



**Programme des
Nations Unies pour l'environnement
Plan d'Action pour la Méditerranée**

Distr. : générale

22 mai 2023

Original : anglais

Réunion des points MED POL focaux

Athènes, Grèce, 24-26 mai 2023

Ordre du jour 7 : Lignes directrices techniques

Lignes directrices sur les normes réglementaires pour les rejets des usines de dessalement et systèmes d'aide à la décision pour des technologies de dessalement durables en Méditerranée

Pour des raisons environnementales et économiques, ce document est imprimé en nombre limité. Les délégués sont priés d'apporter leurs copies aux réunions et de ne pas demander de copies supplémentaires.

Note du Secrétariat

La 22^e Réunion ordinaire des Parties contractantes à la Convention pour la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée et à ses Protocoles (COP 22, Antalya, Turquie, 7-10 décembre 2021) a adopté la Décision IG 25/19 sur le Programme de travail et le Budget pour l'exercice biennal 2022-2023. Les Parties contractantes ont demandé l'élaboration de normes régionales sur les technologies de dessalement et de normes environnementales disponibles pour le rejet de saumure dans l'environnement marin.

Dans cette optique, le Secrétariat a préparé la présente Ligne directrice en s'appuyant sur les précédentes Lignes directrices actualisées sur les activités de dessalement (IG.23/13, COP20, Tirana, Albanie, 17-20 décembre 2020) en recommandant des technologies de dessalement éprouvées et en proposant des normes de rejet communes à établir, le cas échéant, au niveau régional. En outre, cette ligne directrice fournit un contexte plus large pour les aspects de technologies de dessalement de pointe disponibles et leur mise en œuvre possible et les systèmes d'aide à la décision (DSS) visant à aider les décideurs politiques/exploitants d'installations dans la sélection des technologies de traitement appropriées pour parvenir à un dessalement durable.

La ligne directrice sur les normes réglementaires pour les rejets des usines de dessalement et les systèmes d'aide à la décision pour les technologies de dessalement durables en Méditerranée a été présentée à la « Réunion régionale pour examiner les lignes directrices sur les technologies de traitement disponibles pour les eaux usées urbaines et les boues, le prétraitement industriel, les normes environnementales et les technologies de traitement de dessalement disponibles » (Ankara, 22-23 novembre 2022). La réunion a approuvé le document et a demandé au Secrétariat d'approfondir les aspects techniques suivants :

1. *Recueillir les VLE pour les rejets de dessalement des pays méditerranéens en tenant compte du lieu de rejet et des paramètres supplémentaires discutés et convenus au cours de la réunion et proposer une fourchette de valeurs consolidée au niveau sous-régional.* Le Secrétariat a répondu à cette demande en recueillant des VLE supplémentaires pour les rejets de dessalement de Chypre et d'Israël, afin de mettre à jour les VLE recommandées pour les rejets, telles qu'elles sont présentées dans le tableau 3 de la ligne directrice.
2. *Proposer une fréquence d'échantillonnage (le cas échéant) pour les opérateurs de dessalement en vue d'une surveillance régulière des paramètres obligatoires.* Le Secrétariat a ajouté une colonne au tableau 3 recommandant des fréquences minimales obligatoires pour les paramètres convenus.
3. *Inclure les « plans d'urgence », la « surveillance des rejets de saumure » et les « consultations publiques » dans le processus d'EIE à l'annexe III du rapport.* Le Secrétariat a redéfini les étapes proposées pour l'EIE dans l'annexe III, en ajoutant les processus demandés, le cas échéant. En outre, à la demande de la réunion, l'annexe III est traduite en français.

Le Secrétariat a partagé la version finale de la ligne directrice avec les parties contractantes pour « non-objection », conformément à la recommandation de la réunion. Malgré la « non-objection » reçue, Malte a demandé au Secrétariat d'envisager, le cas échéant, l'introduction de l'approche « évaluation basée sur le risque » pour l'établissement des VLE pour les rejets de dessalement. En réponse à cette demande, le Secrétariat a introduit un texte spécifique invoquant l'approche de l'évaluation basée sur le risque, le cas échéant. Ce texte est présenté [crochets] dans la section 4.1 sous le tableau 3 pour examen et approbation par les points focaux MED POL.

La ligne directrice sur les normes régionales pour les rejets des usines de dessalement et les systèmes d'aide à la décision pour les technologies de dessalement durable en Méditerranée est présentée ici aux points focaux MED POL pour examen et approbation en vue de son utilisation par les Parties contractantes à l'appui de la mise en œuvre du dessalement durable en Méditerranée, conformément à la décision IG.23/13 : « Lignes directrices actualisées sur la gestion des activités de dessalement adoptées par la COP20 (Tirana, Albanie, 17-20 décembre 2017) . »

Table des matières

	Pages
1. Introduction	
2. Dessalement de l'eau de mer - Faits et chiffres	1
3. Technologies de dessalement et leur mise en œuvre possible dans le cadre de solutions de dessalement durables	3
3.1 Technologies de dessalement courantes	3
3.2 Technologies nouvelles et émergentes de dessalement de l'eau de mer	3
3.3 Facteurs contribuant à un dessalement durable de l'eau de mer	4
3.3.1 Réduire les incidences sur l'environnement	4
3.3.2 Gestion durable des saumures : eau, énergie et récupération des minéraux	5
3.3.3 Améliorer l'efficacité énergétique	6
3.3.4 Application des meilleures technologies disponibles (MTD) et mise en œuvre des meilleures pratiques environnementales (MPE)	6
3.3.5 Atteindre les objectifs de développement durable	7
3.4 Les piliers du dessalement durable de l'eau de mer	7
3.4.1 Durabilité environnementale	7
3.4.2 Durabilité technico-économique du dessalement de l'eau de mer	8
3.4.3 Durabilité sociale du dessalement de l'eau de mer	8
3.4.4 Indicateurs de durabilité pour le dessalement de l'eau de mer	8
3.5 Outils technologiques pour un 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 des saumures	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	13
5.1 Analyse multicritère (MCA) pour le dessalement de l'eau de mer	13
5.1.1 Analyse multicritère	13
5.1.2 Méthodologie et procédure de la MCA	13
5.1.3 Modèles de MCA	14
5.1.4 Analyse de sensibilité	14
5.2 Analyse du cycle de vie pour le dessalement de l'eau de mer	14
5.2.1 L'analyse du cycle de vie dans le contexte de la prise de décision	14
5.2.1.1 Définition et principes de l'ACV	17
5.2.1.2 Frontière du système de dessalement	17
5.2.1.3 Évaluation de l'impact du dessalement	18
5.2.2 Faisabilité de l'application de l'ACV au dessalement	20
5.2.3 Fiabilité des résultats de l'ACV pour le dessalement	20
5.2.4 Analyse de sensibilité et d'incertitude	20
5.2.5 Défis et perspectives d'avenir d'une ACV de la technologie de dessalement	21
Références	23

Abréviations et acronymes

AD	Dessalement par adsorption
MTD	Meilleures techniques disponibles
MPE	Meilleures pratiques environnementales
BRO	Osmose inverse en discontinu
CDI	Déionisation capacitive
CHD	Dessalement à l'hydrate de clathrate
CdP	Conférence des Parties
DSS	Système d'aide à la décision
ED	Électrodialyse
AEE	Agence européenne pour l'environnement
EIA	Évaluation de l'impact sur l'environnement
EMP	Plans de surveillance de l'environnement
UE	Union européenne
FD	Dessalement par congélation
FEI	Impact sur l'écosystème d'eau douce
FO	Osmose directe
FWI	Impact du prélèvement d'eau douce
BEE	Bon état écologique
GES	Émissions de gaz à effet de serre
GWI	Global Water Intelligence
HDH	Humidification Déshumidification
IDA	Association internationale du dessalement
IMAP	Programme intégré de suivi et d'évaluation
LBS	Protocole des sources terrestres
ACL	Analyse du cycle de vie
LCC	Coût du cycle de vie
LCI	Inventaire du cycle de vie
EICV	Évaluation de l'impact du cycle de vie
LCSA	Évaluation durable du cycle de vie
MCA	Analyse multicritère
MD	Distillation à membrane
MED	Distillation à effets multiples
MED POL	Programme d'évaluation et de maîtrise de la pollution marine dans la région méditerranéenne
MSF	Distillation flash à plusieurs étages
PRO	Osmose retardée par la pression
RED	Électrodialyse inversée
RO	Osmose inverse
SCWD	Dessalement de l'eau supercritique
SED	Extraction par solvant Désalinisation
SLCA	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
ZLD

Directive-cadre sur l'eau
Zéro rejet de liquide

1. Introduction

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

2. L'objectif de la ligne directrice actualisée en 2017 était de mieux décrire les efforts de dessalement autour de la Méditerranée et d'évaluer leurs impacts sur l'environnement côtier et marin. La ligne directrice actualisée a également servi à fournir des informations aux parties contractantes sur la réalisation d'études d'impact sur l'environnement (EIE) pour la mise en œuvre de projets de dessalement, y compris les exigences en matière de surveillance de l'environnement.

3. En complément des lignes directrices de 2017, cette ligne directrice présente les normes régionales pour les rejets des usines de dessalement et les systèmes d'aide à la décision pour les technologies de dessalement durable dans la région méditerranéenne. Cette ligne directrice, qui complète les lignes directrices de 2017, repose sur les trois piliers suivants :

- a. les technologies de dessalement de pointe disponibles et leur mise en œuvre possible dans le cadre de solutions de dessalement durables. Dans cette section, les concepteurs et les exploitants d'usines de dessalement reçoivent des informations sur les nouvelles technologies de dessalement de l'eau de mer, les facteurs contribuant au dessalement durable de l'eau de mer, les piliers du dessalement durable de l'eau de mer en tenant compte également des valeurs limites d'émission utilisées par les Parties contractantes (annexe V), 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, y compris le respect des modifications apportées aux annexes du protocole « tellurique » ; les valeurs limites d'émission recommandées sur la base des normes régionales en vigueur pour le dessalement de l'eau de mer ; ainsi que des orientations pour la mise en œuvre de programmes de surveillance régulière des rejets provenant des installations de dessalement ; et
- c. Recommandations sur les systèmes d'aide à la décision (DSS) basés sur l'analyse multicritère (MCA) et l'analyse du cycle de vie (ACV) dans le but d'aider les décideurs politiques/exploitants d'installations à appliquer les meilleures technologies appropriées pour parvenir à un dessalement durable dans le respect des cadres juridiques et des réglementations nationales/régionales.

2. Dessalement de l'eau de mer - Faits et chiffres

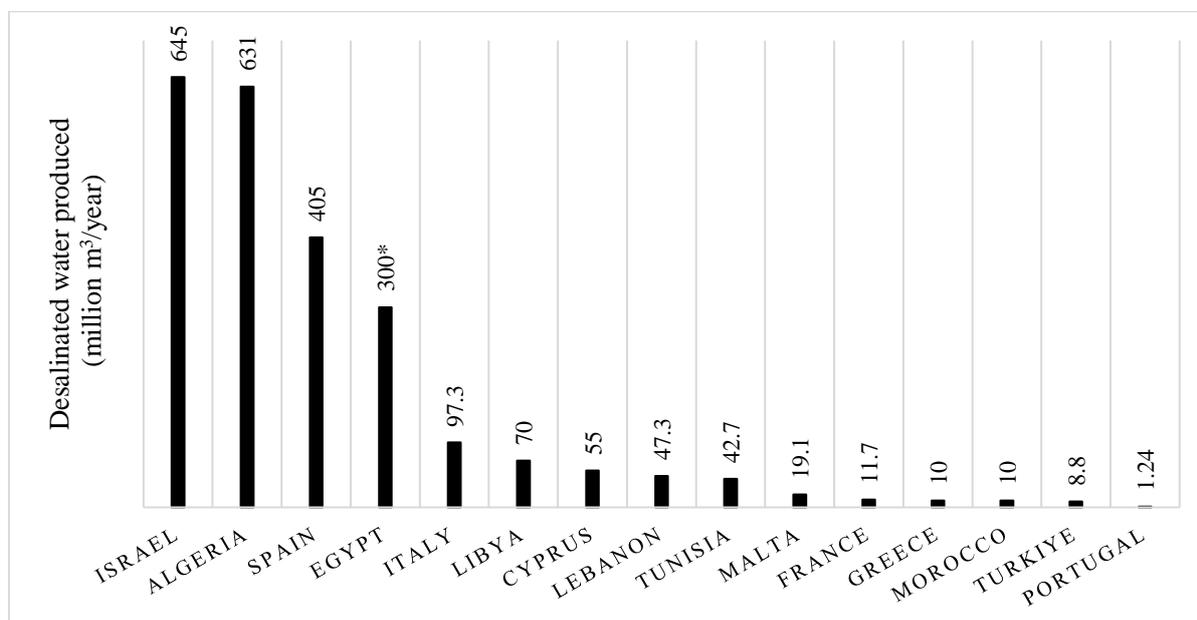
4. Le dessalement peut être divisé en deux catégories en fonction de la source d'eau d'alimentation : le dessalement de l'eau de mer et le dessalement de l'eau saumâtre. Il existe 15 906 usines de dessalement en activité dans le monde, avec une capacité totale de dessalement d'environ 95,37 millions de m³/jour (34,81 milliards de m³/an), ce qui représente 81 % et 93 % du nombre total et de la capacité des usines de dessalement jamais construites respectivement (Jones et autres, 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 les eaux fluviales dures représentent 8 % des 1825 usines, tandis que le dessalement des eaux saumâtres représente 21 % des 5 960 usines (Elsaid, Kamil, et autres, 2020). Ce document constitue un guide complet du processus de dessalement de l'eau de mer.

5. Si le dessalement de l'eau saumâtre, de l'eau de rivière, des eaux usées et de l'eau salée a 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, avec une production de 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 la fin de 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 d'un contrat et ont été mises en service dans le monde entier rien qu'entre janvier 2019 et février 2020, ajoutant 5,2 millions de m³/jour à la capacité installée (Eke et autres, 2020).

6. 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 de fonctionnement globale des usines installées était estimée à 93 % de la capacité installée, avec une capacité de dessalement cumulée de 99,8 millions de m³/jour (en tenant compte des installations achevées depuis 1965). Les capacités mondiales installées et cumulées de dessalement pour la production d'eau douce à la mi-février 2020 ont été fournies par 20 971 projets, et étaient respectivement de 97,2 millions de m³/jour et de 114,9 millions de m³/jour. Sur ces 20 971 projets, 16 876 ont été installés (Eke et autres, 2020).

7. 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 de Elsaie et autres, 2022).



* Les données pour l'Égypte proviennent d'une étude d'Elsaie et autres, 2022

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

8. Un rapide coup d'œil sur l'état du dessalement dans la région montre qu'Israël, l'Algérie, l'Espagne et l'Égypte sont les principaux producteurs d'eau dessalée dans la région méditerranéenne. La capacité annuelle de dessalement d'Israël représente environ 80 % de la consommation totale d'eau urbaine (Miller et autres, 2015). En Algérie et au Maroc, 85 % et 60 % des usines de dessalement utilisent respectivement l'eau de mer comme source d'alimentation (Dhakal et autres, 2022). L'Espagne possède les usines de dessalement les plus importantes 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 autres, 2017). En Libye, la technologie du dessalement est utilisée depuis le début des années 1960, bien que peu d'usines de dessalement aient été créées depuis lors. Au total, la Libye compte actuellement environ 21 usines de dessalement en activité, dans lesquelles les procédés thermiques représentent environ 95 % de la capacité de production, tandis que la technologie membranaire de l'osmose inverse en représente 5 % (Brika,

2018). En Égypte, plus de 90 usines de dessalement d'eau de mer sont opérationnelles (Elsaie et autres, 2022). À Malte, l'eau dessalée représente jusqu'à 60 % de l'approvisionnement en eau potable.

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

9. Dans cette section, les technologies de dessalement disponibles, en particulier les nouvelles technologies de dessalement de l'eau de mer, sont présentées dans le but d'explorer leur possible mise en œuvre dans le contexte d'un dessalement durable. À cette fin, les facteurs contribuant au dessalement durable de l'eau de mer, les trois piliers du dessalement durable de l'eau de mer, les indicateurs de durabilité pour le dessalement de l'eau de mer, ainsi que les outils technologiques pour le dessalement durable de l'eau de mer sont examinés.

3.1 Technologies de dessalement courantes

10. La « Ligne directrice actualisée sur la gestion des activités de dessalement » (2017) fournit une vue d'ensemble des technologies de dessalement thermique et membranaire les plus courantes, notamment la distillation flash multi-étagée (MSF), la distillation à effets multiples (MED), ainsi que l'osmose inverse (RO) et l'électrodialyse (ED).

11. L'osmose inverse (RO) est de loin la technologie de dessalement la plus dominante, représentant dans le monde 84 % du nombre total d'usines de dessalement opérationnelles et produisant 69 % (65,5 millions de m³/jour) de la totalité de l'eau dessalée dans le monde. Malgré leur petit nombre, les deux principales technologies thermiques, la distillation flash à plusieurs étages (MSF) et la distillation à effets multiples (MED), produisent la majorité de l'eau dessalée restante, avec des parts de marché de 18 % et 7 %, respectivement (Jones et autres, 2019).

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

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

13. L'intérêt pour les technologies émergentes s'est accru en raison de la demande croissante de dessalement et des problèmes de consommation d'énergie, d'encrassement et de rejet de saumure que posent les technologies existantes. Pour relever les défis actuels des technologies RO, MED et MSF, l'accent a été mis sur le développement de procédés à faible consommation d'énergie. Les technologies de dessalement émergentes ont le potentiel de concurrencer les technologies conventionnelles pour le dessalement de l'eau de mer, ou de surpasser ces technologies dans certains créneaux ; cependant, leur transition vers une utilisation à grande échelle dépend de nouvelles avancées scientifiques pour atteindre les seuils de performance et d'efficacité énergétique (Ahmed et autres, 2021).

14. La distillation membranaire (MD), l'osmose directe (FO), le dessalement par adsorption (AD), la désionisation capacitive (CDI), le dessalement par congélation (FD), la déshumidification par humidification (HDH), le dessalement des hydrates de clathrate (CHD), l'osmose inverse par lots (BRO), le dessalement solaire thermique (STD), le dessalement par extraction de solvant (SED), le dessalement de l'eau supercritique (SCWD) sont plusieurs technologies de dessalement émergentes qui en sont encore en grande partie au stade de la recherche et du développement. Une description détaillée des technologies émergentes susmentionnées est présentée à l'annexe I.

15. Les technologies de prétraitement, telles que l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF), la filtration ionique (IF) et le Zero Liquid Discharge (ZLD) ont également été explorées pour augmenter l'efficacité des usines de dessalement (Eke et autres, 2020 ; Park et autres, 2022).

16. En outre, les systèmes hybrides qui combinent diverses sources d'énergie et technologies de dessalement semblent offrir les solutions les plus prometteuses. Des systèmes hybrides innovants fonctionnant à l'énergie solaire (ou éolienne), associés à des procédés de dessalement très efficaces,

sont prometteurs dans les régions où l'eau est de plus en plus rare et où le rayonnement solaire est élevé. En outre, des recherches sont menées dans le monde entier pour accroître l'efficacité des processus de dessalement couramment utilisés (tels que la RO) et pour trouver de nouvelles solutions, telles que les batteries de dessalement métal-air et le dessalement via les hydrates de gaz, ainsi que de nouveaux matériaux, tels que l'impression 3D pour la séparation des membranes, les nanotubes de carbone, la distillation directe par contact basée sur les membranes composites à fibres creuses Janus, les membranes en graphène monocouche et les membranes nanofibres (Bundschuh et autres, 2021).

17. L'élimination de la saumure dans le cadre du dessalement de l'eau de mer est une question très importante en raison de son impact négatif sur l'environnement. Par conséquent, une approche alternative et plus durable a été envisagée pour atténuer les effets des rejets de saumure. Cette méthode est connue sous le nom de « zéro rejet liquide » (ZLD). Des informations plus détaillées sur l'approche ZLD figurent également à l'annexe I.

3.3 Facteurs contribuant à un dessalement durable de l'eau de mer

3.3.1 *Réduire les incidences sur l'environnement*

18. 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 autres, 2018 ; Panagopoulos et autres, 2019). Toutefois, les principaux impacts environnementaux des procédés de dessalement de l'eau de mer sont l'impaction et l'entraînement lors de la prise d'eau de mer, les effets des rejets de saumure et de produits chimiques, les changements dans la qualité de l'eau de mer, les effets négatifs sur les ressources halieutiques, la dégradation des habitats marins en raison des concentrations toxiques de saumure, les émissions de polluants atmosphériques attribuées à la demande énergétique des procédés (Elsaid, Kamil, et autres, 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 autres, 2019). Compte tenu de la croissance rapide attendue de l'industrie du dessalement, la composition chimique de la saumure suggère qu'elle peut avoir des avantages économiques et écologiques (Ayaz et autres, 2022). La construction d'une installation de dessalement de l'eau de mer nécessite la mise en place d'infrastructures sous-marines telles que des canalisations, des sorties et des prises d'eau. La manière dont ils sont construits peut inclure des techniques potentiellement dangereuses telles que le dragage, les batardeaux et l'excavation d'habitats sensibles. Ces problèmes peuvent être atténués en utilisant des technologies de canalisation souterraine telles que le forage directionnel horizontal (HDD) et le micro-tunnelage. Le PNUE/PAM a élaboré une ligne directrice intitulée « Méthodes et techniques communes pour l'évaluation et la surveillance des effets néfastes des activités d'immersion » (PNUE/MED WG. 509/41) qui vise à aider les Parties contractantes à surveiller les opérations de dragage des ports, des chenaux de navigation et des projets d'infrastructure tels que les câbles et les oléoducs.

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

20. En ce qui concerne la prise d'eau de mer (Kress, 2019), et compte tenu de la nature de l'environnement local dans la zone de prise d'eau, de la capacité de prise d'eau, du type de prise d'eau et de la structure, les recommandations suivantes peuvent être envisagées :

- a. Installer la structure de prise d'eau dans les zones d'eaux profondes et/ou avec une productivité et une sensibilité biologiques moins importantes.
- b. Installer des mécanismes de dérivation pour permettre le retour des organismes qui ont été touchés dans le site de prise d'eau.

- c. Diminuer la vitesse d'écoulement des effluents ; 0,15 m/s est suggéré pour que les poissons puissent résister à l'impaction en fonction du site.
- d. Installer des barrières comportementales, telles que des capteurs de vitesse horizontaux qui produisent moins d'impact que les capteurs de vitesse verticaux, et des équipements générateurs de sons et de lumière pour maintenir les organismes à l'extérieur.
- e. Situer la prise d'eau dans une région hydrologiquement active où les courants et les vagues sont forts.
- f. Réduire au minimum les prélèvements excessifs et le drainage de l'eau douce du réservoir souterrain.
- g. Planification et positionnement appropriés de la prise d'eau.
- h. Utilisation de matériaux de haute qualité, résistants à la corrosion et à l'érosion.
- i. Appliquer une maintenance appropriée et périodique.
- j. Envisager de remplacer la prise d'eau en saillie par une prise d'eau souterraine, telle que les « galeries d'infiltration sur le fond marin », les « puits collecteurs radiaux » et les « puits HDD ».

21. En ce qui concerne la gestion de la saumure (Elsaid, Sayed, et autres, 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 envisagées en tenant compte également de l'emplacement du site :

- 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 les saumures issues des procédés de dessalement thermique.
- e. Performance du traitement de la saumure pour l'élimination des composants toxiques.
- f. Procéder à une planification et à un positionnement appropriés du bassin de déversement, notamment en minimisant l'effet de la salinité/la dilution optimale par une planification adéquate des diffuseurs et en fixant le niveau de salinité requis à l'aide de « modèles de champ proche », en tenant compte des effets synergiques.
- g. Effectuer un traitement en amont pour éliminer les matières en suspension (TSS), les résidus de coagulant et de flocculant (par exemple, fer (Fe), anthracite, etc., minimiser également la contamination par la couleur), et réduire la turbidité (par exemple, lavage à contre-courant de l'ultrafiltration) et les lavages au calcaire avant le déversement.
- h. Appliquer un antitartre sans phosphate (P) ou polyphosphate et à teneur réduite en phosphore.
- i. Assurer le contrôle de la qualité du contenu des additifs et minimiser les apports de polluants (par exemple, métaux lourds, P, N).
- j. Empêcher l'affouillement des fonds marins.

22. Il convient de noter qu'une conception adéquate de l'usine peut réduire considérablement le piégeage des organismes marins à la prise d'eau et permettre la dilution rapide de la saumure rejetée à l'exutoire, réduisant ainsi les impacts environnementaux d'une seule usine de dessalement sur l'écosystème marin local. Cependant, plusieurs usines de dessalement qui se déversent dans une seule masse d'eau à circulation limitée augmenteront la salinité de la masse d'eau en raison de l'effet cumulatif de plusieurs usines de dessalement, augmentant ainsi la susceptibilité des mers semi-fermées, telles que la mer Méditerranée, à l'augmentation des niveaux de sel. (Gies, 2019).

3.3.2 Gestion durable des saumures : eau, énergie et récupération des minéraux

23. Il est actuellement essentiel d'utiliser une stratégie de gestion de la saumure différente 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 de développer une stratégie pour diminuer le volume de saumure tout en récupérant des ressources précieuses telles que l'eau, les minéraux, les sels, les métaux et même l'énergie.

24. 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 la RO, (2) les procédés thermiques comme l'évaporation et la distillation sur membrane (MD), (3) les procédés électrochimiques basés sur le potentiel, et (4) les procédés physico-chimiques comme l'adsorption, l'échange d'ions, etc. Actuellement, l'extraction des quatre métaux les plus concentrés (Na, Mg, Ca et K) dans la saumure se fait sous forme de Cl^- et de SO_4^{2-} . En outre, des éléments mineurs, notamment Li, U, Sr, Ru et Rb, ont été spécifiquement isolés à partir du concentré de dessalement de l'eau de mer.

25. La récupération d'énergie (également connue sous le nom d'« énergie bleue » et d'« énergie du gradient de salinité ») a également fait l'objet d'une attention récente, en plus de la récupération de l'eau, des métaux et des minéraux dans le flux de saumure des processus de dessalement de l'eau de mer. L'intérêt pour les technologies de récupération d'énergie basées sur le gradient de salinité du concentré SWRO par un système de récupération d'énergie a augmenté régulièrement ces dernières années comme moyen de minimiser l'utilisation de l'énergie et de maximiser les avantages de la saumure de dessalement de l'eau de mer. La consommation totale d'énergie des quelque 308 millions de kWh/jour des usines SWRO, qui sont largement utilisées dans le monde entier, est estimée à 40,7 millions de kWh/jour (Wan & Chung, 2016).

3.3.3 Améliorer l'efficacité énergétique

26. L'amélioration de l'efficacité énergétique des technologies de dessalement actuelles et le développement de nouvelles approches pour le dessalement de l'eau de mer sont essentiels pour la durabilité 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. En outre, le dessalement de l'eau de mer peut réduire considérablement sa contribution à la pollution en minimisant sa dépendance à l'égard des combustibles fossiles conventionnels (Ayaz et autres, 2022). On estime que l'utilisation de sources d'énergie renouvelables pourrait permettre d'éviter jusqu'à 99 % du dioxyde de carbone produit par les procédures de dessalement (Elmaadawy et autres, 2020). À l'échelle mondiale, de nombreuses installations de dessalement de petite et 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 la Global Clean Water Desalination Alliance (GCWDA) ait fixé un objectif de 20 % pour toutes les nouvelles usines de dessalement construites entre 2020 et 2025 afin qu'elles soient alimentées par des sources renouvelables, la part globale actuelle d'énergie renouvelable utilisée pour les opérations de dessalement est inférieure à 1 % (Ayaz et autres, 2022). Actuellement, le solaire photovoltaïque représente 43 % des principales sources renouvelables utilisées pour le dessalement, suivi du solaire thermique avec 27 % et de l'éolien avec 20 % (Khan et autres, 2018).

3.3.4 Application des meilleures technologies disponibles (MTD) et mise en œuvre des meilleures pratiques environnementales (MPE)

27. Les critères pour définir les meilleures techniques disponibles (MTD) et les meilleures pratiques environnementales (MPE) sont spécifiés à l'annexe III du protocole « tellurique » tel que modifié 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.

28. Le protocole « tellurique », tel qu'amendé en 2021, met l'accent sur la prévention ou la réduction des impacts environnementaux à tous les stades du cycle de vie d'un produit, sur l'optimisation de la valeur des produits, des matériaux et des ressources au sein de l'économie, et sur la réduction de la production de déchets. Cet aspect s'applique également aux usines de dessalement. En

ce qui concerne la détermination des MTD, en général ou dans des cas particuliers, le protocole « tellurique » modifié de 2021 fait état des considérations spéciales suivantes, qui s'appliquent également aux usines de dessalement :

- a. les dates de mise en service des installations nouvelles ou existantes ;
- b. la consommation et la nature des matières premières utilisées dans le processus et son efficacité énergétique ;
- c. la nécessité de prévenir ou de réduire l'impact global des rejets sur l'environnement et les risques qu'il encourt ;
- d. la nécessité de prévenir les accidents et de minimiser leurs conséquences sur l'environnement ;
- e. la nécessité de garantir la santé et la sécurité sur le lieu de travail ;
- f. la nécessité d'utiliser des substances non toxiques en vue de faciliter les flux de déchets non toxiques afin de faciliter la récupération et le recyclage ; et
- g. la nécessité de maintenir le matériel et les produits en service le plus longtemps possible.

29. En ce qui concerne la sélection des MPE pour les cas individuels, le protocole « tellurique », tel qu'amendé en 2021, encourage l'utilisation de labels écologiques, l'éco-conception et l'éco-innovation pour identifier les produits respectueux de l'environnement et la mise en place d'une collaboration tout au long de la chaîne de valeur pour garantir la traçabilité de l'origine et de la valeur des matières premières lorsque la boucle est bouclée, sont ajoutés en tant qu'aspects. La mise en œuvre des MPE susmentionnées est essentielle pour le fonctionnement durable des usines de dessalement.

3.3.5 *Atteindre les objectifs de développement durable*

30. Le dessalement contribue directement à la réalisation de l'ODD 6 (accès à l'eau potable) et à l'adaptation au changement climatique (ODD 13). Le dessalement permet de fournir de l'eau potable dans les régions soumises à un stress hydrique, ce qui est une condition préalable au développement socio-économique, à l'activité industrielle et à la production agricole. En outre, la construction de nouvelles capacités de dessalement peut réduire la demande en sources d'eau conventionnelles telles que les aquifères souterrains, les lacs et les rivières. En outre, le dessalement peut également contribuer à l'adaptation au changement climatique pour les raisons mentionnées ci-dessus (NATIXIS, 2020).

31. En outre, le dessalement offre divers avantages connexes, contribuant indirectement à la réalisation de plusieurs autres ODD. Les installations de dessalement peuvent être construites de manière à disposer d'un parc éolien ou d'une centrale solaire adjacents, ce qui contribuera à accroître l'utilisation d'énergies propres (ODD 7). Le dessalement, lorsqu'il est alimenté par une énergie propre, peut conduire à des villes et des communautés plus durables (ODD 11) dans ces régions en fournissant un approvisionnement fiable en eau potable. En outre, un soutien politique à long terme en faveur du dessalement peut également encourager l'innovation et contribuer à la création d'acteurs industriels locaux, ce qui favorisera la croissance économique (ODD 8), ainsi que le développement industriel, l'innovation technologique et la construction d'infrastructures (ODD 9) (NATIXIS, 2020).

3.4 Les piliers du dessalement durable de l'eau de mer

32. Les trois piliers du développement durable sont abordés dans cette section dans le but de fournir des conseils sur la mise en place de solutions de dessalement durables. Il s'agit de : (i) la durabilité environnementale ; (ii) la durabilité technico-économique ; et (iii) la durabilité sociale.

3.4.1 *Durabilité environnementale*

33. Ces dernières années, le dessalement de l'eau de mer a gagné en importance en raison de l'augmentation 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) dans de nombreux pays, qui rejettent du dioxyde de carbone. La quantité moyenne de

combustible fossile nécessaire pour produire 1000 m³ (ou 1 million de litres) d'eau par jour à l'aide du dessalement thermique est d'environ 10 000 tonnes par an (Tal, 2018). Même avec une RO à haut rendement énergétique, le dessalement de chaque 1000 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, les émissions mondiales de CO₂ provenant des installations de dessalement alimentées par des combustibles fossiles devraient s'élever à 76 millions de tonnes. En outre, en supposant que les opérations se poursuivent dans les conditions actuelles, la quantité de CO₂ peut atteindre 218 millions de tonnes d'ici 2040 (Ayaz et autres, 2022). Les installations de dessalement de l'eau de mer doivent donc utiliser des sources d'énergie renouvelables ou des combustibles à faibles émissions, comme le gaz naturel, afin de réduire leur impact sur l'environnement. En l'absence de sources d'énergie renouvelables ou de combustibles à faibles émissions, des installations de traitement des émissions atmosphériques doivent être mises en place.

34. Par conséquent, les principaux problèmes de durabilité 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 autant d'activités directement liées qui doivent être prises en 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 Durabilité technico-économique du dessalement de l'eau de mer

35. Les principaux problèmes de durabilité technico-économique du dessalement de l'eau de mer sont le coût global non subventionné de l'eau dessalée, couvrant le coût croissant des autorisations (qui peuvent représenter 60 % d'un grand projet) et des produits chimiques autorisés (Lior, 2017). Divers facteurs contractuels, managériaux et technologiques influent sur les coûts de production de l'eau par dessalement de l'eau de mer. Outre les connaissances techniques, la réussite des projets de dessalement nécessite une sélection optimale du financement, du partage des risques et des accords contractuels 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 de l'infrastructure 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 contraintes hydriques sont insuffisantes (NATIXIS, 2020).

3.4.3 Durabilité sociale du dessalement de l'eau de mer

36. Le pilier social du dessalement de l'eau de mer couvre principalement les impacts sur la santé, les développements, la croissance locale et visuel l'agrément (Lior, 2017). Le dessalement doit être approuvé par la communauté, répondre à ses besoins en eau et être exploité et géré dans les limites de ses capacités pour être socialement durable (Werner & Schäfer, 2007). Toutefois, les perceptions du public à l'égard des usines de dessalement ne sont pas stables, et les prédicteurs statistiquement prouvés peuvent changer au fil du temps. En outre, le soutien du public peut varier entre les périodes d'approvisionnement en eau adéquat 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 facteur prédictif important du soutien (Haddad et autres, 2018).

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

37. Pour une évaluation complète de la durabilité environnementale, technico-économique et sociale du dessalement de l'eau de mer, les aspects suivants sont recommandés pour la formulation des indicateurs énumérés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Aspects de la durabilité environnementale, technico-économique et sociale recommandés pour la formulation d'indicateurs d'évaluation du dessalement de l'eau de mer (Lior, 2017)

Aspects de la durabilité environnementale	Aspects technico-économiques de la durabilité	Aspects de la durabilité sociale
<ul style="list-style-type: none"> a) Conservation de l'eau. b) Planification et utilisation des ressources en eau, alternatives d'approvisionnement en eau. c) Indices d'impact sur les ressources en eau : indice d'impact sur l'eau, indice d'impact sur l'écosystème d'eau douce (FEI), indice d'impact sur le prélèvement d'eau douce (FWI), empreinte hydrique. d) L'empreinte carbone. e) Impacts des déchets de construction et des sols excédentaires. f) Pollution du sol et des eaux souterraines (carburants, huiles, etc.) g) Pollution de l'air (émissions fugitives de combustion). h) Émission de bruit. i) Dommages aux antiquités et au patrimoine. j) Altération des fonds marins. k) Remise en suspension des sédiments (impacts sur la qualité des eaux marines et l'écologie). l) Altération de la zone côtière et obstruction du passage le long du littoral. m) Rejets chimiques et autres. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Coût de l'eau. b) Abordabilité. c) Politique de prix. d) Coût de l'investissement (y compris les éventuelles incitations financières). e) Coût d'exploitation (y compris les taxes, l'assurance, les garanties). f) Impact sur l'économie ; croissance et développement économiques. g) Conflits commerciaux (par exemple, utilisation et valeur des terres immédiates et environnantes, navigation, accès aux ports, pêche commerciale, aquaculture). h) Exigences en matière de prétraitement et de post-traitement. i) Fiabilité de la production. j) Distribution d'eau. k) Alternatives en matière d'approvisionnement en eau. l) Conservation de l'eau. m) Impact sur l'utilisation de l'énergie et la sécurité. n) Consommation de matériaux de construction. o) Consommation de carburant, de produits chimiques. p) Coût et prévention de la corrosion. q) L'énergie incarnée. r) Coût de la recherche et du développement (R&D). 	<ul style="list-style-type: none"> a) Santé et assainissement, par exemple, indices des populations risquant d'être affectées par le projet ; la qualité de l'eau des produits doit garantir que les niveaux d'ingrédients nocifs pour la santé sont maintenus à un minimum. b) Qualité de vie. c) L'emploi efficace et équitable, local et régional. d) Impact sur l'alimentation (coût, disponibilité, qualité). e) Éducation et formation. f) Empreinte au sol. g) L'utilisation actuelle des terres et les activités de développement prévues. h) Aménagement visuel. i) Une sécurité de l'eau équitable pour tous. j) Pauvreté. k) Relations transfrontalières. l) Effets de genre. m) Développement démographique. n) Structure de la communauté. o) Loisirs. p) Aspects culturels, y compris populations tribales et indigènes q) Paysage caractéristique et paysage naturel. r) Sécurité nationale de l'eau.

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

38. Le tableau 2 fournit une liste des outils technologiques qui peuvent être utilisés pour parvenir à des solutions durables pour le dessalement de l'eau de mer (Ayaz et autres, 2022). Il s'agit notamment de la technologie à utiliser, du processus auquel cette technologie peut être appliquée, de l'objectif et des avantages à atteindre.

Tableau 2 : Comparaison des outils technologiques permettant de trouver des solutions durables pour le dessalement de l'eau de mer (Ayaz et autres, 2022)

Technologie/ Technique	Processus cible	Objectif	Avantages
Capteurs	Par le biais de tous les processus, y compris les prises d'eau et les décharges	Surveillance d'une série de paramètres (pH, conductivité, turbidité, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> - Détection précoce de tout dysfonctionnement - Maintenir la production et l'efficacité au plus haut niveau - Extension du cycle de vie du système - Diminution des risques de sécurité et du gaspillage des ressources
Véhicules aériens autonomes (AUV) et planeurs	Prise d'eau et émissaire	<ul style="list-style-type: none"> - Identifier et aider à obtenir des données appropriées sur la qualité de l'eau pour la prise d'eau - Influences de la concentration des rejets et de la 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 - Capacité à effectuer des tâches de suivi d'une semaine à l'autre
Satellites	<ul style="list-style-type: none"> - Déterminer l'emplacement approprié pour les plantes et - Qualité de l'eau d'admission - Point de rejet de la saumure 	<ul style="list-style-type: none"> - Observer la présence de HAB et d'autres facteurs responsables de l'encrassement biologique - Mesure de la couleur des océans - Suivi de la dispersion des effluents - Analyse de la salinité des océans 	<ul style="list-style-type: none"> - Assurer un suivi à long terme, avant et après l'installation - Résolution spectrale et spatiale
Modèles et cartographie	<ul style="list-style-type: none"> - Les effets de la décharge de saumure, en particulier dans le champ lointain <p>Planification des diffuseurs basée sur des « modèles de champ proche » pour l'optimisation de la dilution</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Analyser l'impact de la saumure à grande échelle - Étude de l'impact du mélange des vents et des courants de marée - Étude de l'impact du flux oscillant de la marée dans les champs proche et lointain 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduire le coût global de la conception des émissaires - Minimiser et contrôler l'impact négatif des rejets de saumure sur l'environnement marin - Offrir des prévisions sur la région associée aux panaches d'écoulement
Observation statistique	<ul style="list-style-type: none"> - Généralement utilisé pour les émissaires - Conception et fonctionnement des membranes de dessalement 	<ul style="list-style-type: none"> - Caractérisation de l'environnement dans lequel se produit le rejet - Suivi des mesures dans le temps - Fournir une caractérisation précise entre les données et les modèles 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse de la présence du rejet et de l'impact du panache du rejet - Faciliter l'analyse des différents facteurs lors de la conception des performances opérationnelles d'une membrane de dessalement TFC

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

39. Les Parties contractantes à la Convention de Barcelone ont adopté lors de la COP22 (Antalya, Turquie, 7-10 décembre 2021) la décision IG.25/5 « Amendements aux annexes I, II et IV du Protocole relatif à la protection de la mer Méditerranée contre la pollution provenant de sources et activités situées à terre. »

40. Le secteur « dessalement de l'eau de mer » a été ajouté aux « secteurs d'activité » de l'annexe I du protocole « tellurique ». Avec l'amendement mis à jour, le dessalement de l'eau de mer est actuellement principalement pris en compte lors de l'établissement des priorités pour la préparation des plans d'action, des programmes et des mesures visant à éliminer la pollution provenant de sources et d'activités terrestres.

41. 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 l'élaboration des plans d'action, des programmes et des mesures.

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

- a. Fixer des valeurs limites d'émission (VLE) pour la saumure, également appelées « normes d'effluents » ou « normes de qualité des rejets », qui se réfèrent à des valeurs numériques pour les constituants des effluents sur le site de rejet, dans le but de les administrer, de les contrôler et de les faire respecter.
- b. Fixer des charges limites d'émission annuelles pour les constituants (par exemple le fer, le phosphore total, l'azote total et le carbone organique total) des additifs pour la saumure.
- c. 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 devrait également mettre en œuvre des procédures de sélection des sites d'activités sur la base de l'approche écosystémique et, le cas échéant, de la planification de l'espace maritime (MSP).
- d. Établir des exigences en matière de permis pour les usines de dessalement qui définissent les conditions essentielles pour l'installation et la gestion d'activités garantissant une bonne protection de l'environnement. Il s'agit notamment de 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 sur la base des objectifs écologiques et indicateurs de l'IMAP.

4.1 Valeurs limites d'émission (VLE) pour l'élimination des saumures

43. Les réglementations environnementales relatives à l'élimination de la saumure varient considérablement d'une région à l'autre. Dans la majorité des pays qui exploitent des usines de dessalement de l'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 les rejets de saumure est limitée, en particulier dans les zones écologiquement sensibles. Récemment, une méthode simple-à mettre en œuvre et à contrôler de dilution au point de retour minimum a été proposée pour réguler le rejet de saumure dans les zones sensibles (Ahmad & Baddour, 2014).

44. Dans le monde entier, les rejets de saumure ne font l'objet d'aucune réglementation, norme ou ligne directrice. Bien que les réglementations diffèrent grandement 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 millier au-dessus du niveau ambiant est généralement citée comme limite supérieure. Toutefois, la salinité absolue ou un niveau de dilution minimal sont également utilisés pour définir les limites. Le point de conformité de la salinité est

généralement spécifié à une distance fixe du rejet, comprise entre 50 et 300 mètres, et cette limite est la zone de mélange.

45. En plus des normes en vigueur dans la région, telles qu'elles figurent à l'annexe V fournie par les parties contractantes, 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 (par exemple, limites de salinité, limites de température et point de conformité pour la température) et fréquences de mesure pour la saumure (modifié d'après Jenkins et autres, 2012 avec les VLE d'Israël et de Chypre)

** [Des valeurs limites d'émission différentes, y compris pour des paramètres et des fréquences différents, peuvent être adoptées à la suite d'une évaluation fondée sur les risques, à condition que les charges d'émission totales n'aient pas d'incidence négative sur l'environnement récepteur et la santé humaine.]*

Paramètre *	VLE recommandée	Fréquence de mesure
Limite de salinité	Incrément ≤ 4 ppt	tous les 3 mois
Limite de salinité % d'augmentation par rapport à la température ambiante	Incrément ≤ 5 %	tous les 3 mois
Point de conformité pour la salinité (par rapport à la décharge et au courant principal)	50-300 m	-
Limite de température (°C), au-dessus de la température ambiante	$<3-10$	surveillance en ligne
Point de conformité pour la température (par rapport à la décharge et au courant principal)	300 m	-
Total des solides en suspension (TSS)	15-30 mg/L (sans prétraitement) 5-8 mg/L (avec prétraitement)	tous les 3 mois
Turbidité	15 NTU	au quotidien
pH	6,5-9	surveillance en ligne
Métaux lourds (Ag, As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn, Mg, Sn, Ba)	ne dépasse pas la concentration la plus élevée mesurée dans le flux d'alimentation en eau de mer (« eau brute »), compte tenu de la concentration calculée selon le taux de récupération	tous les 3 mois
Chlore libre	0,1 mg/L	tous les 3 mois

4.2 Surveillance de l'environnement

46. Dans le cas du dessalement, les programmes de surveillance environnementale sont principalement axés sur la détermination des impacts négatifs potentiels des rejets de saumure sur le milieu marin et sur la mise en œuvre de mesures d'atténuation appropriées lorsque de tels impacts sont identifiés. Les mesures de surveillance et de contrôle à mettre en œuvre 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.

47. Un programme de surveillance environnementale de routine doit être mis en œuvre par l'exploitant de l'installation de dessalement après le début de l'exploitation de l'installation, sur une base régulière et en conformité avec les exigences législatives applicables (par exemple, le permis de rejet en mer du concentré).

48. Les principaux outils de surveillance des procédés 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. Le programme de surveillance comprend à la fois la surveillance de l'environnement maritime, qui est un programme intégré de surveillance et d'évaluation (IMAP) dans le cadre de la convention de Barcelone, et la surveillance de la pollution à l'intérieur de l'usine de l'eau d'admission et des flux de concentrés (eau de mer, sédiments et biote).

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

49. Cette section vise à fournir des recommandations sur les systèmes d'aide à la décision (DSS) afin d'aider les décideurs /exploitants d'installations à appliquer les meilleures technologies appropriées pour parvenir à un dessalement durable dans le respect des cadres juridiques et des réglementations nationales/régionales.

50. 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 réaliser une EIE avant le lancement de tout projet de dessalement afin d'évaluer les impacts potentiels du dessalement sur l'environnement et de préconiser l'adoption de contre-mesures appropriées pour prévenir ou atténuer ces impacts (Ihsanullah et autres, 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 d'entrée et de sortie. Une fois les opérations officiellement lancées, les données collectées et/ou nouvelles serviront également de référence majeure (baseline) pour la surveillance de l'environnement.

51. L'EIE est une méthode permettant 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 produit fréquemment des quantités massives d'informations complexes, qui dépassent souvent les capacités des décideurs à les traiter et à les intégrer. Le processus décisionnel d'une EIE peut être caractérisé comme une analyse de conflit entre différents jugements de valeur car les différents décideurs et parties prenantes ont souvent des préférences divergentes à l'égard d'un projet. Un outil formalisé d'aide à la décision permettant d'intégrer de nombreux critères quantitatifs et qualitatifs ainsi que divers jugements de valeur, tel que l'analyse multicritères (MCA) et l'analyse du cycle de vie (ACV), peut faciliter le processus. L'utilisation de la MCA et de l'ACV dans le domaine du dessalement de l'eau de mer est présentée ci-dessous.

5.1 Analyse multicritère (MCA) pour le dessalement de l'eau de mer

5.1.1 *Analyse multicritère*

52. Il existe généralement un certain nombre de technologies/procédés pour le dessalement, notamment les technologies thermiques, les procédés à membrane et les technologies alternatives (Subramani & Jacangelo, 2015). Lorsqu'ils sont confrontés à de nombreuses options, les décideurs peuvent avoir du mal à choisir la meilleure technologie de dessalement. En effet, les décideurs doivent tenir compte d'une série 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. Ainsi, la sélection des technologies de dessalement est un problème décisionnel complexe (Wang et autres, 2019). La MCA 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 autres, 2017). En outre, la MCA est une méthodologie qui peut aider l'EIE de différentes manières et à différents stades (Linkov et autres, 2006). L'annexe IV présente quelques études significatives de la MCA appliquées au dessalement, tirées de la littérature.

5.1.2 *Méthodologie et procédure de la MCA*

53. La méthodologie de la MCA se compose principalement de trois étapes, comme le montre la figure 2. Le problème décisionnel est identifié, les données d'entrée sont obtenues et les alternatives peuvent être classées sur la base des données d'entrée à l'aide d'une évaluation graphique dans la première étape. Les informations sur tous les critères et toutes les alternatives, ainsi que les détails sur les préférences individuelles parmi les groupes de parties prenantes spécifiés, sont tous inclus dans les données d'entrée d'une MCA. Les alternatives sont classées à l'aide de la MCA lors de la deuxième étape, qui comprend la sélection d'un modèle de MCA et la normalisation des fonctions, l'attribution d'un poids aux critères qui représentent des jugements de valeur, et la réalisation d'une analyse de sensibilité pour déterminer la robustesse du classement. La pondération est une technique importante de la MCA et des poids numériques peuvent être attribués en utilisant des modèles de MCA 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).

5.1.3 *Modèles MCA*

54. Divers modèles MCA ont été développés pour synthétiser les données d'entrée et classer les alternatives à l'aide de diverses mesures, chacune présentant un ensemble différent d'avantages et d'inconvénients (Linkov et autres, 2006). Le processus de hiérarchie analytique (AHP), le processus de réseau analytique (ANP), la théorie de l'utilité multi-attributs (MAUT), UTA, MACBETH, PROMETHEE, ELECTRE, TOPSIS et VIKOR sont les modèles MCA les plus utilisés pour les problèmes de décision. Les modèles MCA sont classés en deux groupes : les méthodes basées sur la valeur ou la fonction d'utilité et les méthodes de classement (Linkov et autres, 2006). Des modèles hybrides peuvent également être appliqués en combinant deux ou plusieurs modèles MCA en fonction des types de problèmes décisionnels (Communities, 2009).

5.1.4 *Analyse de sensibilité*

55. L'analyse de sensibilité est une méthodologie qui permet de déterminer dans quelle mesure l'imprécision des données ou les désaccords entre les individus affectent les résultats globaux finaux. Le choix des pondérations peut être délicat, en particulier pour l'évaluation de plans ou de projets qui suscitent l'intérêt du public. Une analyse de sensibilité peut être appliquée aux poids attribués aux branches du scénario pour évaluer comment les scénarios affectent l'ordre général des alternatives. L'analyse de sensibilité peut également être utile pour résoudre les désaccords entre les groupes d'intérêt (Communautés, 2009).

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

56. L'importance de la technologie du dessalement augmente rapidement, ce qui soulève des inquiétudes quant à l'approvisionnement durable en eau douce. La modification de l'utilisation des sols, les effets sur l'environnement marin, la consommation d'énergie et la pollution sonore ne sont que quelques-uns des effets potentiels de la technologie de dessalement sur l'environnement. Sur cette base, il est nécessaire d'intégrer des mesures d'impact sur l'environnement dans le processus de dessalement en utilisant une solution praticable et une méthodologie sensée. Afin d'évaluer les performances environnementales des produits et des systèmes, y compris les technologies de dessalement, la méthodologie de l'ACV a été largement utilisée et a acquis de l'importance à ce jour. Bien que la technologie du 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 plus grande échelle. Par conséquent, l'approche ACV peut être utilisée pour proposer des stratégies de prévention de la pollution environnementale et améliorer la performance environnementale de la technologie (Aziz & Hanafiah, 2021).

5.2.1 *L'analyse du cycle de vie dans le contexte de la prise de décision*

57. 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. Par conséquent, l'ACV permet aux décideurs de minimiser ou de sélectionner différents types de résultats résultant de produits ou de services susceptibles d'avoir un impact sur l'environnement ou sur l'homme. Le contexte décisionnel

de l'ACV doit être clarifié pour éviter d'utiliser les résultats hors contexte (Pryshlakivsky & Searcy, 2021).

58. Selon certaines définitions, l'ACV est un outil d'aide à la décision plutôt qu'un dispositif permettant d'effectuer des mesures scientifiques. La personne qui prend une décision en choisissant parmi plusieurs possibilités reçoit des informations du système d'aide à la décision. Les décisions prises dans le cadre de l'ACV sont généralement présentées comme des choix de type « soit l'un, soit l'autre » lorsqu'il s'agit d'examiner les résultats. Les études comparatives de l'ACV tirent des conclusions basées sur les différences mesurées dans la même unité fonctionnelle. L'unité fonctionnelle est une unité normalisée - 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'étude ACV est déterminée par la fourniture de points de référence exacts pour les intrants et les extrants de l'unité fonctionnelle. Bien que l'unité fonctionnelle soit une unité standardisée, les affirmations 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 utilise moins d'énergie que le système B. Les utilisateurs des résultats de l'ACV doivent plutôt choisir entre des options incompatibles, comme le fait de savoir si la réduction des déchets est préférable à la qualité de l'air pour les utilisateurs des résultats. Les biais et les préférences sont naturellement introduits dans le processus de prise de décision en tant que résultat (Pryshlakivsky & Searcy, 2021).

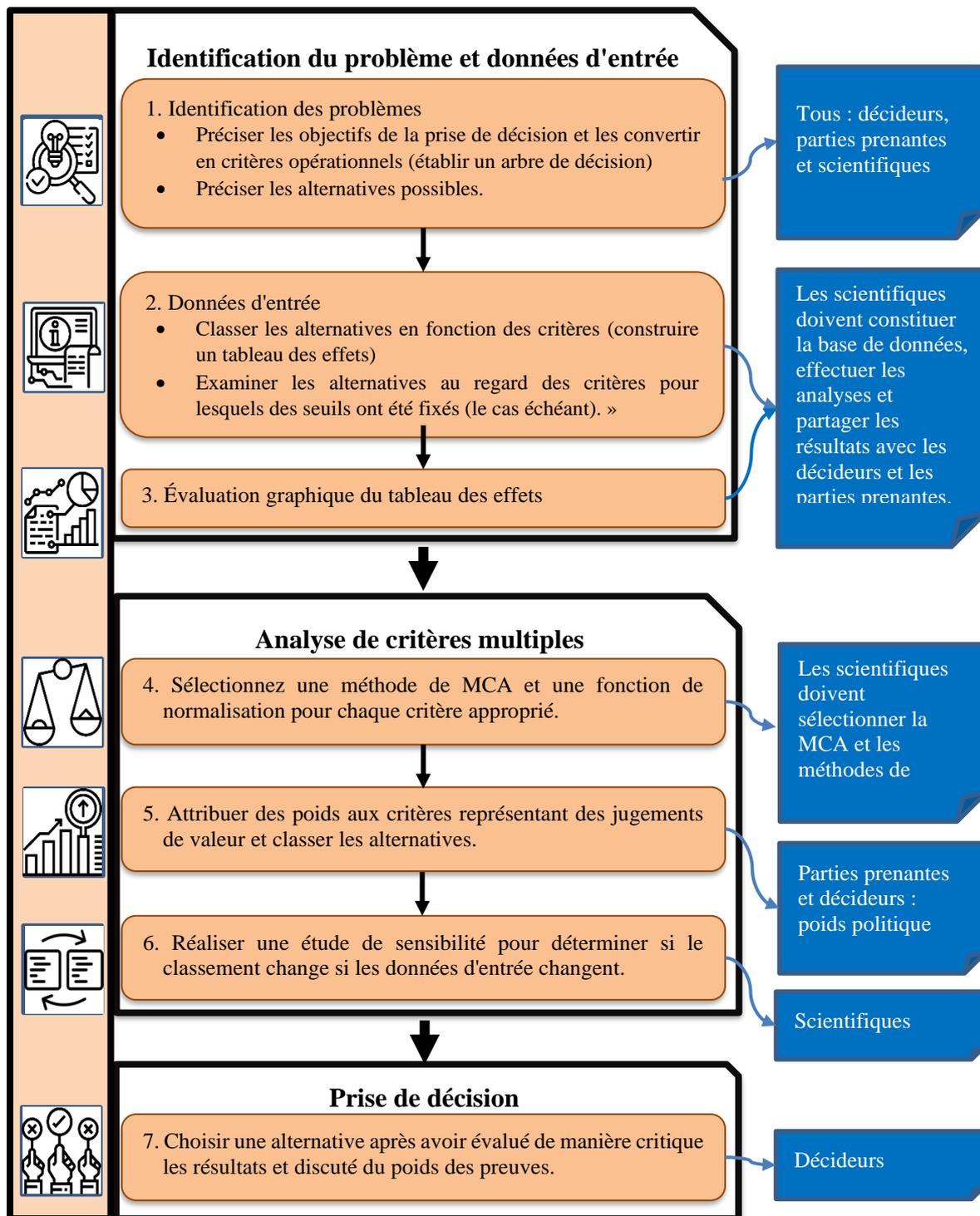


Figure 1. Méthodologie de MCA pour la prise de décision (adapté de Wang et autres, 2019)

59. La recherche sur l'ACV utilise des scénarios en plus des études prospectives et rétrospectives. Le développement de scénarios tente de cartographier des situations ou des solutions futures. Il existe plusieurs approches pour élaborer des scénarios dans le cadre de l'ACV, mais les deux plus courantes sont a) les scénarios de simulation et b) les scénarios de base (qui utilisent moins de ressources). En raison des progrès significatifs réalisés dans le domaine concerné, de l'utilisation de plans de recherche standardisés et du délai limité dans lequel les implications sont prises en compte, les scénarios d'hypothèses ont tendance à être plus simples que les scénarios de base. D'autre part, les scénarios de base manquent de développement et de connaissances dans le domaine concerné, sont complexes et

visent à approfondir les connaissances dans le domaine concerné. En outre, les scénarios de la pierre angulaire impliquent une planification stratégique, qui a des implications en termes de réalisation 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 ; en d'autres termes, la manière 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 pour la prise de décision et en particulier pour l'évaluation et la comparaison de ces systèmes.

5.2.1.1 Définition et principes de l'ACV

60. La méthode ACV est un cadre normalisé qui peut améliorer notre compréhension des effets d'un système ou d'un produit à tous les stades de sa fabrication, de son utilisation et de son élimination. L'ACV est une technique utilisée pour évaluer la manière dont les procédures de dessalement modifient ou affectent les paramètres environnementaux. L'ACV est un outil permettant 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. Les décideurs peuvent identifier les points chauds de l'environnement et élaborer des stratégies visant à réduire les effets néfastes sur l'environnement en utilisant la méthode de l'ACV (Lee & Jepson, 2021).

61. Les quatre phases de l'ACV, qui est une méthode normalisée guidée par les normes ISO 14040 et ISO 14044, sont la définition de l'objectif et du champ d'application, l'inventaire du cycle de vie (ICV), l'évaluation de l'impact du cycle de vie (EICV) et l'interprétation. Le contexte de la recherche sur l'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 du champ d'application. L'unité fonctionnelle explique l'objectif principal d'un système et permet de traiter différents systèmes comme fonctionnellement équivalents. Dans les études ACV sur le dessalement, l'unité fonctionnelle est souvent définie comme étant 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 intrants, des extrants et des activités pertinents dans le système analysé. Dans l'étape d'interprétation, les résultats de l'ICV et de l'EICV sont évalués en fonction de la manière dont l'EICV indique les impacts des charges environnementales quantifiées dans l'ICV (Lee & Jepson, 2021 ; Zhou et autres., 2014).

5.2.1.2 Frontière du système de dessalement

62. Dans les études d'ACV, quatre types différents de frontières 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 le principe « du berceau au berceau ». L'expression « du berceau à la porte » décrit la procédure qui va de l'extraction des matières premières à la phase d'exploitation de l'usine. En revanche, le terme « de la porte à la porte » se réfère uniquement à l'activité d'exploitation de l'usine. Le cycle de vie complet du système de dessalement est couvert par l'évaluation « du berceau à la tombe », qui comprend l'extraction et le traitement de l'eau de mer, le traitement, l'infrastructure de l'usine, le transport, le fonctionnement de l'usine, la distribution et l'utilisation, le démantèlement et l'élimination finale des déchets. La figure 3 illustre les limites du système de dessalement selon le principe « du berceau à la tombe » de l'ACV. Les matériaux de construction, les matériaux d'équipement et le transport des matériaux de construction vers le 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.

63. 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 autres., 2014).

5.2.1.3 Évaluation de l'impact du dessalement

64. L'ACV peut être réalisée selon deux approches, à savoir l'approche médiane (axée sur les problèmes) et l'approche finale (axée sur les dommages). Les indicateurs intermédiaires se situent quelque part sur le chemin de l'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 connue sous le nom de zone de protection, au niveau du point final. Ces indicateurs comprennent la santé humaine, la qualité de l'écosystème et la disponibilité des ressources (Aziz & Hanafiah, 2021).

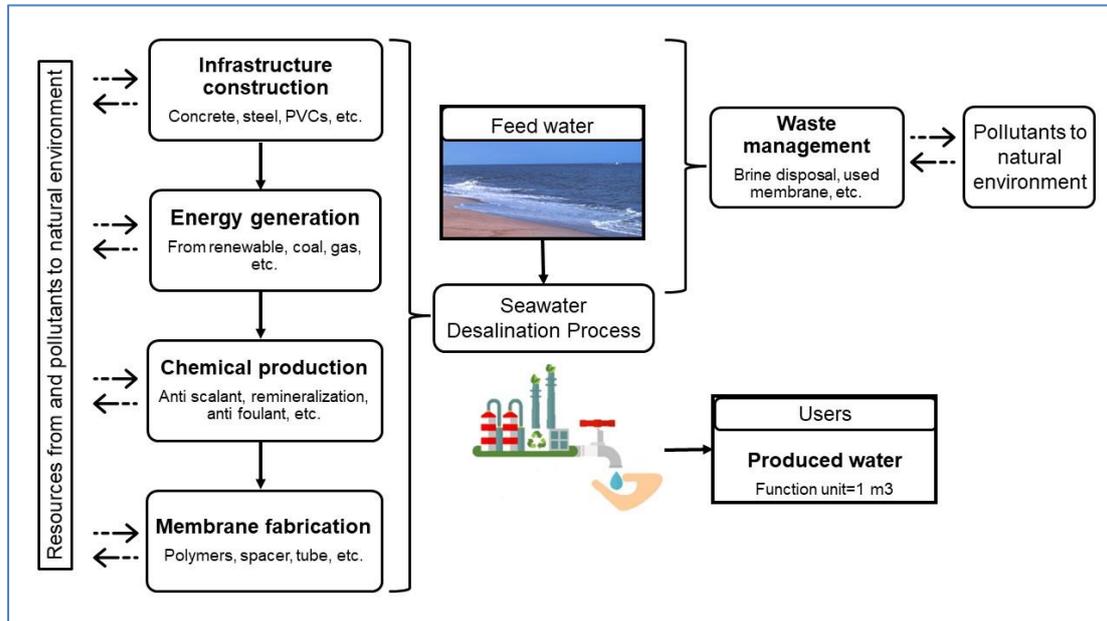


Figure 2. Frontière systémique du principe « du berceau à la tombe » de l'ACV pour le dessalement (Adapté de Zhou et autres, 2014)

65. Le développement de la technologie du dessalement a démontré qu'elle est devenue une source importante d'approvisionnement en eau douce. Cela signifie que le dessalement doit respecter les principes du développement durable. Une évaluation holistique du cycle de vie durable (LCSA), comme le montre la figure 4, peut être réalisée en combinant l'analyse du cycle de vie environnemental bien établie avec le coût du cycle de vie (LCC) et l'analyse du cycle de vie sociale (SLCA). L'ACV environnementale est réalisée à l'aide d'une unité fonctionnelle qui définit le produit ou le processus. La méthode LCC est utilisée pour calculer tous les coûts associés au cycle de vie du produit ou du processus en termes de flux monétaires réels. Dans le cas de la SLCA, 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 durabilité. En conséquence, le dessalement a dû être conçu et exploité conformément aux piliers de la durabilité en termes de perspectives environnementales, économiques et sociales (Aziz & Hanafiah, 2021).

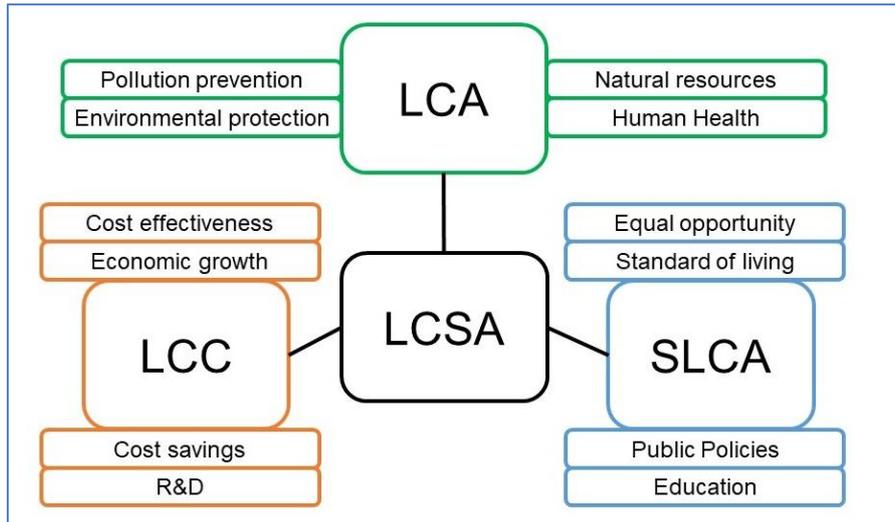


Figure 3. Les trois piliers de l'évaluation de la durabilité du cycle de vie
(Adapté de Aziz & Hanafiah, 2021)

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

66. 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 se réfère à trois éléments : les méthodes de comptabilité, les bases de données de soutien et les approches de l'EICV. 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. Les considérations importantes pour l'application de la faisabilité au dessalement sont énumérées ci-dessous (Zhou et autres, 2014)

- a. Le modèle de processus est une meilleure méthode de comptabilisation pour le dessalement, tandis que le modèle d'ACV des intrants économiques peut être utilisé comme complément en fonction de la disponibilité de la base de données des intrants économiques et du champ d'application de la recherche des praticiens.
- b. Les études d'ACV sur le dessalement, comme les autres efforts d'ACV, sont généralement gourmandes en données. Pour soutenir les processus de fond 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 considérer la représentativité de la base de données choisie.
- c. Le développement de nouvelles connaissances peut contribuer à améliorer l'évaluation de l'impact du cycle de vie. Deux caractéristiques importantes d'un système de dessalement sont 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*

67. Un autre facteur important à prendre en compte dans l'ACV du dessalement est la fiabilité. Les préoccupations à cet égard concernent principalement le caractère incomplet des limites du système, le manque de 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 autres, 2014).

- a. Il est parfois nécessaire de réduire les limites du système en ignorant un certain nombre de flux de référence entre l'arrière-plan et l'avant-plan. Du point de vue des praticiens, cette approche est intéressante car elle permet de réduire la charge de la collecte de données primaires. Toutefois, l'exclusion de certains produits chimiques, matériaux de construction et matériaux de membrane doit être effectuée avec prudence, car elle dépend fortement de l'objectif de l'étude et des catégories d'impact concernées.
- b. La représentativité temporelle et spatiale d'une base de données utilisée pour l'ACV du dessalement est importante, comme pour d'autres efforts d'ACV. La plupart des bases de données actuelles sont basées sur des données européennes datant de la fin des années 1990 ou du début des années 2000. Pour quantifier les impacts environnementaux des usines de dessalement nouvellement construites dans différents 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, telles que la manière dont les données sont acquises, la rigueur avec laquelle elles sont validées et la mesure dans laquelle les données rendent compte des variations technologiques, spatiales et temporelles. Des efforts supplémentaires sont nécessaires pour fournir des orientations et des « meilleures pratiques » en matière d'analyse d'incertitude.

5.2.4 *Analyse de sensibilité et d'incertitude*

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

- a. 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 des modèles est souvent due à l'utilisation de modèles linéaires pour décrire les liens entre les événements environnementaux et aux données agrégées sur les aspects spatiaux et temporels.
- c. Incertitude résultant de décisions méthodologiques incontournables prises dans le cadre de l'ACV, telles que les techniques de collecte de données, les limites des unités fonctionnelles et les règles de coupure.

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

70. Les deux principales procédures d'analyse pour estimer l'incertitude des résultats de l'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 l'éventail des résultats possibles sur la base de l'incertitude des données (Cellura et autres, 2011).

71. L'analyse de sensibilité évalue la robustesse des résultats en réponse à des changements potentiels dans les hypothèses sous-jacentes de chaque recherche. Certains paramètres ont été utilisés dans l'ACV du dessalement pour les tests de sensibilité : source d'électricité et bouquet énergétique, consommation d'énergie, utilisation de produits chimiques, durée de vie des matériaux, distances telles que la distance de transport, la distance de distribution, la distance de transmission 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).

72. 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 autres, 2020).

73. Compte tenu des incertitudes qui existent durant les phases de l'ICV et de l'EICV, 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 autres, 2020).

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

74. 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 a ses limites et les incertitudes de son modèle. Une ACV nécessite une grande quantité de données et d'informations détaillées, et c'est un processus qui prend du temps. En outre, une référence de normalisation, qui représente l'impact total d'une région de référence pour une catégorie d'impact particulière, 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 d'impact particulière, est à la base de l'analyse environnementale de l'ACV. Pour que les résultats des analyses ACV soient 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, citons la prise en compte globale des parties prenantes, du temps et du lieu. Pour surmonter ces obstacles, il est urgent de développer davantage de bases de données d'ICV et de modèles paramétriques d'inventaires de processus et de cycles de vie des produits.
- c. Les résultats de l'ACV doivent inclure une analyse de l'incertitude, et les praticiens de l'ACV doivent être ouverts et transparents quant à leurs limites. Par conséquent, la mise en œuvre de cette stratégie complexe et globale nécessite des connaissances spécialisées.

75. Plusieurs obstacles s'opposent encore au développement durable de l'industrie du dessalement. Par conséquent, les efforts nécessaires doivent être fournis par les concepteurs, les praticiens, les gestionnaires et les opérateurs des services publics, les acteurs du secteur de l'eau et les responsables politiques ou les décideurs. En outre, l'éducation et la sensibilisation sont essentielles à la mise en œuvre de pratiques durables et à l'intégration de paramètres de performance environnementale dans la prise de décision (Aziz & Hanafiah, 2021).

Références

- Abdelkareem, M. A., Assad, M. E. H., Sayed, E. T., & Soudan, B. (2018). Progrès récents dans l'utilisation des sources d'énergie renouvelables pour alimenter les usines de dessalement de l'eau. *Dessalement*, 435, 97-113.
- Ahmad, N. & Baddour, R. E. (2014). Examen des sources, des effets, des méthodes d'élimination et des réglementations relatives à la saumure dans les environnements marins. *Ocean & Coastal Management*, 87, 1-7.
- Ahmed, F. E., Khalil, A. & Hilal, N. (2021). Technologies émergentes de dessalement : état actuel, défis et tendances futures. *Dessalement*, 517, 115183.<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115183>
- Al-Kaabi, A. H., & Mackey, H. R. (2019). Évaluation environnementale des alternatives de prise d'eau pour l'osmose inverse de l'eau de mer dans le golfe Persique. *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). Consommation d'énergie et coût de production de l'eau des procédés de dessalement conventionnels et alimentés par des énergies renouvelables. *Revue sur les énergies renouvelables et durables*, 24, 343-356.
- Al Washahi, M. & Gopinath, A. S. (2017). Analyse de faisabilité technico-économique du dessalement solaire dans le Sultanat d'Oman. 2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition, GCCCE 2017,
- Alvarado-Revilla, F. (2015). *Marchés du dessalement 2016 : perspectives mondiales et opportunités de croissance*. Media Analytics Limited.
- Amy, G., Ghaffour, N., Li, Z., Francis, L., Linares, R. V., Missimer, T., & Lattemann, S. (2017). Dessalement de l'eau de mer par membrane : perspectives actuelles et futures. *Dessalement*, 401, 16-21.
- Ang, W. L., Mohammad, A. W., Johnson, D. & Hilal, N. (2020). Débloquer le potentiel d'application de l'osmose directe grâce à un processus intégré/hybride. *Science de l'environnement total*, 706, 136047.
- Ayaz, M., Namazi, M. A., Din, M. A. u., Ershath, M. I. M., Mansour, A., & Aggoune, e.-H. M. (2022). Dessalement durable de l'eau de mer : situation actuelle, implications environnementales et perspectives d'avenir. *Dessalement*, 540, 116022.<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116022>
- Aziz, N. I. H. A., & Hanafiah, M. M. (2021). Application de l'analyse du cycle de vie au dessalement : progrès, défis et orientations futures. *Pollution environnementale*, 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). Comparaison des sources et de l'analyse de l'incertitude dans l'évaluation du cycle de vie consécutive et attributionnelle : examen des pratiques actuelles et recommandations. *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, définition et quantification des biens et services fournis par la biodiversité marine : implications pour l'approche écosystémique. *Marine Pollution Bulletin*, 54(3), 253-265.<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.12.003>
- Brika, B. (2018). Ressources en eau et dessalement en Libye : examen. *Actes*, 2(11), 586.<https://www.mdpi.com/2504-3900/2/11/586>
- Bundschuh, J., Kaczmarczyk, M., Ghaffour, N. et Tomaszewska, B. (2021). État des lieux des sources d'énergie renouvelables utilisées pour le dessalement de l'eau : perspectives actuelles et futures. *Dessalement*, 508, 115035.<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115035>

- Cellura, M., Longo, S. & Mistretta, M. (2011). Analyse de sensibilité pour quantifier l'incertitude dans l'évaluation du cycle de vie : étude de cas d'un carreau italien. *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). Analyse du cycle de vie environnemental des procédés de dessalement de l'eau. Dans *Sustainable desalination handbook* (pp. 527-559). Elsevier.
- Collectivités. (2009). *Analyse multicritère : un manuel*. Consulté le 6 octobre 2022 sur https://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria_Analysis.pdf
- Cordoba, S., Das, A., Leon, J., Garcia, J. M. & Warsinger, D. M. (2021). Configuration de l'osmose inverse en discontinu à double effet pour une efficacité optimale et des temps d'arrêt réduits. *Dessalement*, 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). Empreinte carbone de la réutilisation et du dessalement de l'eau : examen des émissions de gaz à effet de serre et des outils d'estimation. *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). Le dessalement est-il une solution à la pénurie d'eau douce dans les pays en développement ? *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). Comparaison des technologies de dessalement utilisant des sources d'énergie renouvelables à l'aide d'analyses du cycle de vie, d'analyses PESTLE et d'analyses décisionnelles multicritères. *Eau*, 13(21), 3023.
- Drami, D., Yacobi, Y. Z., Stambler, N. & Kress, N. (2011). Qualité de l'eau de mer et communautés microbiennes à l'émissaire marin d'une usine de dessalement. Une étude de terrain sur la côte méditerranéenne israélienne. *Water Research*, 45(17), 5449-5462.
- Dweiri, F., Khan, S. A., & Almulla, A. (2018). Un système d'aide à la décision multicritères pour classer les critères d'implantation d'une usine de dessalement durable. *Dessalement*, 444, 26-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.007>
- AEE-PNUE/PAM. (2020). *Plan de travail conjoint 2022-2030*. Consulté le 14 octobre 2022 sur <https://www.eea.europa.eu/about-us/documents/unep-map-eea-joint-work-plan>
- Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A. & Sodiq, A. (2020). Le statut mondial du dessalement : une évaluation des technologies, des usines et des capacités de dessalement actuelles. *Dessalement*, 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). Dimensionnement optimal et évaluation de la faisabilité technico-environnementale du dessalement par osmose inverse à grande échelle alimenté par des sources d'énergie renouvelables hybrides. *Conversion et gestion de l'énergie*, 224, 113377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113377>
- Elsaid, K., Batchelor, B. & Abdel-Wahab, A. (2019). Cinétique de la formation de sous-produits de désinfection halogénés dans l'eau de mer chlorée. Dans *Encyclopédie de l'eau : science, technologie et société*. John Wiley & Sons, Inc.
- Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T. & Olabi, A. (2020). Impact environnemental des technologies de dessalement : examen. *Science de l'environnement total*, 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). Impact environnemental des procédés de dessalement : stratégies d'atténuation et de contrôle. *Science de l'environnement global*, 740, 140125.
- Elsaie, Y., Soussa, H., Gado, M. & Balah, A. (2022). Le dessalement de l'eau en Égypte : analyse documentaire et évaluation. *Ain Shams Engineering Journal*, 101998. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101998>
- FAO. (2019). Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture : AQUASTAT. https://tableau.apps.fao.org/views/ReviewDashboard-v1/country_dashboard?%3Aembed=y&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y

- UE. (2017). *La directive-cadre « Stratégie pour le milieu marin » de l'UE* Consultée le 6 octobre 2022 sur le site https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/environment/oceans-and-seas/eu-marine-strategy-framework-directive_en
- UE. (2020). *Stratégie pour la biodiversité à l'horizon 2030*. Consultée le 06 octobre 2022 sur 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). Définition des zones prioritaires pour le développement durable de l'industrie du dessalement au Chili : une approche d'analyse multicritère par SIG. *Durabilité*, 14(13), 7772.
- Garmendia, M., Borja, Á., Breton, F., Butenschön, M., Marín, A., Miller, P. I., Morisseau, F., & Xu, W. (2015). Défis et difficultés liés à l'évaluation de l'état de l'environnement conformément aux exigences de l'approche écosystémique dans les pays d'Afrique du Nord, illustrés par l'évaluation de l'eutrophisation. *Surveillance et évaluation de l'environnement*, 187(5), 289.<https://doi.org/10.1007/s10661-015-4316-x>
- Gies, E. (2019). Percée du dessalement : sauver la mer du sel. *Scientific American*, juin. Non paginé. En ligne. www.scientificamerican.com/article/desalination-breakthrough.
- Gude, G. G. (2018). Manuel sur les technologies émergentes pour un dessalement durable.
- GW. (2018). *Global Water Intelligence Usines de dessalement*. Consulté le 14 octobre 2022 sur <https://www.desaldata.com/>
- Haddad, B., Heck, N., Paytan, A. & Potts, D. (2018). Chapitre 14 - Questions sociales et acceptation par le public des usines de dessalement de l'eau de mer. In V. G. Gude (Ed.), *Sustainable Desalination Handbook* (pp. 505-525). Butterworth-Heinemann.<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). Facteurs prédictifs des connaissances des acteurs côtiers sur les impacts du dessalement de l'eau de mer sur les écosystèmes marins. *Science de l'environnement global*, 639, 785-792.
- Ihsanullah, I., Atieh, M. A., Sajid, M. & Nazal, M. K. (2021). Dessalement et environnement : une analyse critique des impacts, des stratégies d'atténuation et des technologies de dessalement plus écologiques. *Science de l'environnement global*, 780, 146585.<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146585>
- IISD. (2016). *Manuel de formation à l'évaluation des incidences sur l'environnement*. Institut international du développement durable Consulté le 6 octobre 2022 sur <https://www.iisd.org/publications>
- Jenkins, S., Paduan, J., Roberts, P., Schlenk, D. & Weis, J. (2012). Gestion des rejets de saumure dans les eaux côtières : recommandations d'un groupe consultatif scientifique. *Projet de recherche sur les eaux côtières de Californie du Sud*. Costa Mesa, CA.
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., & Kang, S.-m. (2019). L'état du dessalement et de la production de saumure : une perspective globale. *Science de l'environnement global*, 657, 1343-1356.<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
- Kalista, B., Shin, H., Cho, J. & Jang, A. (2018). Développement actuel et perspectives d'avenir de la désalinisation par congélation. *Dessalement*, 447, 167-181.<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). Systèmes de dessalement par humidification-déshumidification solaire : examen critique. *Conversion et gestion de l'énergie*, 201, 112129.<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112129>
- Khan, M. A., Rehman, S. et Al-Sulaiman, F. A. (2018). Un système hybride d'énergie renouvelable comme source d'énergie potentielle pour le dessalement de l'eau par osmose inverse : examen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 456-477.

- Khordagui, H. (2013). *Évaluation des incidences environnementales cumulées potentielles des usines de dessalement sur le pourtour de la mer Méditerranée* <https://www.swim-sm.eu>
- Kress, N. (2019). *Impacts marins du dessalement de l'eau de mer : science, gestion et politique*. Elsevier.
- Latteman, S. (2010). *Développement d'un système d'évaluation de l'impact sur l'environnement et d'aide à la décision pour les usines de dessalement de l'eau de mer*. CRC press.
- Lattemann, S. & El-Habr, H. N. (2009). Manuel de ressources et d'orientation du PNUE pour l'évaluation de l'impact environnemental des projets de dessalement. *Dessalement et traitement de l'eau*, 3(1-3), 217-228
- Lattemann, S. & Hopner, T. (2008). Impact environnemental et évaluation de l'impact du dessalement de l'eau de mer. *Dessalement*, 220(1-3), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009>
- Lee, K. & Jepson, W. (2021). Impact environnemental du dessalement : examen systématique de l'analyse du cycle de vie. *Dessalement*, 509, 115066. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115066>
- Linkov, I., Satterstrom, F. K., Kiker, G., Batchelor, C., Bridges, T., & Ferguson, E. (2006). De l'évaluation comparative des risques à l'analyse décisionnelle multicritères et à la gestion adaptative : développements récents et applications. *Environnement international*, 32(8), 1072-1093.
- Lior, N. (2017). La durabilité comme norme quantitative pour les impacts du dessalement de l'eau. *Dessalement*, 401, 99-111. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.08.008>
- Mavukkandy, M. O., Chabib, C. M., Mustafa, I., Al Ghaferi, A., & AlMarzooqi, F. (2019). Gestion des saumures dans l'industrie du dessalement : des déchets à la génération de ressources. *Dessalement*, 472, 114187.
- Miller, S., Shemer, H. & Semiat, R. (2015). Questions énergétiques et environnementales liées au dessalement. *Dessalement*, 366, 2-8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.034>
- Morote, Á. F., Rico, A. M. & Moltó, E. (2017). Examen critique du dessalement en Espagne : une ressource pour l'avenir ? *Geographical Research*, 55(4), 412-423.
- Nasdaq. (2021). *Les leçons du climat pour la crise de l'eau*. Consulté le 6 octobre 2022 sur <https://www.nasdaq.com/articles/guest-view%3A-climates-lessons-for-the-water-crisis-2021-08-27>
- NATIXIS. (2020). *Dessalement : équilibrer les avantages socio-économiques et les coûts environnementaux*. Consulté le 6 octobre 2022 sur <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). Dessalement par adsorption : une nouvelle méthode de dessalement thermique à faible coût. *Dessalement*, 308, 161-179. <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). Gestion durable des saumures du point de vue de l'eau, de l'énergie et de la récupération des minéraux : une étude approfondie. *Dessalement*, 513, 115055.
- Panagopoulos, A., Haralambous, K.-J. & Loizidou, M. (2019). Méthodes d'élimination des saumures de dessalement et technologies de traitement - une revue. *Science de l'environnement global*, 693, 133545.
- Park, K., Albaik, I., Davies, P. A., Al-Dadah, R., Mahmoud, S., Ismail, M. A. & Almesfer, M. K. (2022). Système hybride d'osmose inverse (BRO) et de dessalement par adsorption (AD) pour un dessalement polyvalent et un rejet minimal de liquide. *Dessalement*, 539, 115945. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115945>
- Pryshlakivsky, J. & Searcy, C. (2021). L'analyse du cycle de vie en tant qu'outil de prise de décision : considérations pour le praticien et le gestionnaire. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127344. <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). Facteurs, défis et technologies émergentes pour le dessalement des saumures à forte salinité : examen critique. *Dessalement*, 538, 115827.<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115827>
- Skuse, C., Gallego-Schmid, A., Azapagic, A. & Gorgojo, P. (2021). Les nouvelles technologies de dessalement à base de membranes peuvent-elles remplacer l'osmose inverse ? *Dessalement*, 500, 114844.<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114844>
- SOED. (2020). *État de l'environnement et du développement en Méditerranée*. Consulté le 14 octobre 2022 sur <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). Consommation d'énergie et évaluation de l'impact environnemental des usines de dessalement et des stratégies d'élimination de la saumure. *Sécurité des procédés et protection de l'environnement*, 147, 589-608.<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.038>
- Srithar, K. & Rajaseenivasan, T. (2018). Techniques récentes d'augmentation de l'eau douce dans le dessalement par alambic solaire et HDH - Examen. *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). Technologies émergentes de dessalement pour le traitement de l'eau : examen critique. *Water Research*, 75, 164-187.
- Tal, A. (2018). L'empreinte carbone du dessalement : l'expérience israélienne. *Eau*, 10(2), 197.
- Talaiekhosani, A., Talaei, M. R. & Rezaia, S. (2017). Un aperçu de la production et de l'application du ferrate (VI) pour l'oxydation chimique, la coagulation et la désinfection de l'eau et des eaux usées. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1828-1842.
- NATIONS UNIES. (2018). *Plan du secrétaire général des Nations unies : décennie d'action pour l'eau 2018-2028*. Consulté le 14 octobre 2022 sur <https://sdgs.un.org/documents/united-nations-secretary-generals-plan-water-action-decade-2018-2028-33215>
- PNUE(DEPI)/MED IG.22/28. Décision IG.21/3. Sur l'approche écosystémique, y compris l'adoption des définitions du bon état écologique (BEE) et de l'objectif. 18^{ème} Réunion ordinaire des parties contractantes à la convention sur la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée et à ses protocoles. Istanbul, Turquie, 3-7 décembre 2018.https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/6008/13ig21_09_annex2_21_03_eng.pdf
- PNUE(DEPI)/MED. IG. 22/7 (2016). *Programme de surveillance et d'évaluation intégrées de la mer et des côtes méditerranéennes et les critères d'évaluation connexes*.<https://www.unep.org/unepmap/resources/publications>
- PNUE/PAM (2014). *Vers des systèmes d'information environnementale partagés*. Consulté le 6 octobre 2022 sur <https://www.unep.org/unepmap/>
- PNUE/MED WG.509/41. Méthodes et techniques communes pour l'évaluation et le suivi des effets négatifs des activités d'immersion. Réunion des points focaux MED POL. Vidéoconférence, 27-28 mai et 6-7 octobre 2021.https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/36209/21wg509_41_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- PNUE/PAM (2020). *État de l'environnement et du développement en Méditerranée*. Consulté le 14 octobre 2022 sur <https://www.unep.org/resources/report/state-environment-and-development-mediterranean>
- PNUE/MED IG.25/8 (2021). *Protocole relatif à la protection de la mer Méditerranée contre la pollution provenant de sources et d'activités situées à terre*.<https://www.unep.org/unepmap/who-we-are/contracting-parties/lbs-protocol-and-amendments>
- Wan, C. F., & Chung, T.-S. (2016). Récupération d'énergie par osmose retardée (PRO) dans les procédés intégrés SWRO-PRO. *Énergie appliquée*, 162, 687-698.

- Wang, Z., Wang, Y., Xu, G. & Ren, J. (2019). Sélection de procédés de dessalement durables : cadre d'aide à la décision dans le cadre d'informations hybrides. *Dessalement*, 465, 44-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.04.022>
- WaterReuseAssociation. (2011). Vue d'ensemble des alternatives de prise d'eau pour les usines de dessalement. *Livre blanc, juin*.
- Wei, Q. J., Tucker, C. I., Wu, P. J., Trueworthy, A. M., Tow, E. W. & Lienhard, J. H. (2020). Impact de la rétention de sel sur la consommation d'énergie de l'osmose inverse par lots : expériences et validation du modèle. *Dessalement*, 479, 114177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114177>
- Werner, M. & Schäfer, A. (2007). Aspects sociaux d'une unité de dessalement alimentée par l'énergie solaire pour les communautés australiennes isolées. *Dessalement*, 203(1-3), 375-393.
- WWAP. (2019). *Rapport mondial des Nations unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2019 : Ne laisser personne de côté. (Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture, Paris, France)*. Consulté le 14 octobre 2022 sur <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2019>
- Yazdani, M., Chatterjee, P., Zavadskas, E. K. & Zolfani, S. H. (2017). Cadre intégré QFD-MCDM pour la sélection de fournisseurs écologiques. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3728-3740.
- Zhou, J., Chang, V. W. C. & Fane, A. G. (2014). Analyse du cycle de vie pour le dessalement : examen de la faisabilité et de la fiabilité de la méthodologie. *Water Research*, 61, 210-223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.017>

Annexe I

Description des technologies émergentes et de prétraitement

1. **Distillation membranaire (MD) :** La MD est alimentée par une différence de température induite entre l'eau de mer chaude et l'eau perméable froide. Par conséquent, l'eau de mer est chauffée à une température comprise entre 30 et 80 °C avant d'être transférée dans le module MD, et le perméat est ensuite refroidi à l'aide de l'eau de mer froide entrante (< 20 °C). Un antitartre est ajouté au flux avant le chauffage, car les températures de fonctionnement plus élevées favorisent l'entartrage de la surface de la membrane. Les systèmes de MD présentent des avantages tels que la faible température requise, l'absence de pression, l'absence de limitation de la salinité de l'eau d'alimentation et l'efficacité élevée de la séparation.

2. La MD fait actuellement l'objet de recherches en tant qu'alternative aux procédés de dessalement par osmose inverse et par voie thermique, ou en tant que technologie complémentaire à l'échelle du laboratoire et à l'échelle pilote. Malgré ses avantages, la MD n'est pas encore une technique commerciale largement utilisée. Le mouillage des pores et la faible efficacité thermique sont considérés comme les deux principaux problèmes des systèmes de MD à l'échelle industrielle. Les performances de la DM sont également fortement affectées par l'encrassement et le faible flux d'eau (Ahmed et al., 2021 ; Skuse et autres, 2021).

3. **Osmose directe (FO) :** Le phénomène naturel d'osmose, par lequel un solvant passe d'une faible concentration de soluté à une forte concentration de soluté, est à la base des processus induits par l'osmose. Lors de la FO, l'eau est aspirée dans une solution d'aspiration concentrée sur le côté perméat de la membrane à partir du côté alimentation. La FO consomme moins d'énergie que les procédés sous pression puisqu'il s'agit d'un phénomène naturel, et les membranes de la FO ont également moins tendance à s'encrasser. Cependant, le dessalement par FO est un processus en deux étapes dans lequel l'étape d'osmose doit être suivie de la récupération de la solution tirée. Le dessalement par FO dépend à la fois de la récupération éventuelle du DS et du transport osmotique des molécules d'eau à travers une membrane FO utilisant une solution de tirage concentrée. Bien qu'elle soit généralement négligée, l'étape de récupération peut avoir un impact substantiel sur l'utilisation globale de l'énergie, en fonction de la procédure utilisée, du choix de la solution de tirage, etc.

4. L'un des obstacles les plus importants à la FO est l'énergie consommée lors de la récupération de la solution. L'utilisation d'une solution qui ne nécessite pas de récupération, ce qui élimine essentiellement le processus de récupération, est une stratégie visant à réduire la consommation d'énergie de la régénération de la solution de tirage. Toutefois, cela entraînerait la production de déchets supplémentaires en raison de la mise au rebut de la solution de tirage. L'étude de nouveaux matériaux tels que les liquides ioniques (IL) et les nanoparticules magnétiques (MNP) constitue une autre stratégie. Les MNP ont démontré des avantages importants par rapport aux DS antérieurs : ils sont capables de produire des pressions osmotiques extrêmement élevées et peuvent être récupérés à l'aide de séparateurs magnétiques à faible énergie. D'après des études antérieures, les MNP ne peuvent pas fonctionner sous un flux suffisamment élevé pour être commercialisables. Des études récentes montrent que ce problème est en passe d'être résolu, même si la stabilité à long terme reste problématique. Comme les IL peuvent être récupérés en utilisant l'énergie solaire ou la chaleur résiduelle, ils sont également considérés comme une solution de tirage au sort pour le dessalement par FO. Des études récentes portant sur les IL ont montré une amélioration du flux et de la pression osmotique, mais la récupération incomplète de la solution tirée signifie qu'une séparation supplémentaire (RO, MD) est nécessaire. (Ahmed et autres, 2021 ; Skuse et autres, 2021)

5. **Dessalement par adsorption (AD) :** Une méthode de dessalement thermique à basse température et à faible coût, connue sous le nom d'AD, est apparue comme une alternative aux méthodes de dessalement. Le cycle de dessalement par adsorption est une nouvelle méthode qui permet de produire de l'eau tout en utilisant la chaleur résiduelle à basse température. Les deux principaux processus qui composent le cycle de l'AD sont l'adsorption-évaporation et la désorption-condensation.

6. Les procédés d'AD peuvent être utilisés comme des hybrides en les incorporant dans des systèmes conventionnels tels que MED ou MSF, où l'efficacité de la production d'eau des hybrides peut être maximisée. Lors d'essais pilotes à l'échelle du laboratoire, des effets synergiques supérieurs

ont été confirmés dans le système hybride MED-AD, augmentant la production jusqu'à deux à trois fois par rapport au système MED conventionnel (Gude, 2018 ; Ng et autres, 2013).

7. **Dessalement par congélation (FD) :** Le procédé FD est une technique de dessalement impliquant un changement de phase d'un liquide à un solide. Dans ce cas, le terme « liquide » désigne l'eau de mer ou l'eau salée (c'est-à-dire la saumure), tandis que le terme « solide » désigne la glace. Théoriquement, une grande partie des cristaux de glace est constituée d'eau pure. L'eau douce est extraite sous forme de glace au cours du processus de congélation, ce qui rend le liquide restant plus concentré. Par conséquent, le processus FD présente un facteur de séparation élevé. Comme il nécessite des températures plus basses pour fonctionner, le processus FD dépend fortement de l'utilisation de réfrigérants.

8. Le FD est une technologie émergente qui permet de surmonter les limites des processus de dessalement basés sur les membranes et l'énergie thermique. Contrairement au processus RO, la méthode FD ne nécessite pas de prétraitement important ni d'exigences chimiques. En outre, la saumure concentrée produite par la RO nuit à l'environnement. À l'inverse, le FD a la capacité de traiter la saumure concentrée produite par le processus RO avec un rejet de liquide presque nul. Comparé au procédé de dessalement thermique, le processus FD présente moins de problèmes d'entartrage et de corrosion en raison des températures de fonctionnement plus basses. La chaleur latente de la fusion de la glace a un besoin énergétique déterminé thermodynamiquement de 333 kJ/kg, tandis que l'évaporation de l'eau a un besoin de 2 500 kJ/kg. Par conséquent, l'énergie utilisée pour le processus FD représente environ un septième de l'énergie nécessaire pour le dessalement thermique.

9. Dans le processus FD, de grandes quantités d'énergie de haute qualité sont nécessaires pour produire une basse température avec le cycle de refroidissement. La combinaison du FD avec une usine de regazéification de gaz naturel liquéfié peut résoudre le problème de la consommation d'énergie, réduisant ainsi les coûts d'exploitation et rendant le FD plus attractif. La centrifugation, le lavage et la transpiration sont les procédés qu'il est suggéré d'utiliser après la cristallisation pour améliorer la qualité du produit (Kalista et autres, 2018).

10. **Humidification Déshumidification (HDD) :** Dans la méthode de désalinisation par humidification et déshumidification (HDD), l'eau saline est chauffée, directement ou indirectement, se transformant en vapeur d'eau et humidifiant l'air ambiant. Elle passe ensuite dans un déshumidificateur qui produit un condensat d'eau douce. Lors du processus d'humidification, l'eau se diffuse dans l'air au contact de l'air non saturé. La force motrice de ce processus de diffusion est la différence de concentration entre l'interface eau-air et la vapeur d'eau dans l'air.

11. Humidification- la déshumidification est l'une des procédures de dessalement les plus efficaces à envisager pour les régions éloignées dont la demande en eau douce est modérée. Ceci est principalement dû au fait qu'il ne nécessite que des considérations mineures en matière d'exploitation et de maintenance. Le processus de chauffage, qui est une étape importante de ce processus, étant un processus à forte intensité énergétique, l'utilisation de sources d'énergie durables est une nécessité dans le monde d'aujourd'hui. Les principaux avantages de la HDD, tels que sa capacité à fournir de l'eau à des endroits éloignés, son taux d'utilisation à petite échelle et sa simplicité d'intégration de l'énergie solaire, en font un substitut potentiel aux systèmes de dessalement conventionnels. Lorsque les systèmes de dessalement thermique à grande échelle, tels que le dessalement MSF et MED, ne conviennent pas en raison de leur coût et de leur taille, ou lorsque l'alimentation électrique est insuffisante pour faire fonctionner la RO, la technologie HDD peut être considérée comme une alternative potentielle. L'un des principaux inconvénients des systèmes HDD est le coût d'investissement élevé (Gude, 2018 ; Kasaeian et autres, 2019 ; Srithar & Rajaseenivasan, 2018).

12. **Dessalement des hydrates de clathrates (CHD) :** Dans le dessalement des hydrates de clathrates (CHD), une charge saline est mélangée à des gaz formant des clathrates à basse température et à haute pression pour former des hydrates de clathrates : des réseaux de molécules d'eau gelées liées à l'hydrogène qui entourent les molécules de gaz. Les clathrates hydrates, comme la glace, ont une structure qui exclut les solides dissous. Pour récupérer l'eau douce et libérer le gaz, les hydrates solides peuvent être séparés du liquide restant et fondus. Les clathrates peuvent se former au-dessus du point

de congélation du flux d'alimentation salin à des pressions suffisamment élevées. Les sels, comme le FD, adhèrent aux clathrates, ce qui nécessite un post-traitement (lavage, pressage ou fusion douce) pour produire de l'eau à faible salinité. Le CHD consomme principalement de l'électricité pour la réfrigération et la pressurisation. Le CHD, comme le dessalement par congélation, a été proposé pour être installé au même endroit que la regazéification du gaz naturel liquéfié, mais toute intégration du GNL au dessalement devrait justifier que les avantages économiques l'emportent sur les coûts d'opportunité liés à l'utilisation du GNL pour d'autres applications.

13. La corrosion, la formation de tartre et l'encrassement biologique, qui nuisent aux méthodes de dessalement conventionnelles, sont considérablement réduits aux températures de fonctionnement du CHD. Le CHD, comme le FD, rejette mal les sels, mais sa cinétique est extrêmement lente et ses opérations sont plus complexes, notamment en raison de la nécessité de recapturer les gaz formant des clathrates. Par conséquent, il est peu probable que la technologie soit plus performante que le FD (Shah et autres, 2022).

14. **Osiose inverse en discontinu (BRO) :** La BRO est un processus transitoire dans lequel la saumure qui sort du module RO est renvoyée du côté de l'alimentation sans être mélangée à de l'alimentation fraîche. Le processus de dessalement est étendu dans le temps plutôt que dans l'espace, avec un faible taux de récupération par passage. En ce qui concerne les problèmes de consommation d'énergie et d'émissions de CO₂, de nombreuses études ont publié de nouveaux processus et systèmes pour réduire le niveau actuel de consommation d'énergie. Afin de réduire les pertes d'énergie thermodynamiquement irréversibles du processus de dessalement par RO, la technologie BRO a récemment été mise au point. La perte d'énergie irréversible est considérablement réduite dans le système BRO car la pression appliquée augmente progressivement avec la concentration. Par conséquent, la BRO consomme moins d'énergie que la RO continue traditionnelle, en particulier lorsque le taux de récupération est élevé. Malgré l'avantage du système BRO en matière de récupération d'énergie, il n'est pas facile d'augmenter la récupération jusqu'à une valeur très élevée, comme l'exige l'élimination minimale de la saumure, car la pression de fonctionnement maximale de la membrane RO est limitée. C'est pourquoi il est possible de créer des systèmes hybrides en intégrant des systèmes BRO à des systèmes tels que l'AD, et d'obtenir des rejets liquides minimales ou nuls (Cordoba et autres, 2021 ; Park et autres, 2022 ; Wei et autres, 2020).

15. **Dessalement solaire thermique (STD) :** La lumière du soleil est convertie en chaleur dans le dessalement solaire thermique (STD) pour évaporer l'eau salée. Les bassins d'évaporation solaire du dessalement conventionnel sont utilisés pour concentrer les flux salins mais ne produisent pas d'eau douce. Les alambics solaires sont des dispositifs STD qui condensent également la vapeur pour récupérer l'eau distillée. Les distillateurs solaires utilisent directement l'énergie solaire. Cette technologie présente donc l'avantage d'être facile à installer et à utiliser, de ne nécessiter qu'un minimum d'équipement et de pouvoir être déployée dans des zones reculées. Le STD étant basé sur l'évaporation, il n'est pas limité par la salinité de l'alimentation et peut, en théorie, gérer des concentrations de sel hypersalines. Lorsqu'un terrain approprié à faible coût est disponible, le STD peut potentiellement servir de solution ZLD simple.

16. Malgré les progrès réalisés en matière d'absorption solaire, de localisation de la chaleur et d'atténuation de l'accumulation de sel, le STD reste un processus gourmand en énergie. La SEC est, au mieux, l'enthalpie de vaporisation de l'eau, à moins que la chaleur latente libérée par la vapeur condensée ne soit récupérée ($\approx 667 \text{ kWh/m}^3$). En outre, la productivité de l'eau du STD est limitée par l'irradiation solaire. Une superficie considérable serait donc nécessaire pour assurer une production d'eau viable sur le plan opérationnel (Shah et autres, 2022).

17. **Dessalement par extraction de solvant (SED) :** Le SED est une technique thermique qui n'implique pas de changement de phase de l'eau. À la température d'extraction, la solution saline est mélangée à un solvant à faible polarité, où les deux liquides ne sont pas miscibles et forment donc un mélange biphasique. Cependant, comme le solvant contient des groupes fonctionnels hydrophiles, il attire une partie de l'eau du flux d'alimentation dans la phase solvant, tandis que les sels ne préfèrent pas se répartir dans l'environnement à faible constante diélectrique du solvant et restent dans la phase aqueuse. La phase de solvant chargée d'eau est ensuite décantée de la phase aqueuse concentrée et

portée à la température de désengagement, ce qui abaisse la limite de solubilité de l'eau. En conséquence, l'eau précédemment extraite se sépare du solvant, ce qui donne un flux de produit dessalé. L'eau du produit est séparée physiquement et le solvant régénéré est recyclé dans le processus. Depuis 2011, cette technologie suscite un regain d'intérêt pour le dessalement et la déshydratation des eaux hypersalées.

18. Le SED évite bon nombre des limitations associées aux technologies traditionnelles de dessalement à haute salinité, car il est à la fois sans membrane et sans évaporation. Les températures maximales du processus sont généralement inférieures à 80 °C, ce qui réduit la corrosion par rapport aux méthodes de distillation conventionnelles.

19. Bien que les solvants utilisés dans le SED soient peu polaires, ils ne sont pas complètement insolubles dans l'eau. Par conséquent, une fraction du solvant est perdue à la fois dans le raffinat déshydraté et dans l'eau du produit. La récupération du solvant entraîne des coûts supplémentaires et toute fuite de solvant qui n'est pas récupérée doit être reconstituée. En outre, la présence de solvant résiduel dans les flux de concentré et de produit peut nécessiter un post-traitement, en particulier si le solvant est toxique. L'identification de solvants qui minimisent les pertes tout en étant sans danger pour l'environnement et la santé humaine est essentielle pour le progrès technologique. Simultanément, la recherche de nouveaux solvants capables de produire beaucoup d'eau réduira la consommation d'énergie du SED (Shah et autres, 2022).

20. **Dessalement de l'eau supercritique (SCWD) :** Le SCWD utilise le changement de polarité du solvant de polaire à non polaire dans des conditions supercritiques. L'eau se comporte comme un solvant non polaire lorsqu'elle est soumise à des conditions supercritiques, définies comme des températures et des pressions supérieures à 374 °C et 221 bars (≈3200 psi). Les sels précipitent hors de la solution car leur solubilité dans l'eau supercritique diminue considérablement, ce qui permet de séparer facilement les minéraux solides du flux d'eau produit fluide. Le SCWD est toujours une technologie ZLD car il ne produit pas de flux de déchets concentrés.

21. Différentes compositions de flux d'alimentation peuvent être manipulées et traitées avec le SCWD dans toute la gamme de salinité. En outre, comme la méthode précipite même les sels peu solubles, un prétraitement poussé n'est souvent pas nécessaire. Les pressions et températures extrêmes requises pour produire de l'eau supercritique entraînent une consommation d'énergie et des investissements initiaux extrêmement élevés pour le SCWD. Les matériaux SCWD doivent être thermiquement, mécaniquement et chimiquement robustes afin de résister à des températures et des pressions extrêmement élevées. Malgré l'utilisation de matériaux durables tels que l'acier inoxydable et le titane, la saumure surchauffée et pressurisée à haute teneur en sel est connue pour provoquer une corrosion importante des équipements.

22. Les deux principaux défis que sont les exigences élevées en matière de durabilité des matériaux et les coûts énergétiques élevés pour atteindre les températures et pressions extrêmes doivent être résolus pour que le SCWD soit compétitif (Shah et autres, 2022).

23. **Zéro rejet liquide (ZLD) :** Le ZLD est une approche technique du traitement de l'eau dans laquelle la station ne rejette aucun effluent liquide dans les eaux de surface. Il en résulte une élimination complète de la pollution associée au dessalement. La méthode ZLD permet également d'éliminer les déchets liquides, de maximiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de réduire les problèmes potentiels de qualité de l'eau. Elle contribue également à la conservation de l'eau en réduisant la consommation d'eau douce grâce au recyclage et à la réutilisation des eaux usées. Les défis et les coûts de la récupération de l'eau augmentent avec l'augmentation de la salinité, la présence de composés entartrants et de matières organiques dans les eaux usées, d'où le besoin croissant d'un objectif de rejet zéro liquide. Les défis à prendre en compte dans la mise en œuvre du ZLD sont les suivants.

- a. Le choix d'une méthode appropriée est basé sur la composition, les caractéristiques, les problèmes de corrosion et de température associés, et la capacité cible.

- b. Les coûts d'investissement et d'exploitation du ZLD, qui comprennent les coûts énergétiques et chimiques associés aux processus d'évaporation et de traitement, sont nettement plus élevés que ceux des autres méthodes d'élimination.
- c. Lorsque l'on envisage la technique du ZLD, le facteur de compatibilité des matériaux est essentiel. Il s'agit de la résistance à la corrosion du matériau, ou de la façon dont il rouille ou se tache lorsqu'il est exposé à des produits chimiques, au sel et à d'autres composés. (Soliman et autres, 2021).

24. Le tableau A.1 présente un résumé des paramètres évalués concernant la salinité de l'eau produite de qualité énergétique (c'est-à-dire la compatibilité avec des applications adaptées), l'état de la démonstration technologique, la capacité à ne pas rejeter de liquide et la capacité à précipiter les solides en phase aqueuse globale pour les technologies émergentes (Shah et autres, 2022).

Tableau A.1 : Résumé des paramètres relatifs à la salinité de l'eau des produits de qualité énergétique, à l'état de la démonstration technologique, à la capacité de rejet sans liquide et à la capacité de précipiter les solides en phase aqueuse globale pour les technologies émergentes (Shah et autres, 2022)

Critères	ED	FO	MD	HDD	SED	SCWD	FD	CHD	STD
Intrant d'énergie primaire	EC	S/LGH	LGH	S/LGH	LGH	CE+S	EC	EC	LGH
Salinité de l'eau des produits	FFP	FFP	DW	DW	FFP	DW	FFP	FFP	DW
Démonstration à l'échelle industrielle	+ ¹	+		+			+ ²		
ZLD démontré				+	+	+			+
Précipitation dans un solide en vrac				+ ³	+	+			

EC : Électricité, S : Vapeur, LGH : Chaleur de faible intensité, + : Performance démontrée, FFP : Adapté à l'usage, DW : Eau potable

1 ED Démonstration pour le dessalement d'eau saumâtre

2 FD Démonstration pour l'industrie alimentaire et des boissons

3 La précipitation se produit à l'interface solution-air, loin de la surface solide.

Annexe II

Principaux outils de surveillance du processus de dessalement de l'eau de mer

Introduction

1. La qualité de l'eau de mer est un sujet particulièrement sensible et dynamique, car elle est étroitement liée à de nombreuses questions environnementales. En raison de l'augmentation des sources de pollution, il est de plus en plus difficile de contrôler la qualité de l'eau, en particulier lors des opérations de prise d'eau et d'évacuation des eaux usées. En outre, les problèmes opérationnels du dessalement sont fortement liés aux caractéristiques corrosives des organismes marins et de l'eau de mer. Ces caractéristiques peuvent à leur tour avoir un impact négatif sur le système, entraînant la fermeture partielle ou parfois totale d'une installation. En outre, toute occurrence ou opération inadaptée peut entraîner des risques pour la sécurité et un gaspillage des ressources. Par conséquent, la surveillance et l'évaluation complètes, ainsi que la sélection d'un emplacement approprié, ont un impact significatif sur l'ensemble du processus de production et son efficacité, ainsi que sur la durée de vie globale de l'usine.

Contrôle de conformité (approche par indicateurs)

2. Le contrôle de conformité implique généralement un contrôle périodique ou continu d'un certain paramètre pour s'assurer que les exigences légales et les normes de qualité environnementale sont respectées. Bien qu'il soit idéal d'examiner le plus de choses possible dans une EIE, il est en effet pratiquement impossible d'étudier en permanence chaque organisme dans chaque environnement. C'est pourquoi une stratégie d'indicateurs est le plus souvent utilisée indirectement dans le cadre d'une EIE. Les concentrations de salinité et d'oxygène dissous (ou la température pour les installations de distillation) sont des indicateurs physiques appropriés pour les installations de dessalement, dans le but de garantir le respect des exigences réglementaires.

Suivi des tendances (approche par indicateurs)

3. Le suivi des tendances de la concentration des polluants rejetés dans les eaux côtières par les effluents des opérations de dessalement doit être mis en place afin de contribuer à la réalisation des objectifs du bon état écologique (BEE) du milieu marin tel que défini dans l'IMAP. Les objectifs de réduction des apports de polluants doivent être fixés en fonction des résultats du suivi des tendances.

4. La surveillance des tendances des polluants rejetés dans les eaux côtières doit inclure les polluants émis par les opérations de dessalement en tenant compte des procédures analytiques pour l'échantillonnage, la préparation des échantillons et la détermination analytique des polluants, comme le recommandent les lignes directrices de surveillance du PNUE/PAM pour les indicateurs communs 13 14 et 17 de l'IMAP.

5. Le niveau maximal autorisé des concentrations de polluants mesurées dans les effluents rejetés dans les eaux côtières à travers les effluents des opérations de dessalement devrait être fixé à la suite d'une analyse des tendances des concentrations de polluants mesurées au cours d'une période qui n'est pas inférieure à 5 ans, afin d'orienter les mesures d'intervention appropriées en cas de rejets excessifs de polluants.

Plans de surveillance de l'environnement

6. Bien que l'eau de mer ne soit pas rare, il est essentiel de comprendre, de surveiller en permanence et de prendre les mesures appropriées pour réduire les effets négatifs du dessalement de l'eau de mer, en particulier dans la perspective de son expansion rapide dans un avenir proche. Des plans de surveillance environnementale (PSE) complets sont élaborés pour prévenir, prévoir et surveiller les impacts lors de la faisabilité, de la planification, de la conception, de la construction et de l'exploitation des usines de dessalement de l'eau de mer. Ces plans sont mis en œuvre dans le monde entier pour respecter les normes de qualité des eaux rejetées et les réglementations environnementales dans le but de protéger le milieu aquatique.

7. Un plan de surveillance environnemental est élaboré pour : (i) collecter des informations sur l'environnement pendant la construction, l'installation, et l'exploitation de l'usine, si nécessaire ; (ii) surveiller les émissaires liés à chaque étape du projet, y compris l'étape d'exploitation ; (iii) surveiller tout changement substantiel dans la zone associée à l'usine qui pourrait être causé par ses activités, telles que celles qui affectent les propriétés physiques, chimiques ou biologiques ; et (iv) lancer des actions d'atténuation avant que ces changements n'affectent les processus naturels et ne les rendent irréversibles.

8. Les spécifications du plan de surveillance doivent inclure les limites de la qualité de l'eau aux points d'échantillonnage, la dilution requise des rejets de saumure (y compris le volume de rejet et la salinité), les contrôles de la dispersion des rejets, les contrôles des espèces végétales et animales locales et les méthodes d'atténuation visant à réduire la concentration excessive de sel.

Annexe III

Processus d'évaluation des incidences sur l'environnement

Introduction

1. L'EIE est généralement définie comme une évaluation de l'impact environnemental des activités planifiées, y compris les impacts sur la biodiversité, la végétation et l'écologie, l'eau et l'air. Une EIE est un processus d'identification, de prévision et d'évaluation des impacts environnementaux, socio-économiques, culturels et autres probables d'un projet proposé ou afin de définir des mesures d'atténuation, non seulement pour réduire les impacts négatifs, mais aussi pour apporter des avantages à l'environnement naturel et au bien-être. Les risques potentiels d'un projet pour l'environnement et le bien-être humain sont essentiellement identifiés dans une EIE, ainsi que les mesures qui peuvent être prises pour éliminer et/ou au moins réduire ces risques. Cela peut se faire en remplaçant et/ou en modifiant les activités prévues afin de réduire les impacts. Dans ce contexte, une EIE peut être considérée comme une activité de collecte d'informations par le promoteur du projet afin de décrire (et si possible de quantifier) les risques, les impacts et les mesures d'atténuation intégrés dans l'ensemble du cycle de vie du projet, de la conception à la clôture, de sorte que les décideurs soient pleinement informés au moment d'approuver le projet. Le facteur le plus important pour déterminer si une EIE est nécessaire est la mesure dans laquelle le projet aurait un impact négatif sur la santé humaine et environnementale (IISD, 2016).

2. L'EIE des projets est un instrument clé de la politique environnementale de l'Union européenne. Il est actuellement régi par les dispositions de la directive 2011/92/UE de l'Union européenne, telle que modifiée par la directive 2014/52/UE concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement (directive EIE). Depuis l'adoption de la première directive EIE en 1985 (directive 85/337/CEE), la législation et les pratiques en matière d'EIE ont évolué. La directive EIE a été modifiée par les directives 97/11/CE, 2003/35/CE et 2009/31/CE. La directive et ses trois amendements ont été codifiés en 2011 par la directive 2011/92/UE. La directive codifiée a ensuite été modifiée par la directive 2014/52/UE.

3. Les trois principales étapes du processus d'EIE sont la sélection et la délimitation du champ d'application du projet, l'évaluation des incidences sur l'environnement, la prise de décision et l'examen de l'EIE. Il convient de noter que, dans la pratique, il peut se produire des écarts par rapport à la procédure décrite. Les étapes individuelles n'ont pas nécessairement de limite définie ; certaines peuvent se chevaucher ou être utilisées à la place d'autres. Le processus d'EIE doit donc être considéré comme un processus continu et flexible.

4. Afin d'aider les concepteurs de projets, les consultants, les régulateurs et les décideurs à anticiper et à traiter toutes les questions environnementales, socio-économiques et de santé publique susceptibles de se poser lors de la mise en œuvre d'un projet de dessalement pour obtenir le niveau le plus élevé possible d'utilisation bénéfique de l'eau dessalée en termes de qualité, de sécurité et de protection de l'environnement, le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ont élaboré et publié un document d'orientation sur le dessalement. L'objectif du document d'orientation est d'identifier un large éventail de défis potentiellement importants qui peuvent aider à anticiper les questions pertinentes de chaque projet de dessalement. Le processus d'EIE couvre trois phases principales, à savoir la délimitation du champ d'application, le criblage, l'atténuation des incidences et la rédaction du rapport. Les phases principales de l'EIE ont été subdivisées en dix étapes, comme le montre le diagramme suivant (figure A.1). PNUE (2008) Manuel de ressources et d'orientation sur le dessalement pour les études d'impact sur l'environnement. Programme des Nations unies pour l'environnement, Bureau régional pour l'Asie occidentale, Manama, et Organisation mondiale de la santé, Bureau régional pour la Méditerranée orientale, Le Caire.

Criblage du projet

5. Le processus de criblage permet de déterminer si une EIE est nécessaire ou non pour un projet donné. Le criblage consiste donc à évaluer rapidement l'importance relative et l'impact environnemental prévu impact d'un projet proposé. Un certain niveau d'informations de base sur la proposition et son emplacement est requis à cette fin (PNUE, 2008).

6. Les processus de criblage peuvent être classés en deux grandes catégories : une approche normalisée, dans laquelle les projets sont soumis ou exemptés d'EIE conformément à la législation et à la réglementation ; et une approche personnalisée, dans laquelle les projets sont vérifiés au cas par cas à l'aide de conseils indicatifs (Lattemann & El-Habr, 2009).

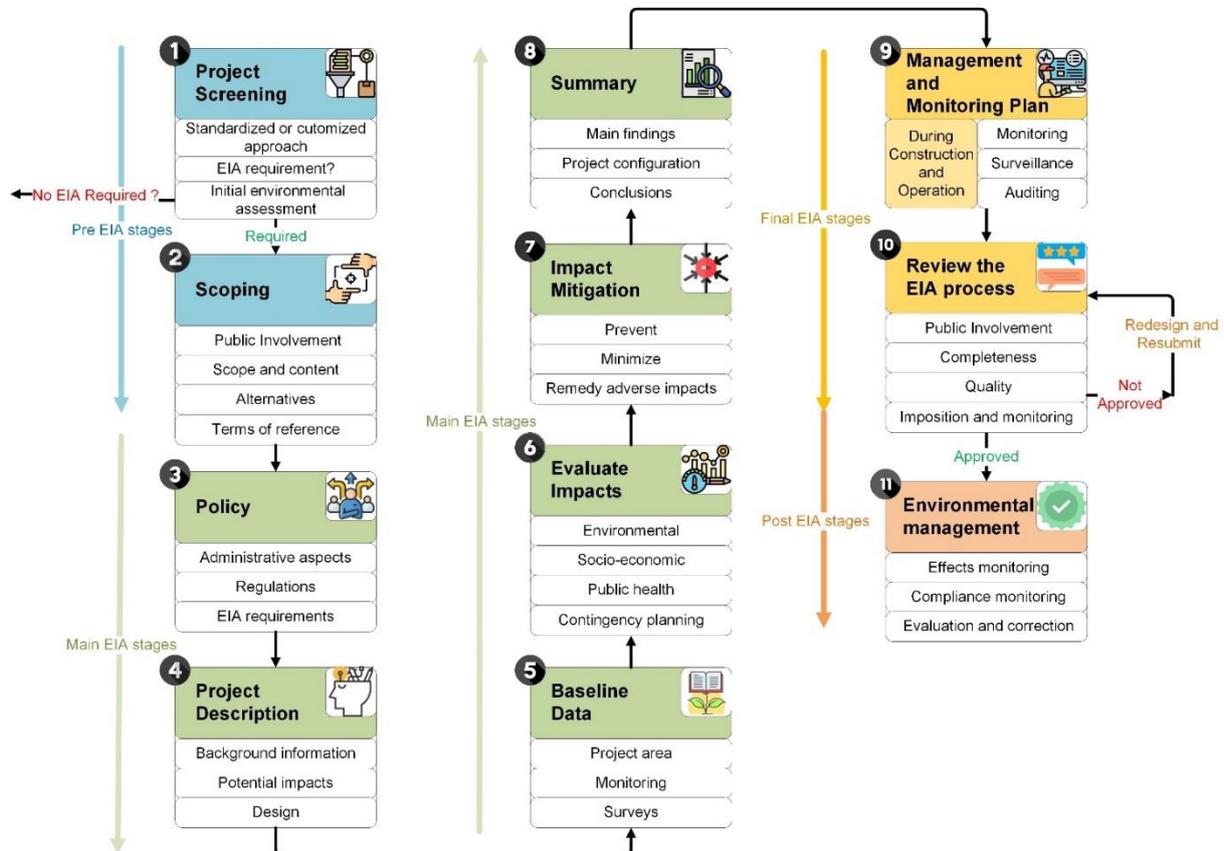


Figure A.1. Le processus d'évaluation des incidences sur l'environnement (modifié à partir de (Lattemann & El-Habr, 2009))

Délimitation du champ d'application du projet

7. La délimitation du champ d'application est une étape importante de la préparation d'une EIE, car elle permet d'identifier les questions susceptibles d'être les plus importantes au cours de l'EIE et d'éliminer celles qui sont peu préoccupantes. La délimitation du champ d'application est un processus systématique qui détermine les paramètres de votre EIE et définit le cadre des études que vous réaliserez à chaque étape. Une étude de délimitation du champ d'application réduit le risque d'inclure des éléments inappropriés ou d'exclure des éléments qui devraient être traités (PNUE, 2008).

8. La procédure de délimitation du champ d'application comporte quatre étapes fondamentales : i) préparation d'un document de délimitation du champ d'application destiné à la diffusion publique, comprenant les détails du projet et une analyse environnementale préliminaire, ii) organisation de réunions de délimitation du champ d'application, invitant les agences collaboratrices, les groupes de parties prenantes, les ONG, les experts et les conseillers, et annonce publique de la réunion de délimitation du champ d'application, iii) compilation d'une liste complète de questions lors des consultations de délimitation du champ d'application, qui sont ensuite évaluées en fonction de leur importance relative, iv) préparation du cahier des charges de l'EIE, définissant la portée et les exigences en matière d'information de l'EIE, les lignes directrices et les méthodologies de l'étude (Lattemann & El-Habr, 2009). La participation du public est essentielle à tous les stades des projets de dessalement, en particulier lors de la phase de délimitation du champ d'application. Le public est

informé de l'objectif et des plans de mise en œuvre du projet de dessalement proposé. L'information du public devrait comprendre, *entre autres*, les avantages et les inconvénients, les implications environnementales, socio-économiques et de santé publique.

9. La préparation des termes de référence (TdR) d'une EIE est une tâche importante pour conclure le processus de délimitation du champ d'application. Le promoteur du projet reçoit des instructions spécifiques concernant les informations qui doivent être soumises aux autorités compétentes pour une EIE ainsi que les études qui doivent être menées pour recueillir ces informations dans les termes de référence (ToR), qui sont développés tout au long du processus (Lattemann & El-Habr, 2009).

- a) **Sélection du site du projet** : les incidences environnementales, socio-économiques et de santé publique résultant de la construction et de l'exploitation d'une usine de dessalement dépendent en grande partie de l'emplacement de l'installation et de l'infrastructure associée. Il est donc essentiel de bien choisir le site d'une usine de dessalement au cours du processus de planification, afin de minimiser ces impacts. La sélection du site a généralement lieu au cours des premières étapes d'un projet de dessalement et conduit à l'identification d'un site préféré et éventuellement d'une ou deux alternatives.
- b) **Description du projet** : une description générale de l'objet et de la nécessité du projet doit figurer au début du document d'EIE. Elle doit contenir les informations suivantes :
 - i. Emplacement proposé pour l'usine de dessalement.
 - ii. Colocalisation avec d'autres industries (telles que les centrales électriques).
 - iii. Les composantes terrestres et marines de l'usine (bâtiments, pompes, pipelines, émissaire de saumure), les activités de construction prévues et le calendrier.
 - iv. Raccordement au réseau de distribution d'eau.
- c) **Choix de la technologie et caractérisation des rejets** Une description technologique détaillée du procédé de dessalement choisi doit faire partie de l'EIE, y compris la justification du choix. Elle doit contenir les informations suivantes :
 - i. La technologie de dessalement choisie et les spécifications techniques
 - ii. Capacité de dessalement de l'usine et plans d'expansion futurs
 - iii. Utilisation et source d'énergie
 - iv. Zone et méthode de prise d'eau (prise d'eau à ciel ouvert, prise d'eau dans un puits)
 - v. Les étapes de traitement de l'eau de source pendant le processus de dessalement (notamment le prétraitement, l'application de biocides, les mesures antitartre, les étapes de nettoyage, le traitement de l'eau dessalée)
 - vi. Type de rejets et d'émissions (marins, terrestres et atmosphériques)
 - vii. Volume total des rejets et des émissions (quotidien, annuel)
 - viii. Zone et méthode de déversement de la saumure (déversement à ciel ouvert, codéversement, émissaire marin avec ou sans diffuseurs)
 - ix. Mode de déversement de la saumure (continu, intermittent, variable)
 - x. Caractéristiques physico-chimiques de la saumure (salinité, température, etc.)
 - xi. Concentrations et charges des substances rejetées et leur caractérisation environnementale (telles que la persistance, la toxicité, la bioaccumulation).

Modélisation

10. Un modèle est une simplification conceptuelle ou mathématique utilisée pour étudier un système naturel réel, un problème d'évaluation des risques et/ou un processus décisionnel, entre autres. La modélisation est une exigence commune pour un processus d'EIE et un élément fondamental pour des processus réglementaires et décisionnels éclairés. La modélisation est une exigence commune pour un processus d'EIE et une composante fondamentale des processus réglementaires et décisionnels éclairés (Kress, 2019).

Identification et description des aspects politiques et administratifs

11. Une EIE s'inscrit généralement dans les cadres juridiques spécifiques créés par le pays dans lequel le projet sera situé, ainsi que dans ceux établis par les organisations internationales. Par conséquent, il est conseillé d'obtenir une meilleure connaissance de toutes les règles nationales ou internationales qui pourraient être pertinentes pour le processus d'EIE. En outre, toutes les lois et politiques pertinentes d'un point de vue thématique doivent être trouvées, telles que celles relatives à la préservation de l'environnement et de la diversité biologique, à la prévention et au contrôle de la pollution, à la gestion des ressources en eau, ou à l'aménagement du territoire et à la planification régionale. Pour réaliser un projet de dessalement, il est souvent nécessaire d'obtenir plus d'un permis dans plusieurs juridictions. La procédure d'approbation principale, qui autorise la construction et l'exploitation d'une usine de dessalement, ne remplacera pas nécessairement les autres dispositions légales et permis existants. Il est important d'identifier les autorisations à obtenir dès le début du processus de planification du projet et de prendre contact avec les autorités compétentes. La désignation d'une agence « chef de file », qui coordonne le processus en impliquant d'autres agences et en informant le promoteur du projet des exigences réglementaires, peut faciliter la procédure d'autorisation.

Enquête et description du projet de dessalement proposé

12. Les nombreuses étapes du cycle de vie de la construction, de la mise en service, de l'exploitation, de la maintenance et du démantèlement de l'usine de dessalement doivent être couvertes dans la description du projet. Elle devrait être brève, inclure tous les éléments requis pour une évaluation d'impact et ne pas comporter d'éléments inutiles ou distrayants. Elle devrait comprendre une estimation de toutes les ressources utilisées au cours des différentes opérations du projet, y compris la quantité de terrain nécessaire à la construction, la quantité de produits chimiques utilisés pour l'entretien de l'usine et la quantité d'énergie utilisée. Elle devrait en outre inclure une caractérisation de tous les produits de déchets en termes de quantité et de composition, y compris les émissions dans l'air, l'eau et les sols, ainsi que les produits de déchets solides et liquides transportés vers une décharge ou déversés dans les égouts municipaux ou le système d'eaux pluviales (Lattemann & El-Habr, 2009).

Enquête et évaluation de l'état de référence environnemental

13. Il est possible de choisir une région de référence présentant des caractéristiques comparables, pour laquelle les données de base sont établies de la même manière que pour le site du projet. Cela permet de comparer le site de référence et le site du projet pendant le suivi du projet afin de détecter tout changement causé par la construction et l'exploitation du projet. Il est particulièrement utile d'identifier les changements naturels ou d'autres impacts anthropogéniques non liés au projet de dessalement en utilisant des données de référence provenant d'un site présentant des caractéristiques environnementales similaires (Lattemann & El-Habr, 2009). L'état des lieux environnemental doit également comprendre la cartographie des habitats sensibles de la zone qui seront potentiellement affectés par le projet et planifier l'emplacement de l'infrastructure marine de manière à ce qu'elle ait le moins d'effets possible. Par exemple, déplacer l'emplacement de la sortie si le modèle de dispersion montre qu'il y a un habitat sensible dans la zone de mélange.

Enquête et évaluation des impacts potentiels du projet

14. La prévision des incidences dans une EIE repose généralement sur des modèles conceptuels et des essais, tels que des méthodes expérimentales sur le terrain et en laboratoire (par exemple, des essais de toxicité des effluents entiers), des modèles à petite échelle pour étudier les effets en miniature (par exemple, différentes conceptions d'émissaires), des modèles analogiques qui font des prévisions basées sur des analogies avec des projets similaires existants (par exemple, d'autres usines de dessalement) ou des modèles mathématiques (par exemple, la modélisation hydrodynamique des rejets). Chacun de ces modèles ne couvre qu'une petite partie de l'éventail des impacts ; c'est pourquoi ils sont souvent utilisés en conjonction les uns avec les autres, ce qui conduit à une variété d'études

menées par différents experts. L'importance relative de l'impact anticipé doit être évaluée à l'aide de facteurs tels que :

- a) L'impact est-il direct ou indirect, positif ou négatif ?
- b) Quelle est sa portée en termes de taille de la population touchée ou de zone géographique ?
- c) Quelle est la gravité de l'effet, quelle est la probabilité qu'il se produise et est-il réversible ou peut-il être atténué ?

15. L'identification des effets secondaires, y compris les plans d'urgence pour les impacts imprévus ou les urgences atténuées, les effets cumulatifs potentiels avec d'autres initiatives de développement sur le site du projet, les effets transfrontaliers (à grande distance) et les effets induisant la croissance, doit être effectuée chaque fois que possible et appropriée (Lattemann & El-Habr, 2009).

Atténuation des effets négatifs

Afin d'éviter, de minimiser ou de corriger les conséquences négatives majeures à des niveaux acceptables pour les organismes de réglementation et la communauté concernée, l'étape d'atténuation des incidences doit identifier les alternatives les plus réalisables et les plus rentables. Selon diverses normes nationales, régionales ou locales, qui dépendent des valeurs sociales, idéologiques et culturelles d'une société ou d'une communauté, ainsi que du potentiel économique et de la politique, la définition de l'acceptable changera (Lattemann & El-Habr, 2009).

16. Une hiérarchie d'actions est utilisée pour organiser les éléments d'atténuation. En général, la priorité absolue est accordée à la prévention de l'impact par le biais d'actions et d'alternatives appropriées. Les incidences doivent être réduites dans la mesure du possible si la prévention est impossible. Toutes les conséquences majeures mais inévitables qui ne peuvent être minimisées davantage doivent être compensées ou corrigées après la mise hors service du projet (Latteman, 2009).

17. L'atténuation peut impliquer des mesures structurelles (par exemple, des changements de conception ou d'emplacement, des modifications techniques, le traitement des déchets) et des mesures non structurelles (par exemple, des incitations économiques, des instruments politiques, la fourniture de services communautaires, le renforcement des capacités).

18. La restauration du site touché pendant la durée de vie du projet ou après la démolition est une option de remédiation et de compensation, tout comme l'amélioration de la valeur des ressources ailleurs, par exemple par l'amélioration de l'habitat, le reboisement ou le repeuplement d'une espèce particulière (Lattemann & El-Habr, 2009).

Résumé et conclusions

19. À cette fin, il convient de fournir un résumé des principales implications (éventuellement sous la forme d'un tableau), en faisant la distinction entre les impacts substantiels qui peuvent être évités ou atténués et ceux qui ne peuvent l'être. Les effets directs et indirects, positifs et négatifs, ainsi que le potentiel d'effets cumulatifs doivent être examinés.

20. Dans la mesure du possible, des choix permettant d'atténuer ou d'éviter les effets majeurs doivent être proposés. Il est essentiel de procéder à une comparaison systématique de la proposition de projet initiale avec différentes configurations de projet en termes d'incidences négatives et positives et d'efficacité des stratégies d'atténuation. La dernière étape consiste à identifier la « meilleure option environnementale réalisable », c'est-à-dire la conception idéale du projet en fonction de critères environnementaux, sociaux, culturels et de santé publique. Il est important de s'assurer que ce choix est financièrement et technologiquement viable. La décision doit être transparente et étayée par des arguments (Lattemann & El-Habr, 2009).

Établissement d'un plan de gestion environnementale

21. Pendant la construction, la mise en service, l'exploitation, la maintenance et le démantèlement du projet de dessalement proposé, un plan de gestion de l'environnement doit être élaboré pour assurer la surveillance et l'examen continus des effets du projet. Son objectif est de déterminer les

conséquences réelles du projet et de confirmer que les impacts observés se situent dans la fourchette indiquée par l'EIE. En outre, l'objectif de la gestion environnementale est de garantir que les mesures d'atténuation ou les autres exigences liées au permis de projet sont correctement mises en œuvre et efficaces. Dans le cas contraire, ou si des effets imprévus apparaissent, les mesures et les conditions doivent être modifiées à la lumière des nouvelles informations. Le plan de gestion doit décrire tous les plans de contrôle, de surveillance et d'audit prévus, y compris la méthodologie, les calendriers et les processus de gestion des événements imprévus. (Lattemann & El-Habr, 2009).

Examen de l'EIE et du processus décisionnel

22. L'objectif de l'examen est de confirmer l'exhaustivité et la qualité des données d'EIE collectées. Cette phase finale permet de s'assurer que le matériel fourni dans le rapport est conforme aux termes de référence définis lors de la délimitation du champ d'application et qu'il est suffisant pour la prise de décision.

23. L'examen est une phase formelle de la procédure d'EIE qui sert à l'examen final du rapport d'EIE avant qu'il ne soit soumis à l'approbation du projet. L'examen peut être effectué par l'autorité compétente, une autre agence gouvernementale ou une organisation indépendante. La participation des agences collaboratrices et consultatives au processus d'examen est fortement conseillée, de même que la participation du public et des parties prenantes importantes aux auditions publiques concernant les résultats de l'EIE.

24. L'examen doit respecter une méthodologie systématique. Il s'agit d'évaluer et de valider la méthodologie et la technique de l'EIE, ainsi que de vérifier la cohérence, la plausibilité et l'exhaustivité des impacts découverts, des alternatives proposées et des mesures d'atténuation suggérées.

25. Le processus d'examen peut respecter des normes et des critères d'examen spécifiques. Si ces éléments ne sont pas disponibles, le comité peut s'appuyer sur des principes, des objectifs et des mandats généraux, ou utiliser les questions ci-dessous :

- a) Le rapport d'EIE répond-il au cahier des charges ?
- b) Les informations demandées sont-elles fournies pour chaque élément majeur du rapport d'EIE ?
- c) Les informations sont-elles correctes et techniquement valables ?
- d) Les opinions et les préoccupations des parties concernées et intéressées ont-elles été prises en compte ?
- e) L'exposé des principales conclusions est-il complet et satisfaisant, par exemple en ce qui concerne les impacts significatifs, les mesures d'atténuation proposées, etc. ?
- f) Les informations sont-elles clairement présentées et compréhensibles ?
- g) Les informations sont-elles suffisantes pour permettre la prise de décision et la fixation des conditions ?

26. La réponse à la dernière question est la plus importante et déterminera essentiellement si l'EIE peut ou non être soumise à l'autorité compétente en l'état ou avec des ajustements mineurs pour la prise de décision.

27. Sur la base du site du rapport d'EIE, de l'analyse des intérêts des parties prenantes et des commentaires des agences collaboratrices, l'autorité compétente procédera à sa propre évaluation du projet proposé et décidera de son approbation ou de son rejet. Si le projet est accepté, l'autorité compétente impose souvent des conditions, telles que des mesures d'atténuation, des limitations d'émissions ou des normes environnementales à respecter. (Lattemann & El-Habr, 2009).

Le plan d'un rapport d'EIE devrait comprendre

Le résultat de la procédure d'EIE devrait comprendre des informations documentées sur les points suivants :

- a) L'objectif et la nécessité du projet, y compris l'accessibilité et le coût des sources d'eau alternatives (traitement et réutilisation de l'eau, conservation de l'eau, prévention du gaspillage de l'eau).
- b) Durabilité sociale : impacts sur la santé humaine (qualité de l'eau dessalée), l'utilisation des sols, la croissance démographique, les infrastructures, la confiance dans la disponibilité de l'eau dessalée, l'impact sur les activités récréatives ou d'autres utilisations acceptables de la mer et du littoral.
- c) Description du projet : les composants physiques de l'usine à terre et en mer (structures, pompes, pipelines, systèmes d'admission et d'élimination de la saumure), les processus de construction prévus et le calendrier, ainsi que l'emplacement prévu, en association avec d'autres industries ou applications marines.
- d) Description de la technologie : Les exigences techniques, la capacité de production, la source d'énergie et son utilisation, les systèmes de prise d'eau et d'évacuation, le prétraitement de l'eau de source (coagulation, application de biocides, mesures antitartre, étapes de nettoyage, traitement de l'eau dessalée), ainsi que le type, le volume et la composition de l'eau évacuée et les niveaux d'émission (marine, terrestre et atmosphérique) sont autant de facteurs qui entrent en ligne de compte dans le processus de dessalement.
- e) Description de l'état initial de l'environnement : Compilation et analyse des informations actuelles sur les environnements terrestres et aquatiques à proximité, ainsi que des évaluations de surveillance de l'état initial réalisées avant la construction.
- f) Modélisation : L'entraînement, l'impaction et le piégeage des organismes au niveau des systèmes de prise d'eau, l'hydrographie régionale (proche et lointaine) et la dispersion de la saumure, le transport transfrontalier et les effets sur la qualité de l'eau de mer et sur les organismes marins sont les questions qui doivent être abordées.
- g) Dépistage de la toxicité dans les rejets.
- h) Évaluation des impacts potentiels.
- i) Décision entre les options : les outils permettant de définir et de sélectionner la meilleure alternative et d'établir des mesures d'atténuation comprennent l'évaluation des risques environnementaux et l'évaluation des décisions multicritères.
- j) Décrire les mesures qui seront prises pour minimiser ou réduire les effets négatifs pendant la phase de construction et tout au long de la phase d'exploitation de l'usine de dessalement, en tenant compte des facteurs suivants :
- k) Meilleures techniques disponibles (MTD) : l'aptitude pratique d'une mesure à réduire les rejets, les émissions et les déchets est indiquée par le stade de développement le plus récent (état de la technique) de ses processus, installations ou méthodes d'exploitation.
- l) Meilleures pratiques environnementales (MPE) : utilisation du meilleur ensemble possible de techniques et de méthodes de contrôle environnemental.
- m) Le principe de précaution : même s'il n'y a que des preuves évocatrices d'une influence, des mesures doivent être prises pour éviter des effets négatifs majeurs. 146 Impacts du dessalement de l'eau de mer sur le milieu marin : science, administration et politique Récemment, il a été proposé d'ajouter une phase à l'EIE pour tenir compte de l'impact du changement climatique. L'augmentation de la demande en eau douce, l'augmentation de la température et de la salinité de l'eau de mer et la prolifération du phytoplancton sont autant de facteurs potentiels de dessalement (Kress, 2019).

Annexe IV
Exemple d'études MCA appliquées au dessalement

1. García-Bartolomei et autres (2022) ont utilisé une approche d'analyse multicritère basée sur un SIG (GIS-MCA) pour étudier et évaluer les emplacements probables adaptés au développement et à l'exploitation d'installations de dessalement au Chili. À l'aide de la méthode du processus hiérarchique analytique (AHP), divers critères environnementaux, sociaux et techniques ont été évalués et pondérés. Seuls 4,54 % du territoire analysé (114 450 km²) ont été classés comme hautement appropriés, ce qui prouve la rareté de l'espace disponible pour répondre aux attentes de croissance de l'industrie. Ces résultats indiquent que l'analyse basée sur les SIG fournit une solution pratique pour sélectionner les zones optimales pour le développement des usines de dessalement, soulignant l'importance de définir des zones prioritaires pour le développement à long terme de l'industrie du dessalement (García-Bartolomei et autres, 2022).

2. Do Thi et autres (2021) ont étudié la procédure de dessalement de l'eau salée en utilisant plusieurs technologies, dont RO, MED et MSF, avec plusieurs sources d'énergie (énergie fossile, énergie solaire, énergie éolienne, énergie nucléaire). Dans cette étude, les trois méthodes d'évaluation, à savoir l'ACV, le PESTLE et l'analyse décisionnelle multicritère (MCDA), ont été étudiées individuellement dans le but de comparer l'efficacité des différents systèmes de dessalement avec celle des sources d'énergie, comme indiqué dans le tableau 4. Dans la partie MCDA de l'étude, la méthode TOPSIS (« Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution ») a été utilisée pour évaluer les technologies de dessalement. Dans cette étude, les facteurs environnementaux ont été jugés les plus importants, avec le poids le plus élevé, suivis par les facteurs sociaux et économiques. Les résultats indiquent que la RO est la meilleure technologie tandis que les technologies basées sur le MSF sont les pires (Do Thi et al., 2021) comme on peut le déduire du tableau A.2 ci-dessous.

Tableau A.2 : Comparaison des techniques de dessalement sous plusieurs aspects (Abdelkareem et autres, 2018 ; Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013 ; Al Washahi & Gopinath, 2017 ; Cherif & Belhadj, 2018)

Type de technologie	Technologie thermique				Technologie des membranes	
	MSF	MED	MVC	TVC	ED	RO
Type d'eau	Eau de mer, saumâtre	Eau de mer, saumâtre	Eau de mer, saumâtre	Eau de mer, saumâtre	Saumâtre	Eau de mer, saumâtre
Température de fonctionnement (°C)	90-110	70	70-100	63-70	Ambiante	Ambiante
Taille typique de l'unité (m ³ /jour)	50 000-70 000	5 000-15 000	100-3 000	10 000-30 000	2-145 000	24 000
Consommation d'énergie électrique (kWh/m ³)	4-6	1,5-2,5	7-12	1,8-1,6	2,6-5,5	5-9
Consommation d'énergie thermique (KJ/kg)	190-390	230-390	Aucune	145-390	Aucun	Aucune
Équivalent électrique de l'énergie thermique (kWh/m ³)	9,5-19,5	5-8,5	Aucun	9,5-25,5	Aucun	Aucun
Total équivalent électrique (kWh/m ³)	13,5-25,5	6,5-11	7-12	11-28	2,6-5,5	5-9
Valeur maximale des émissions de CO ₂ (kg CO ₂ /m ³)	24	19,2	11,5	21	5,3	8,6

Qualité du distillat TDS (ppm)	~10	~10	~10	~10	150-500	<500
Coût unitaire du produit (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. Afin de classer les critères d'implantation des usines de dessalement aux Émirats arabes unis (EAU), Dweiri et autres (2018) ont créé un système d'aide à la décision multicritère (DSS) en tenant compte des facteurs sociaux, environnementaux, économiques, techniques et opérationnels. Leurs résultats montrent que les aspects les plus importants des critères d'implantation des usines de dessalement sont d'ordre technique (21,9 %) et économique (20,9 %). En outre, les sous-critères les plus importants des aspects environnementaux, sociaux, économiques, techniques et opérationnels sont le rejet des eaux usées (22,2 %), les espèces vivantes (13,3 %), le coût réel de l'eau et les subventions gouvernementales (18 %), la qualité et la quantité d'eau douce (12,4 %) et le réseau d'approvisionnement en eau (9 %), respectivement (Dweiri et autres, 2018).

Annexe V

VLE pour les rejets de dessalement des parties contractantes

ISRAËL

VLE pour les rejets de dessalement

1. Fixation des valeurs limites d'émission pour les rejets de saumure (voir tableau n° 1)
2. Définition des valeurs limites d'émission (charges annuelles) pour le fer (Fe), le phosphore total (TP), l'azote total (TN) et le COT, dérivées des additifs et du taux de production annuel maximum. Ainsi, en cas de changement du taux de production de l'installation, la charge annuelle sera mise à jour en conséquence. Charge annuelle de phosphore total (PT) en fonction de sa source dans les additifs polyphosphonates.
3. Fixation des valeurs limites d'émission pour les rejets de l'installation/plan de traitement des eaux provenant du lavage à contre-courant des filtres à sable (par exemple) et du rinçage du calcaire (voir tableau n° 2)

Tableau n° 1 : Valeurs limites normalisées (VLE) pour le rejet de saumure en mer

Paramètre	Unité	VLE
Total des solides en suspension (105°C)(TSS)	mg/L	15 (sans prétraitement) 5-8 (avec prétraitement)
Turbidité	NTU	15 Réglage des VLE sur la base d'une surveillance en ligne (obtenue en 15 minutes en moyenne)- Par exemple : jusqu'à 8 NTU dans 85 % des cas, jusqu'à 10 NTU dans 8 % des cas, jusqu'à 15 NTU dans 5 % des cas et jusqu'à 50 NTU dans 2 % des cas.
Température ^{(1) (*)}	°C	VLE basée sur la surveillance en ligne : différence de température entre l'eau salée et l'eau brute, selon la surveillance en ligne (obtenue en moyenne 15 minutes) et selon des tests parallèles- Par exemple : la température de la saumure déversée dans la mer ne dépassera pas 7 °C (obtenus en moyenne pendant 15 minutes) par rapport à l'eau de fond (eau brute/eau de mer) pendant 80 % de la durée totale selon la surveillance continue, jusqu'à 10 °C pendant 20 % de la durée totale selon la surveillance continue. Les pourcentages de temps sont calculés sur une base annuelle.
pH		9,0 > pH > 6,5
Fer (Fe) ⁽²⁾	mg/L	moyenne 0,2 - 0,7 et/ou Plage maximale : 0,5 - 2 (2 – sans prétraitement)
Métaux lourds Ag, As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn		ne dépasse pas la concentration la plus élevée mesurée dans le flux d'alimentation en eau de mer (« eau brute »), compte tenu de la concentration calculée selon le taux de récupération
Chlore libre ⁽³⁾	mg/L	0,1

Notes :

(*) L'exploitation des installations de dessalement influe sur les valeurs de la surveillance continue. Par exemple, cela dépend de la constance de l'alimentation électrique ou de sa modification sur le site en raison de la gestion de la demande d'énergie

(1) Température VLE fixée lorsque la saumure alimente les tours de refroidissement avant d'être rejetée en mer.

- (2) Voir également la VLE de la charge annuelle pour le fer dans le tableau n° 2. il existe une option permettant de définir la VLE maximale et la moyenne ou de définir uniquement la VLE maximale.
- (3) Pour tous les cours d'eau susceptibles de contenir du chlore libre. Ils doivent être traités et neutralisés dans l'installation de traitement des eaux de lavage.
- la valeur moyenne est la concentration calculée selon la moyenne arithmétique d'au moins 4 échantillons consécutifs ou la moyenne des échantillons d'un mois civil (pour les tests effectués avec une fréquence d'au moins 4 fois).

Tableau n° 2 : VLE pour les rejets d'une installation de traitement des eaux provenant du lavage à contre-courant d'un filtre à sable (par exemple) et du rinçage du calcaire.

Paramètre		VLE maximale
Total des solides en suspension (105°C)(TSS)	mg/L	90 % d'élimination ⁽¹⁾
		30 à la sortie du centre de traitement
Turbidité	NTU	30 à la sortie du centre de traitement

Note :

- (1) Le respect de l'objectif d'élimination sera vérifié par une surveillance à l'entrée et à la sortie du centre ou de la station de traitement.

CHYPRE

A/A	Paramètre	Valeurs limites d'émission	Fréquence
1	Température (T, °C)	Jusqu'à 10 °C de plus que la température du récipient d'eau	Au quotidien
2	Odeur	Sans odeur	
3	pH	6,5-9	
4	TOC	30mg/l	Tous les 3 mois
5	TSS	30mg/l	Tous les 3 mois
6	TN	10 mg/l	Tous les 3 mois
7	PT	2 mg/l	Tous les 3 mois
8	Hg	5 µg/l	Tous les 3 mois
9	Cd	0,2mg/l	Tous les 3 mois
10	Cu	0,1ppm	Tous les 3 mois
11	Zn	0,1ppm	Tous les 3 mois

A/A	Paramètres	Valeurs limites d'émission	Fréquence
1	Quantité	-	Au quotidien
2	Turbidité	-	
3	Chlorures	-	Tous les 3 mois
4	Conductivité	-	Tous les 3 mois

5	Salinité, ‰	-	Tous les 3 mois
6	Pb	-	Tous les 3 mois
7	Fe	-	Tous les 3 mois
8	En tant que	-	Tous les 3 mois
9	Ni	-	Tous les 3 mois
10	Cr	-	Tous les 3 mois
11	Mn	-	Tous les 3 mois
12	Mg	-	Tous les 3 mois
13	Sn	-	Tous les 3 mois
14	Ba	-	Tous les 3 mois
15	Cations (Mg ⁺² , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ⁺²)	-	Tous les 3 mois
16	Anions (Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , HCO ₃ ⁻³ , PO ₄ ⁻³ , NO ₃ ⁻)	-	Tous les 3 mois

PROGRAMME DE SURVEILLANCE DU FRONT DE MER

Paramètre	Fréquence
Température (oC) Salinité (‰) Conductivité électrique (mS/cm) pH Potentiel d'oxydoréduction (mV) Oxygène dissous (mg/L) Saturation en oxygène (%) Matières grasses, huiles et graisses (FOG) Turbidité Total des solides en suspension (TSS) Pb Hg Ni Cd Fe Cu Zn En tant que Cr Mn Mg Sn Ca	Deux échantillons sont prélevés à chaque station. L'échantillonnage sera effectué dans un premier temps immédiatement après la délivrance de l'autorisation d'élimination des déchets, puis il sera répété après deux ans et enfin six mois avant l'expiration de l'autorisation d'élimination des déchets.
NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ⁻³ , SO ₄ ⁻² , SiO ₄ ⁻⁴ , NH ₄ ⁺ ,	

Chlorophylle – A	
Pb Hg Ni Cd Fe Cu Zn En tant que Cr Mn Mg Sn Ca TOC Granulométrie	L'échantillonnage sera effectué dans un premier temps immédiatement après la délivrance de l'autorisation d'élimination des déchets, puis il sera répété après deux ans et enfin six mois avant l'expiration de l'autorisation d'élimination des déchets.