost (Gude, 2018; Kasaeian et al., 2019; Srithar & Rajaseenivasan, 2018).

12. **Clathrate hydrate desalination (CHD):** In clathrate hydration desalination (CHD), a saline feed is mixed with clathrate-forming gases at low temperatures and high pressures to form clathrate hydrates: networks of hydrogen-bonded frozen water molecules surrounding the gas molecules. Clathrate hydrates, like ice, have a structure that excludes dissolved solids. To recover freshwater and liberate the gas, the solid hydrates can be separated from the remaining liquid and melted. Clathrate hydrates can form above the freezing point of the saline feed stream at sufficiently high pressures. Salts, like FD, adhere to clathrates, necessitating posttreatment (washing, pressing, or gentle melting) to produce low-salinity product water. CHD primarily consumes electricity for refrigeration and pressurization. CHD, like freeze desalination, has been proposed to be co-located with liquefied natural gas regasification, but any integration of LNG with desalination would need to justify that the economic benefits outweigh the opportunity costs of using LNG for other applications.

13. Corrosion, scale formation, and biofouling, which impair conventional desalination methods, are significantly reduced at CHD operating temperatures. CHD, like FD, has poor salt rejection, but it also has extremely slow kinetics and more complex operations, particularly the requirement to recapture clathrate-forming gas. As a result, the technology is unlikely to outperform FD (Shah et al., 2022).

14. **Batch Reverse Osmosis (BRO):** BRO is a transitory process in which the brine that exits the RO module is returned to the feed side without being mixed with fresh feed. The desalination process is extended in time rather than space with a small recovery ratio per pass. Regarding the problems of energy consumption and CO₂ emissions, numerous studies have published new processes and systems to reduce the current level of energy consumption. In order to reduce the RO desalination process' thermodynamically irreversible energy losses, BRO has recently been developed. The irreversible energy loss is significantly decreased in the BRO system because the applied pressure gradually rises as concentration increases. BRO uses less energy than traditional continuous RO as a consequence,

especially at high recovery. Despite the advantage in energy recovery with the BRO system, it cannot easily increase the recovery to a very high value as required for minimal brine disposal because the maximum operating pressure of the RO membrane is limited. For this reason, hybrid systems can be created by integrating BRO systems with systems such as AD, and minimal or zero liquid discharge can be achieved (Cordoba et al., 2021; Park et al., 2022; Wei et al., 2020).

15. Solar thermal desalination (STD): Sunlight is converted into heat in solar thermal desalination (STD) to evaporate saltwater. Solar evaporation ponds in conventional desalination, are used to concentrate saline streams but do not produce freshwater. Solar stills are STD devices that also condense the vapor to recover distilled water. Solar stills directly use solar energy, so the technology has the benefits of easy setup and operation, minimal equipment needs, and suitability for deployment in remote areas. Because STD is based on evaporation, it is not constrained by feed salinity and can, in theory, handle hypersaline salt concentrations. Where suitable low-cost land is available, STD can potentially serve as a simple ZLD solution.

16. Despite advances in solar absorption, heat localization, and salt buildup mitigation, STD remains an energy-intensive process. The SEC is, at best, the enthalpy of water vaporization unless the latent heat released by the condensing vapor is recovered ($\approx 667 \text{ kWh/m}^3$). Furthermore, the water productivity of STD is limited by solar irradiance. A considerable land area would therefore be needed for an operationally viable water production output (Shah et al., 2022).

17. Solvent extraction desalination (SED): SED is a thermally driven technique that does not involve the phase-change of water. At extraction temperature, the saline feed is mixed with a low-polarity solvent, where the two liquids are immiscible and thus form a biphasic mixture. However, because the solvent contains hydrophilic functional groups, it draws some water from the feed stream into the solvent phase, whereas salts do not prefer partitioning into the solvent's low dielectric constant environment and remain in the aqueous phase. The water-laden solvent phase is then decanted from the concentrated aqueous phase and brought to disengagement temperature, lowering the solubility limit of water. As a result, the previously extracted water separates from the solvent, yielding a desalinated product stream. Physical separation of the product water occurs, and the regenerated solvent is recycled back into the process. Since 2011, there has been renewed interest in this technology for hypersaline stream desalination and dewatering.

18. SED avoids many of the limitations associated with traditional high-salinity desalination technologies because it is both membrane-free and non-evaporative. Process top temperatures are typically $< 80 \text{ }^\circ\text{C}$, so corrosion is lessened compared to conventional distillation methods.

19. Despite the fact that the solvents used in SED are low polarity, they are not completely insoluble in water. Therefore, a fraction of solvent is lost to both the dewatered raffinate and product water. Additional costs are incurred in recovering the solvent, and any leaked solvent that is not reclaimed must be replenished. Furthermore, residual solvent in the concentrate and product streams may necessitate posttreatment, especially if the solvent is toxic. The identification of solvents that minimize loss while being safe for the environment and human health is critical for technological advancement. Simultaneously, research on new solvents with high water production capabilities will reduce SED's energy consumption (Shah et al., 2022).

20. Supercritical water desalination (SCWD): SCWD uses the switch in solvent polarity from polar to nonpolar at supercritical conditions. Water behaves as a nonpolar solvent when it is subjected to supercritical conditions, which are defined as temperatures and pressures greater than $374 \text{ }^\circ\text{C}$ and 221 bar ($\approx 3200 \text{ psi}$). Salts precipitate out of solution as their solubility in supercritical water decreases significantly, allowing for the easy separation of solid minerals from the fluid product water stream. SCWD is always a ZLD technology because no concentrate waste stream is produced.

21. Different feed stream compositions can be handled and treated with SCWD across the entire salinity range. Additionally, since the method precipitates out even sparingly soluble salts, extensive pretreatment is frequently not needed. The extreme pressures and temperatures required to produce supercritical water result in extremely high energy consumption and initial investment requirements for SCWD. SCWD materials must be thermally, mechanically, and chemically robust in order to withstand the extremely high temperatures and pressures. Despite the use of long-lasting materials

such as stainless steel and titanium, superheated and pressurized high-salt brine is known to cause significant corrosion in equipment.

22. The two main challenges of high material durability requirements and high energy costs to achieve the extreme temperatures and pressures must be resolved for SCWD to be competitive (Shah et al., 2022).

23. **Zero Liquid Discharge (ZLD):** ZLD is a water treatment engineering approach in which the plant does not discharge any liquid effluent into surface water. This results in the complete elimination of the pollution associated with desalination. The ZLD method also eliminates liquid waste, maximizes water usage effectiveness, and reduces potential water quality issues. It also contributes to water conservation by reducing freshwater consumption through wastewater recycling and reuse. The challenges and cost of water recovery are increasing with the rise in salinity, presence of scaling compounds and organics in the wastewater and hence, the need for Zero-Liquid Discharge target is growing. The challenges to consider in ZLD implementation are following.

- a. The choice of an appropriate method based on the composition, features, associated corrosion and temperature issues, and target capacity.
- b. ZLD's capital and operating costs, which include energy and chemical costs associated with the evaporation and treatment processes, are significantly higher than those of other disposal methods.
- c. When considering the ZLD technique, the material compatibility factor is critical. It refers to the material's corrosion resistance, or how it rusts or stains when exposed to chemicals, salt, and other compounds (Soliman et al., 2021).

24. Table A.1 provides a summary on evaluated metrics of energy grade product water salinity (i.e., compatibility with fit-for-purpose applications), technology demonstration status, zero liquid discharge capability, and ability to precipitate solids in bulk aqueous phase for emerging technologies (Shah et al., 2022).

Table A.1: Summary of metrics of energy grade product water salinity, technology demonstration status, zero liquid discharge capability, and ability to precipitate solids in bulk aqueous phase for emerging technologies (Shah et al., 2022)

| Criteria | ED | FO | MD | HDD | SED | SCWD | FD | CHD | STD |
|---------------------------------------|----------------|-------|-----|----------------|-----|------|----------------|-----|-----|
| Primary Energy Input | EC | S/LGH | LGH | S/LGH | LGH | EC+S | EC | EC | LGH |
| Product Water Salinity | FFP | FFP | DW | DW | FFP | DW | FFP | FFP | DW |
| Industrial-Scale Demonstration | + ¹ | + | | + | | | + ² | | |
| ZLD demonstrated | | | | + | + | + | | | + |
| Precipitation in bulk solid | | | | + ³ | + | + | | | |

EC: Electricity, S: Steam, LGH: Low Grade Heat, +: Demonstrated performance, FFP: Fit-for-purpose, DW: Drinking water

1 ED Demonstrated for brackish water desalination

2 FD Demonstrated for food and beverage industry

3 Precipitation occurs at solution-air interface, away from solid surface

Annex II

Major tools for monitoring of seawater desalination processes

Introduction

1. Seawater quality is a particularly sensitive subject and has dynamic conditions because it is closely linked to so many environmental issues. Due to the growth of pollution sources, monitoring its quality, particularly during intake and outfall operations, is becoming more difficult. In addition, the operational problems with desalination are heavily linked to the corrosive characteristics of marine organisms and seawater. These characteristics, in turn, might have a detrimental impact on the system, resulting in a facility's partial or occasionally entire closure. Furthermore, any unsuitable occurrence or operation can result in safety risks and resource waste. Thus, the comprehensive monitoring and assessment, and the selection of a suitable location has a significant impact on the entire production process and its efficiency, as well as the plant's overall operating life.

Compliance monitoring (indicator approach)

2. Compliance monitoring usually involves periodic or continuously monitoring of a certain parameter to ensure that legal requirements and environmental quality standards are being maintained. While it is ideal to look at as much as possible in an EIA, it is indeed practically impossible to constantly investigate every organism throughout every environment. Therefore, an indicator strategy is indirectly used in an EIA most often. Salinity and dissolved oxygen concentrations (or temperature for distillation plants) are appropriate physical indicators of desalination plants with the goal of ensuring compliance with regulatory requirements.

Trend monitoring (indicator approach)

3. Trend monitoring of the concentration of pollutants discharging into coastal waters through the effluents of the operations of desalination needs to be established in order to contribute to the achievement of the targets of the Good Environmental Status (GES) of marine environment as defined in IMAP. Pollution reduction targets of inputs of pollutants should be agreed further to the outcomes of the trend monitoring.

4. Trend monitoring of pollutants discharging into coastal waters needs to include the pollutants emitted through the operations of desalination by considering the analytical procedures for the sampling, sample preparation and analytical determination of the pollutants as recommended in UNEP/MAP Monitoring Guidelines for IMAP Common Indicators 13, 14 and 17.

5. The maximum permitted level of concentrations of pollutants measured in effluents discharging into coastal waters through the effluents of the operations of desalination should be set further to a trend analysis of the concentrations of pollutants measured during a period that is not shorter than 5 years in order to guide the appropriate response measures in case of excessive discharges of pollutants.

Environmental monitoring plans

6. Although there is no scarcity of seawater, it is crucial to comprehend, constantly monitor, and take the appropriate steps to reduce the negative effects of seawater desalination, especially raising the prospect of its rapid expansion in the near future. Comprehensive environmental monitoring plans (EMPs) are developed to prevent, predict, and monitor impacts in feasibility, planning, design, construction, and operations of seawater desalination plants. These plans are implemented worldwide to comply with discharge water quality standards and environmental regulations with the aim of protecting the aquatic environment.

7. An environmental monitoring plan is developed to: (i) collect information on the environment during plant construction, installation, and operation as necessary; (ii) monitor the outfalls related to every project stage, including the operation stage; (iii) monitor any substantial changes in the area associated with the plant that may be caused by its activities, such as those that affect the physical,

chemical, or biological properties; and (iv) start mitigating actions before these changes affect the natural processes and become them irreversible.

8. The monitoring plan specifications should include water quality limitations at the sample locations, required dilution of brine discharges (including volume of discharge and salinity), controls for discharge dispersing, controls for local plant and animal species, and mitigation methods to reduce excessive salt concentration.

Appendix III

Process for conducting the Environmental Impact Assessments

Introduction

1. EIA is commonly defined as an assessment of the environmental impact of planned activities, including impacts on biodiversity, vegetation and ecology, water, and air. An EIA is a process for identifying, predicting, and evaluating the likely environmental, socioeconomic, cultural, and other impacts of a proposed project or development to define mitigation actions—not only to lessen negative impacts but also to provide benefits to the natural environment and well-being. A project's potential risks to the environment and human well-being are essentially identified in an EIA, along with steps that can be taken to eliminate and/or at least reduce such risks. This can be done by replacing and/or modifying planned activities to reduce impacts. In this context, an EIA can be seen as an information-gathering activity by the project proponent to outline (and if possible quantify) the risks, impacts and mitigation actions built into the project's whole lifecycle from design to closure so that decision makers are fully informed when approving the project. The most crucial factor in determining whether an EIA is necessary is the degree to which the project would have an adverse impact on both human and environmental health (IISD, 2016).

2. The EIA of projects is a key instrument of European Union environmental policy. It is currently governed by the terms of European Union Directive 2011/92/EU, as amended by Directive 2014/52/EU on the assessment of the effects of certain public and private Projects on the environment (EIA Directive). Since the adoption of the first EIA Directive in 1985 (Directive 85/337/EEC), both the law and EIA practices have evolved. The EIA Directive was amended by Directives 97/11/EC, 2003/35/EC, and 2009/31/EC. The Directive and its three amendments were codified in 2011 by Directive 2011/92/EU. The codified Directive was subsequently amended by Directive 2014/52/EU.

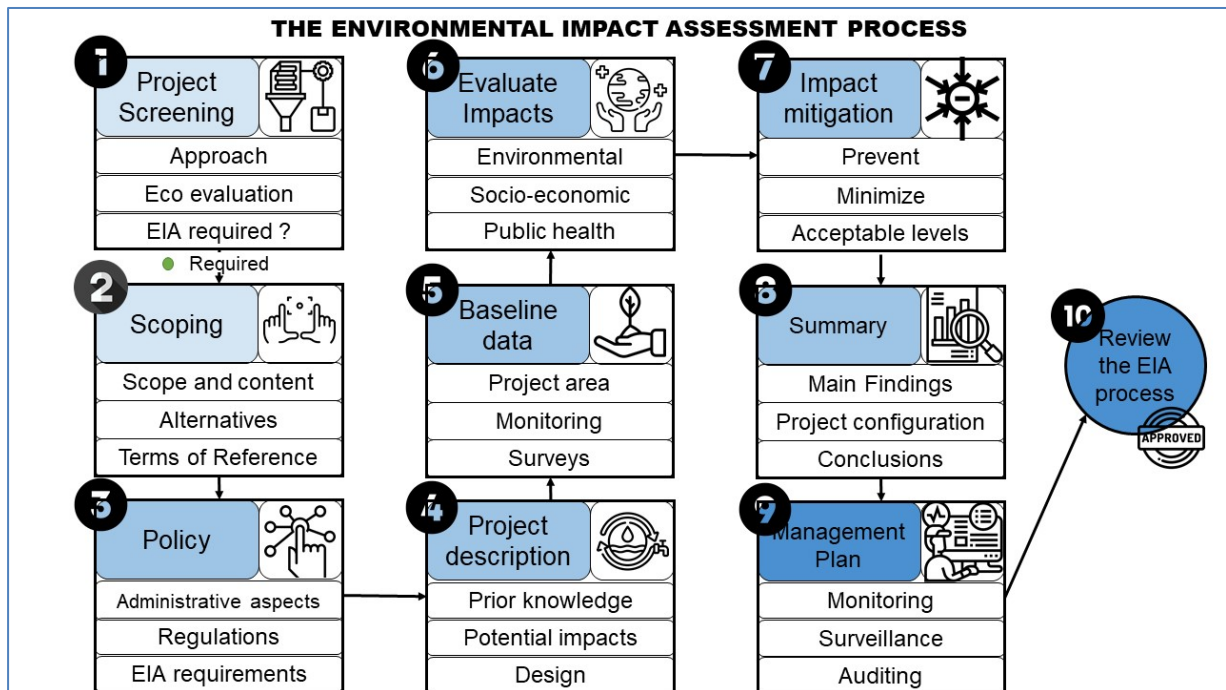
3. The three main stages of the EIA process are project screening and scoping, environmental impact assessment, and decision-making and EIA review. It should be noted that in practice, deviations from the outlined process may occur. Single steps may not necessarily have a defined limit; some may overlap or be used in place of others. Thus, the EIA process should be seen as a continuous and flexible process.

4. In order to assist project designers, consultants, regulators, and decision makers anticipate and address all relevant environmental, socioeconomic, and public health concerns that may arise when undertaking a desalination project for obtaining the highest possible level of beneficial use of the desalinated water in terms of quality, safety, and environmental protection, the United Nations Environment Programme (UNEP) and the World Health Organization (WHO) developed and released a guidance document on desalination. The objective of the guidance document is to identify a wide range of potentially significant challenges that may help in anticipating the pertinent issues of each desalination project individually. EIA process covering three main phases, scoping, screening, impact mitigation and reporting main EIA phases and were subdivided into 10 steps is shown in the following diagram (Figure A.1). UNEP (2008) Desalination Resource and Guidance Manual for Environmental Impact Assessments. United Nations Environment Programme, Regional Office for West Asia, Manama, and World Health Organization, Regional Office for the Eastern Mediterranean, Cairo.

Screening of the project

5. The process of screening determines whether or not an EIA is necessary for a certain project. Thus, screening involves making a quick assessment of the relative importance and anticipated environmental impact of a proposed project. A certain level of basic information about the proposal and its location is required for this purpose (UNEP, 2008).

6. The screening processes can be broadly categorized into two approaches: a standardized approach, where projects are subject to or exempt from EIA as defined by legislation and regulations; and a customized approach, where projects are screened on a case-by-case basis utilizing indicative advice (Lattemann & El-Habr, 2009).



*Figure A.1. The Environment Impact Assessment Process
(Adapted from (Lattemann & El-Habr, 2009))*

Scoping of the project

7. Scoping is an important step in the preparation of an EIA because it identifies the issues that are likely to be most important during the EIA and eliminates those that are of little concern. Scoping is a systematic process that determines the parameters of your EIA and defines the framework for the studies you will perform at each stage. A quality scoping study reduces the risk of including inappropriate components or excluding components that should be addressed (UNEP, 2008).

8. The scoping procedure follow four basic steps; i) preparation of a scoping document for public dissemination, including project details and a preliminary environmental analysis, ii) organisation of scoping meetings inviting collaborating agencies, stakeholder groups, NGOs, experts and advisers, and announcement of the scoping meeting in public, iii) compilation of a complete list of issues during scoping consultations, which are then evaluated in terms of their relative importance and significance, iv) preparation of the terms of reference for EIA, defining the scope and information requirements of the EIA, study guidelines and methodologies (Lattemann & El-Habr, 2009).

9. The preparation of Terms of Reference (ToR) for an EIA is an important task in concluding the scoping process. The project proponent is given specific instructions for the information that must be submitted to the appropriate authorities for an EIA as well as the studies that must be conducted to gather that information in the Terms of Reference (ToR), which are developed throughout the process (Lattemann & El-Habr, 2009).

- a) **Selection of the project site:** Environmental, socio-economic and public health impacts resulting from the construction and operation of a desalination plant are largely dictated by the location of the facility and its associated infrastructure. Therefore, proper site selection for a desalination plant during the planning process is essential for minimizing these impacts. Site selection typically takes place in the early stages of a desalination project and leads to the identification of a preferred site and possibly one or two alternatives.
- b) **Project description:** A general description of the purpose and need of the project should be given at the beginning of the EIA document. It should include the following information:
 - i. Proposed location of the desalination plant.
 - ii. Co-location with other industries (such as power plants).

- iii. The onshore and offshore components of the plant (buildings, pumps, pipelines, brine outfall), planned construction activities and timeline.
 - iv. Connection to the water supply grid.
- c) **Technology selection and characterization of discharges** A detailed technological description of the chosen desalination process should be part of the EIA, including the rationale for the choice. It should include the following information:
- i. The desalination technology chosen and engineering specifications
 - ii. Desalination capacity of the plant and future expansion plans
 - iii. Energy usage and source
 - iv. Area and method of source water intake (open intake, well intake)
 - v. The treatment steps of the source water during the desalination process (among others the pre-treatment, biocide application, anti-scaling measures, cleaning stages, desalinated water treatment)
 - vi. Type of discharges and emissions (marine, terrestrial and atmospheric)
 - vii. Total volume of discharges and emissions (daily, yearly)
 - viii. Area and method of brine discharge (open discharge, co-discharge, marine outfall with or without diffusers)
 - ix. Brine discharge pattern (continuous, intermittent, variable)
 - x. Physio-chemical characteristics of the brine (salinity, temperature, etc...)
 - xi. Concentrations and loads of discharged substances and their environmental characterization (such as persistent, toxicity, bioaccumulation).

Modeling

10. A model is a conceptual or mathematical simplification that is used to investigate a real natural system, a risk assessment problem, and/or a decision-making process, among other things. Modeling is a common requirement for an EIA process and a fundamental component of informed regulatory and decision-making processes. Modeling is a common requirement for an EIA process and a fundamental component of informed regulatory and decision-making processes (Kress, 2019).

Identification and description of policy and administrative aspects

11. An EIA typically takes place within the specific legal frameworks created by the nation in which the project will be located as well as those set by international organizations. As a result, it is advised to get a greater awareness of any national or international rules that might be relevant to the EIA process. Additionally, all thematically relevant laws and policies must be found, such as those pertaining to the preservation of the environment and biological diversity, the prevention and control of pollution, the management of water resources, or land-use and regional planning. To realize a desalination project, more than one permit will often be needed in several jurisdictions. The main approval process, which authorizes the construction and operation of a desalination plant, will not necessarily replace other existing statutory provisions, and permits. It is significant to identify the permits that must be secured early in the project planning process and to get in touch with the competent authorities. By designating a "lead" agency, which coordinates the process by involving other agencies and by notifying the project proponent about regulatory requirements, the permitting procedure may be made easier.

Investigation and description of the proposed desalination project

12. The many life-cycle stages of constructing, commissioning, operating, maintaining, and decommissioning the desalination plant should be covered in the project description. It should be brief, include all the elements required for an impact evaluation, and not include any unnecessary or distracting material. It should include an estimate of every resource used during the various project operations, including the amount of land needed for building, the amount of chemicals used during plant upkeep, and the amount of energy used. It should furthermore include a characterization of all waste products in terms of quantity and composition, including emissions into air, water, and soils, as

well as solid and liquid waste products transported to a landfill or discharged into the municipal sewer or stormwater system (Lattemann & El-Habr, 2009).

Investigation and evaluation of environmental baseline

13. It is possible to choose a reference region with comparable features, for which baseline data is established in the same manner as for the project site. This allows for a comparison between the reference site and the project site during project monitoring in order to detect any changes caused by construction and operation of the project. It is especially helpful to identify natural changes or other anthropogenic impacts unrelated to the desalination project using reference data from a site with similar environmental features (Lattemann & El-Habr, 2009).

Investigation and evaluation of potential impacts of the project

14. The prediction of impact in an EIA is typically based on conceptual models and tests, such as field and laboratory experimental methods (e.g. whole effluent toxicity tests), small-scale models to study effects in miniature (e.g. different outfall designs), analogue models which make predictions based on analogies to similar existing projects (e.g. other desalination plants) or mathematical models (e.g. hydrodynamic modelling of the discharges). Each of these models only covers a small portion of the range of impacts; therefore, they are frequently utilized in conjunction with one another, leading to a variety of studies being conducted by different experts. The relative importance of the anticipated impact should be assessed using factors like:

- a) Is the impact direct or indirect, positive or negative?
- b) What is its scope in terms of the impacted population's size or the geographic area?
- c) How severe is the effect, how likely is it to happen, and is it reversible or can it be mitigated?

15. Identification of secondary effects, potential cumulative effects with other development initiatives on the project site, trans-boundary (far-distance) effects, and growth-inducing effects should be done whenever possible and suitable (Lattemann & El-Habr, 2009).

Mitigation of negative effects

In order to avoid, minimize, or correct major negative consequences to levels acceptable to the regulatory agencies and the affected community, impact mitigation step should identify the most feasible and cost-effective alternatives. According to various national, regional, or local standards, which depend on the social, ideological, and cultural values of a society or community, as well as on economic potential and politics, the definition of acceptable will change (Lattemann & El-Habr, 2009).

16. A hierarchy of actions is used to organize the mitigation components. Usually, impact prevention through appropriate actions and alternatives is given highest priority. Impacts should be reduced to the least extent practicable if prevention is impossible. All remaining major but unavoidable consequences that cannot be further minimized should be compensated for or remedied following the project's decommissioning (Latteman, 2009).

17. Mitigation can involve structural measures (e.g. design or location changes, technical modifications, waste treatment) and non-structural measures (e.g. economic incentives, policy instruments, provision of community services, capacity building).

18. Restoration of the impacted site during the project's lifespan or after demolition is complete is one option for remediation and compensation, as is the improvement of resource values elsewhere, such as through habitat improvement, reforestation, or restocking of a particular species (Lattemann & El-Habr, 2009).

Summary and conclusions

19. For this aim, a summary of the major implications (possibly in the form of a table) should be supplied, distinguishing between substantial impacts that can be avoided or mitigated and those that cannot. Both direct and indirect effects, positive and negative effects, and the potential of cumulative effects should be examined.

20. Whenever possible, choices to mitigation or avoid major effects should be provided. A systematic comparison of the original project proposal to different project configurations in terms of negative and positive impacts and the efficacy of mitigation strategies is essential. The final step is to identify the "best practicable environmental option," which is the ideal project design according to environmental, social, cultural, and public health criteria. It is important to make sure this choice is both financially and technologically viable. The decision should be transparent and supported by arguments (Lattemann & El-Habr, 2009).

Establishment of an environmental management plan

21. During the construction, commissioning, operation, maintenance, and decommissioning of the proposed desalination project, an environmental management plan should be developed to ensure the continual monitoring and review of the project's effects. Its purpose is to determine the actual consequences of the project and to confirm that the observed impacts are within the range indicated by the EIA. In addition, the goal of environmental management is to ensure that the mitigation measures or other requirements linked to the project permit are appropriately executed and effective. If not, or if unanticipated effects emerge, the measures and conditions must be modified in light of the new information. The management plan should outline any plans for planned monitoring, surveillance, and auditing activities, including methodology, timetables, and management processes for unanticipated occurrences (Lattemann & El-Habr, 2009).

Review of the EIA and decision-making process

22. The goal of review is to confirm the completeness and quality of the EIA data collected. This final phase ensures that the material supplied in the report conforms to the Terms of Reference as defined during scoping and is sufficient for decision making.

23. Review is a formal phase in the EIA procedure that serves as a final review of the EIA report before it is submitted for project approval. The review may be conducted by the relevant authority, another government agency, or an independent organization. Participation of collaborating and advising agencies in the review process is strongly advised, as is the participation of the public and important stakeholders in public hearings regarding the EIA's results.

24. The review should adhere to a systematic methodology. This will involve an appraisal and validation of the EIA methodology and technique, as well as a verification of the consistency, plausibility, and exhaustiveness of the discovered impacts, offered alternatives, and suggested mitigation actions.

25. The review process may adhere to specified norms and review criteria. If these are unavailable, the committee may rely on broad principles, objectives, and terms of reference, or use the questions below:

- a) Does the EIA report address the Terms of Reference?
- b) Is the requested information provided for each major component of the EIA report?
- c) Is the information correct and technically sound?
- d) Have the views and concerns of affected and interested parties been considered?
- e) Is the statement of the key findings complete and satisfactory, e.g. for significant impacts, proposed mitigation measures, etc.?
- f) Is the information clearly presented and understandable?
- g) Is the information sufficient for the purpose of decision-making and condition setting?

26. The response to the last question is the most important and will essentially determine whether or not the EIA may be submitted to the competent authority as-is or with minor adjustments for decision-making.

27. On the basis of the EIA report, the analysis of stakeholder interests, and comments from collaborating agencies, the competent authority will make its own evaluation of the proposed project and decide on its approval or rejection. If the project is accepted, the competent authority will often

impose conditions, such as mitigation measures, emission limitations, or environmental standards to be observed. (Lattemann & El-Habr, 2009).

Outline of an EIA report should incorporate

The outcome of the EIA process should include documented information pertaining to the following:

- a) The goal and necessity of the project, including the accessibility and affordability of alternative water sources (water treatment and reuse, water conservation, water waste prevention).
- b) Social sustainability: Impacts on human health (quality of desalinated water), land use, population growth, infrastructure, trust in the availability of desalinated water, impact on recreational activities, or other acceptable uses of the sea and shoreline.
- c) Project description: The plant's onshore and offshore physical components (structures, pumps, pipelines, intake, and brine disposal systems), planned construction processes, and timeframe, as well as the intended location, co-located with other industries or marine applications.
- d) Technology description: Engineering requirements, production capacity, energy source and use, intake and discharge systems, pretreatment of source water (coagulation, biocide application, anti-scaling measures, cleaning stages, desalinated water treatment), and type, volume, and composition of water discharge and emission levels (marine, terrestrial and atmospheric) are all factors in the desalination process.
- e) Environmental baseline description: Compilation and analysis of current information on the terrestrial and aquatic environments nearby, as well as baseline monitoring assessments conducted before the construction.
- f) Modeling: Loss of organism entrainment, impingement, and entrapment at intake systems, regional (near and far field) hydrography and brine dispersion, transboundary transport, and effects on seawater quality and sea organisms are the issues that need to be addressed.
- g) Screening for toxicity in discharges.
- h) Assessment of potential impacts.
- i) Decision between options: Tools for defining and selecting the best alternative and establishing mitigation measures include environmental risk assessment and multicriteria decision assessment.
- j) Describe the steps that will be taken to minimize or reduce adverse effects both during the construction phase and throughout the operational phase of the desalination plant, taking the following factors into account:
- k) Best Available Technique (BAT): A measure's practical suitability for reducing discharges, emissions, and waste is indicated by its most recent stage of development (state of the art) of its processes, facilities, or methods of operation.
- l) Best Environmental Practice (BEP): The use of the best possible set of environmental control techniques and methods.
- m) The precautionary principle: Even if there is merely suggestive evidence of an influence, action should be taken to avoid major negative effects. 146 Seawater Desalination's Marine Impacts: Science, Administration, and Policy Recently, it has been proposed to add a phase to the EIA to account for the impact of climate change. Increased freshwater demand, rising seawater temperatures and salinities, and rising phytoplankton blooms are all potential factors in desalination (Kress, 2019).

Annexe IV
Example MCA studies applied on desalination

1. García-Bartolomei et al. (2022) used a GIS-based Multi-Criteria Analysis (GIS-MCA) approach to investigate and evaluate probable locations fit for the development and operation of desalination facilities in Chile. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) methodology, various environmental, social, and technical criteria were evaluated and weighted. Only 4.54% of the territory analyzed (114,450 km²) was classified as highly suitable, proving the scarcity of space available to meet the industry's growth expectations. These findings indicate that GIS-based analysis provides a practical solution for selecting optimal areas for developing desalination plants, emphasizing the importance of defining priority areas for the long-term development of the desalination industry (García-Bartolomei et al., 2022).

2. Do Thi et al. (2021) studied on desalination procedure of saltwater using several technologies, including RO, MED, and MSF, with several energy sources (fossil energy, solar energy, wind energy, nuclear energy). In this study, the three assessment methods, which are LCA, PESTLE, and multicriteria decision analysis (MCDA) were studied at individually with the purpose of comparing the efficiency of the various desalination systems with that of the energy sources as given in Table 4. In MCDA part of the study, Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS) method was used to assess the desalination technologies. In this study, the environmental factors were found as the most important with highest weight followed by the social and economic factors. The results indicates that RO is the best technology while MSF-based technologies are worst (Do Thi et al., 2021) as can be inferred from Table A.2 below.

Table A.2: Comparison of desalination techniques from several aspects (Abdelkareem et al., 2018; Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013; Al Washahi & Gopinath, 2017; Cherif & Belhadj, 2018)

| Type of Technology | Thermal Technology | | | | Membrane Technology | |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | MSF | MED | MVC | TVC | ED | RO |
| Type of Water | Seawater, Brackish | Seawater, Brackish | Seawater, Brackish | Seawater, Brackish | Brackish | Seawater, Brackish |
| Operation temperature (°C) | 90–110 | 70 | 70–100 | 63–70 | Ambient | Ambient |
| Typical unit size (m ³ /day) | 50,000–70,000 | 5000–15,000 | 100–3000 | 10,000–30,000 | 2–145,000 | 24,000 |
| Electrical energy consumption (kWh/m ³) | 4–6 | 1.5–2.5 | 7–12 | 1.8–1.6 | 2.6–5.5 | 5–9 |
| Thermal energy consumption (KJ/kg) | 190–390 | 230–390 | None | 145–390 | none | None |
| Electrical equivalent for thermal energy (kWh/m ³) | 9.5–19.5 | 5–8.5 | none | 9.5–25.5 | none | none |
| Total electric equivalent (kWh/m ³) | 13.5–25.5 | 6.5–11 | 7–12 | 11–28 | 2.6–5.5 | 5–9 |
| Maximum value of CO ₂ emissions (kg CO ₂ /m ³) | 24 | 19.2 | 11.5 | 21 | 5.3 | 8.6 |
| Distillate quality TDS (ppm) | ~10 | ~10 | ~10 | ~10 | 150–500 | <500 |
| Unit product cost (USD/m ³) | 0.52–1.75 | 0.52–1.01 | 2–2.6 | 0.827 | 0.6–1.05 | 0.52–0.56 |

3. In order to rank desalination plant location criteria in the United Arab Emirates (UAE), Dweiri et al. (2018) created a multi-criteria decision support system (DSS) by taking into account social, environmental, economic, technical, and operational factors. Their results show that the most

significant aspects of desalination plant location criteria are technical (21.9%) and economical (20.9%). Additionally, the most important sub-criteria of environmental, social, economic, technical, and operational aspects are wastewater discharge (22.2%), life species (13.3%), real cost of water and government subsidy (18%), quality and quantity of fresh water (12.4%), and water supply network (9%) respectively (Dweiri et al., 2018).